

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

ПАНІК ЛЕОНІД ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 004.421.2:519.17

СПЕЦІАЛІЗОВАНІ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНІ МОДЕЛІ АНАЛІЗУ  
ТА ПЛАНУВАННЯ НЕОДНОРІДНИХ ПОТОКІВ У  
ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ

01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпро-2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі комп'ютерних інформаційних технологій Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор

**Скалозуб Владислав Васильович,**  
декан факультету «Технічна кібернетика» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

**Корсун Валерій Іванович,**

завідувач кафедри метрології та інформаційно-вимірjuвальних технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

доктор технічних наук

**Ларіонов Григорій Іванович,**

старший науковий співробітник інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, м. Дніпро

Захист відбудеться «26» червня 2019 р. об 13 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.01 у Національній металургійній академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий «25» травня 2019 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д. 08.084.01  
кандидат технічних наук, доцент

Т. В. Селівьорстова

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми дисертації.** Однією із світових тенденцій сучасності є глобалізація, яка вимагає створення та інтеграції глобальних технологій. До них відносять і проблеми транспортних комплексів, зокрема управління потоками, що вирішуються шляхом застосування телематики, формування та функціонування інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Засобами ІТС вирішується великий комплекс завдань щодо моделювання, моніторингу, прогнозування, узгодження, планування і управління глобальними транспортними потоками різних категорій. Наприклад, управління мультимодальними перевезеннями, які мають кілька неоднорідних ланцюгів; організація і оптимальне планування вантажопотоків багатьох власників і перевізників з урахуванням певних вимог, використання технологій контролю потоків «слідкування» та «відмежування» перевезень тощо.

Функціонування транспортних комплексів та ІТС відбувається за умов великої кількості учасників перевезень і багатокритеріальності завдань планування, неоднорідності потоків, неповноти і невизначеності даних ін. Разом з цим переважна кількість класичних моделей і методів планування транспортних потоків не в повній мірі відповідає зазначеним вище сучасним вимогам, потребує розвитку і удосконалення. Актуальність завдань ефективного багатокритеріального планування неоднорідних потоків (НП) також визначається їх подібністю до завдань управління іншими типами НП (інформаційно-комунікаційними, фінансовими, у логістичних процедурах ін). Більшість відомих поточкових моделей у мережах є детермінованими, розв'язують завдання планування виходячи з вимог інфраструктури, а не окремих перевізників (власників потоків), використовують обчислювально витратні задачі про максимальний потік або потік мінімальної вартості, орієнтовані на окремі типи потоків (одно- і багато продуктові, динамічні ін.).

Таким чином на тепер розвиток і удосконалення уніфікованих багатокритеріальних моделей і алгоритмів планування неоднорідних транспортних потоків являється актуальним науково-прикладним завданням щодо підвищення ефективності транспортних процесів, в тому числі в ІТС.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до головних напрямків розвитку науки і техніки, «Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року» (схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. № 1555-у).

Обраний напрямок досліджень пов'язаний з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна:

1. «Розробка методів аналізу і оптимального планування потоків у транспортних мережах з урахуванням індивідуальних властивостей засобів перевезень, статистичних і нечітких вихідних даних» номер держреєстрації 0107U005242.

2. «Розробка адаптивних методів, інформаційних технологій та уніфікованих інформаційних процедур багатокритеріального ієрархічного і

нечіткого управління в умовах невизначеності», номер держреєстрації 0109U002989.

3. «Удосконалення інформаційних технологій на залізничному транспорті», номер держреєстрації 0111U007619.

4. «Інформаційно-аналітичні технології управління в інтелектуальних транспортних системах багатокритеріальними і багатопродуктовими потоками в умовах неоднорідної невизначеності параметрів процесів», номер держреєстрації 0113U000695., в яких автор був відповідальним виконавцем.

5. «Підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту на основі уніфікованих інтелектуальних технологій процесів перевезень та експлуатації парків технічних систем», номер держреєстрації 0117U004392 в якій приймав участь.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розвиток і вдосконалення спеціалізованих багатокритеріальних математичних моделей, методів аналізу і планування процесів, представлених неоднорідними потоками в транспортних і інших мережах, з урахуванням умов невизначеності параметрів систем.

Для досягнення зазначеної мети в рамках дисертаційної роботи поставлені та вирішені наступні **основні задачі**:

1. Виконати аналіз моделей процесів, представлених неоднорідними потоками в транспортних мережах, методів їх аналізу і оптимального планування, розробити класифікацію базових моделей з урахуванням спеціалізованих вимог складових процесів;

2. Дослідити особливості завдань аналізу і планування неоднорідних транспортних потоків з урахуванням умов конкуренції і спеціалізованих вимог елементів потоку, розробити класифікацію та формалізацію спеціалізованих вимог в моделях аналізу і планування;

3. Удосконалити моделі економічної рівноваги Вардропа для планування неоднорідних транспортних потоків;

4. Сформувати узагальнені багатокритеріальні моделі аналізу і планування багатопродуктових і неоднорідних транспортних потоків, які враховують взаємодію складових досліджуваних процесів;

5. Удосконалення багатокритеріальних моделей планування транспортних потоків при обліку умов невизначеності;

6. Розробка уніфікованих паралельних синхронних алгоритмів аналізу і планування неоднорідних стаціонарних потоків в транспортних мережах;

7. Розробка паралельного синхронного алгоритму аналізу і планування неоднорідних динамічних потоків в транспортних мережах;

8. Розробка і реалізація спеціалізованих моделей аналізу і планування стаціонарних неоднорідних транспортних пасажиропотоків, які враховують взаємодію транспортних потоків, варіативність вимог пасажирів, застосування змінних тарифів в умовах конкуренції;

9. Удосконалити моделі і алгоритми аналізу і планування неоднорідних динамічних транспортних потоків.

**Об'єкт дослідження** - процеси, представлені неоднорідними потоками в транспортних мережах.

**Предмет дослідження** - математичні моделі і методи аналізу та планування процесів передачі неоднорідних транспортних потоків зі спеціалізованими вимогами до структури і взаємодії окремих складових.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження виконувалися з використанням методів системного аналізу, математичного програмування, багатокритеріальної оптимізації, теорії нечітких множин, інтервального аналізу, теорії графів. При розробці програмного забезпечення була застосована технологія об'єктно-орієнтованого проектування.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

*Вперше:*

- запропоновано класифікацію задач і математичних моделей аналізу і планування неоднорідних потоків, які враховують спеціалізовані вимоги до транспортних мереж і взаємодію окремих складових досліджуваних процесів;
- розроблений уніфікований паралельний синхронний алгоритм аналізу і планування неоднорідних стаціонарних і динамічних потоків в транспортних мережах;

*Удосконалено:*

- багатокритеріальні моделі планування транспортних потоків при обліку умов інтервальної невизначеності;
- спеціалізовані моделі аналізу і планування стаціонарних неоднорідних транспортних потоків, які враховують взаємодію транспортних потоків, варіативність вимог пасажирів, застосування змінних тарифів в умовах конкуренції;
- уніфікована процедура планування нечітких багатопродуктових, динамічних і конкурентних потоків в транспортних і мережах інформаційних систем, що використовує паралельні синхронні алгоритми розрахунків максимальних потоків, яка дозволяє обчислити локальні екстремуми моделей оптимального розподілу потоків;

*Отримала подальший розвиток:*

- модель економічної рівноваги Вардропа для задач планування неоднорідних транспортних потоків;
- багатокритеріальні математичні моделі аналізу і планування при взаємодії неоднорідних стаціонарних, нечітких і динамічних потоків в мережах, які враховують умови конкуренції і спеціалізовані вимоги до компонентів транспортних процесів.

**Практичне значення одержаних в роботі результатів** полягає у підвищенні якості планування неоднорідних потоків в транспортних мережах в умовах застосування засобів інтелектуальних транспортних систем.

Практичне значення результатів підтверджується наступним:

- акт впровадження результатів роботи в ТОВ «СМАРТСТАРТ» при виконанні проекту «Адаптована система керування світлофорними об'єктами»;
- використання результатів роботи в навчальних курсах підготовки бакалаврів («Інформаційні технології та системи транспорту») і магістрів

(«Інфраструктура, телематика і інтелектуальні інформаційні технології») спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення»;

- авторським свідоцтвом на твір № 85769 «Паралельні уніфіковані алгоритми оптимального планування неоднорідних динамічних, нечітких і конкурентних процесів у транспортних мережах».

**Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів** забезпечується коректністю постановок завдань дослідження неоднорідних процесів к мережах, обґрунтованим застосуванням відомих загальноприйнятих методів та засобів математичного моделювання і обчислювальної математики, методів оброблення експериментальних та чисельних даних. Обґрунтованість наукових положень і достовірність отриманих результатів також підтверджується наступним:

1. Апробація розроблених моделей і методів для вирішення відомих завдань планування потоків у мережах.

2. Порівняльним аналізом та збіжністю результатами математичного моделювання із раніше відомими дослідженнями.

3. Позитивним досвідом застосування результатів роботи у науково-дослідних проектах за участі автора, а також у навчальному процесі.

**Особистий внесок здобувача.** У наукових працях, виконаних у співавторстві, дисертанту належать: [2] - узагальнення моделей економічної рівноваги щодо застосування їх до неоднорідних транспортних потоків, [3] – розробка та застосування паралельного синхронний алгоритму знаходження максимального потоку для аналізу багатопродуктових потоків, [4] – аналіз динамічних нечітких багатопродуктових потоків за допомогою паралельного синхронного алгоритму, [5] – розробка математичної моделі компромісного вибору на множині траєкторій та її реалізація в середовищі Matlab, [8] - реалізація багатокритеріальних поточкових задач з використанням моделі клітинних автоматів, [9] – розробка та реалізація математичних моделей для неоднорідних пасажирських потоків. [10] – розробка та реалізація математичних моделей для неоднорідних транспортних потоків зі змінними тарифами.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення й результати дисертації доповідалися, обговорювалися та були схвалені на міжнародних конференціях «Проблеми економіки транспорту» (2007, 2009, 2010, 2012, 2014, 2015, 2017 р., м. Дніпро); на міжнародній конференції «Сучасні інформаційні технології на транспорті, у промисловості й освіті» (2009-2012, 2014-2018 р.р., м. Дніпро); на III міжнародній науково-практичній конференції: «Інтеграція України в міжнародну транспортну систему», ДНУЗТ, 2011 р.; на міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (2013, 2014, 2018 р., м. Дніпро); на науковому семінарі кафедри Комп'ютерних інформаційних технологій ДІТ'у (2007-2019 р.р., м. Дніпро).

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 32 наукових робіт (в тому числі 3 – одноосібних), з них 7 – у наукових фахових виданнях, які рекомендовано Міністерством освіти і науки України і 21 – у

збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій, 1 авторське свідоцтво на твір.

### **Структура і обсяг роботи.**

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 210 сторінки, у тому числі 160 сторінки основної текстової частини, 26 рисунків, 14 таблиць, 5 додатків на 37 сторінках та список використаних джерел із 100 найменувань на 13 сторінках

## **ЗМІСТ РОБОТИ**

**Вступ** дисертаційної роботи містить: обґрунтування її актуальності, інформацію про зв'язок з науковими програмами, мету і завдання дослідження, сформульовані об'єкт і предмет дослідження, застосовані методи дослідження, характеристику наукової новизни і практичного значення отриманих результатів, інформацію про особистий внесок автора, апробації результатів і публікації.

У **першому розділі** виконано аналіз наукових досліджень щодо сучасних досягнень та наявних проблем сфери планування неоднорідних потоків у транспортних, інформаційних та інших мережах, які зв'язані із стрімко зростаючим обсягом таких потоків у різних галузях діяльності, із розвитком інтелектуальних транспортних систем та ін. Відомо що задачі з аналізу та планування неоднорідних потоків за умов їх конкуренції та при урахуванні умов невизначеності являються багатокритеріальними, а в обчислювальному плані є складними і трудомісткими, більшість використовуваних алгоритмів аналізу потоків мають досить слабку збіжність. При цьому для деяких алгоритмів (Едмондса-Карпа, Дініца) відомі певні структури мереж особливо важких для аналізу. Створено більше двадцяти алгоритмів розрахунку лише максимальних одно продуктових потоків та потоків мінімальної вартості тощо.

У розділі представлені типи додаткових вимог до одиниць потоків транспортних засобів, визначених як «індивідуальні властивості». А саме:

- 1) Переміщення деяких носіїв за певними встановленими маршрутами.
- 2) Обмеження на можливість сумісного руху певних типів елементів потоку дугами мережі, виникнення конкуренції між складовими неоднорідних потоків. При цьому виникає нова задача щодо оптимального розподілу одиниць потоку по мережі за умов суперечностей у пересуванні.
- 3) Завдання планування потоків при встановленні певної можливої послідовності (пріоритетів) руху категорій носіїв. Пріоритети щодо використання маршрутів (траєкторій руху у мережі) суттєво ускладнюють процедури планування потоків.
- 4) Планування потоків з урахуванням компромісу вимог власників потоків, а не лише параметрів інфраструктури. Тобто визначення при плануванні індивідуальних оцінок якості руху носіїв потоків.

Представимо останнє завдання щодо планування транспортних потоків докладніше. Нехай є  $n$  перевізників і задані їх кількості одиниць потоку:

$m_1, m_2, \dots, m_n$ . За перевезення вантажу вони одержують певну кількість коштів, що залежить від траєкторій руху мережею. Необхідно розв'язати багатокритеріальну задачу та розрішити компроміс перевізників на основі певних умов розподілу їх прибутків з урахуванням властивостей перевізників.

Загальною характеристикою завдань планування потоків транспортних засобів з «індивідуальними властивостями» є поняття траєкторії руху, як окремого об'єкту аналізу. Так для формування максимального потоку у мережі необхідно визначити множину можливих траєкторій, по яких можуть рухатися окремі одиниці потоку з «індивідуальними властивостями».

У розділі також представлені наступні моделі потоків з неоднорідними властивостями. Позначимо як  $t_i$  – кількість одиниць потоку з  $i$ -ою індивідуальною властивістю, де  $i = 1, m$ . Тоді задача про траєкторії максимального потоку має наступний вигляд:

$$\sum_{i=1}^m t_i = V \quad (1)$$

за умови, що:

$$\sum_j \sum_{k=1}^m f_{ij}^k - \sum_j \sum_{k=1}^m f_{ji}^k = \begin{cases} V, i = s \\ 0, i \neq s, i \neq t, k = 1, m \\ -V, i = t \end{cases} \quad (2)$$

Тут  $V$  – величина потоку. Відмінність моделі (1) – (2) від загально відомих у наявності подвійної суми (облік потоків з  $k$ -ою індивідуальною властивістю). Задача (1) – (2) матиме розв'язок, якщо виконується співвідношення:

$$0 \leq \sum_{k=1}^m f_{ij}^k \leq U_{ij}, \text{ тут } f_{ij}^k \leq t_k, \quad (3)$$

де  $U_{ij}$  – пропускна спроможність дуги  $(i, j)$  мережі,  $f_{ij}^k$  – величина потоку з  $k$ -ою індивідуальною властивістю по дузі,  $k = 1, m$ . Модель (1) – (2) не має розв'язку, якщо існують дуги  $(i, j)$  на яких виконується нерівність

$$\sum_{k=1}^m f_{ij}^k > U_{ij}. \quad (4)$$

Якісна відмінність розв'язку моделі (1) – (4) полягає у необхідності визначати можливі траєкторії руху одиниць потоку по мережі, загальне число яких відоме (максимальне).

У **другому розділі** визначені та досліджені властивості транспортних потоків, які впливають на обчислювальні процедури аналізу багатопродуктових мереж. Встановлено їх зв'язки із типами математичних моделей поточкових завдань. На підставі цього запропоновані класифікації, представлені у табл. 1-2.



Таблиця 1

## Класифікація моделей взаємодії транспортних потоків.

Властивості Тип взаємодії	Інфраструктура (сервіси)	Клієнти (потоки)	Приклади моделей
T1	1	1	Однопродуктові потоки
T2	1	n	Багатопродуктові потоки
T3	m	1	Конкуренція за потоки
T4	m	n	Кооперація, (поїздка з пересадками)

Особливості моделей задач про транспортні потоки включають властивості параметрів (детерміновані, стохастичні, інтервальні, нечіткі, неоднорідно-невизначені), часові властивості (статичні, динамічні, детерміновані, часові інтервали ін.). Виходячи з властивостей математичних моделей і алгоритмів реалізації завдань аналізу потоків в мережах були виділені такі класи задач.

K1. Однопродуктові потоки (обмеження нерозривності потоку, пропускних спроможностей дуг).

K2. Багатопродуктові потоки (додаткові обмеження на загальну пропускну здатність дуг для всіх продуктів).

K3. Компромісні багатопродуктової моделі (додаткові сепарабельні обмеження на кожен продукт).

K4. Структурні вимоги на зв'язки продуктів (не сепарабельні обмеження на величину граничного потоку по дугах; урахування і облік специфічних вимог до зв'язків продуктів, що впливають на потік). Усі наступні класи моделей включають математичні властивості попередніх, табл. 2.

Таблиця 2

## Класи математичних моделей неоднорідних поточкових завдань у мережах

Клас моделі	Назва	Умови потоків	Властивості	Модель
K1	Однопродуктові	$u_{ij} \leq d_{ij}$	Нерозривність потоку	Мін. розріз
K2	Багатопродуктові	$\sum_k u_{ij}^k \leq d_{ij}$	Множина мереж для потоку	Мін. розд. мн-на
K3	Компромісні багатопродуктові	$u_{ij}^k \leq d_{ij}^k$ $d_{ij}^k = f_k(u_{ij}^k)$	Сепарабельних обмежень потоків	Компроміс потоків на дугах
K4	Структурні вимоги до потоків продуктів	$d_{ij} = f(u_{ij}^k)$ $d_{ij}^k = f(\bar{u}_{ij}^k)$	Не сепарабельність зв'язків в потоках	$\prod_k u_{ij}^k = 0$

У загальному випадку реалізація моделей для кожного із зазначених класів передбачає створення або вдосконалення окремих обчислювальних методів і процедур. В дисертації вирішується завдання щодо розробки уніфікованого паралельного алгоритму, придатного для реалізації всіх класів моделей K1 – K4.

У розділі також виконано розвиток багатокритеріальних спеціалізованих моделей аналізу та планування неоднорідних потоків у транспортних мережах. При цьому були досліджені й удосконалені моделі економічної рівноваги, які застосовуються для опису неоднорідних автотранспортних потоків. А саме – моделі транспортної рівноваги що формуються на основі поведінкових принципів конкурентної і системної рівноваги Вардропа.

B1) Незалежний вибір маршруту слідування, відповідно мінімальним транспортним витратам кожного учасника (перший принцип рівноваги).

B2) Вибір маршрутів слідування користувачами, виходячи з мінімізації загальних транспортних витрат в мережі (принцип системної рівноваги).

Головна різниця між конкурентною транспортною рівновагою і системним оптимумом вказана в роботі А. Пігу Ця відмінність є ціною неузгодженості, відсутності взаємодії і організації учасників потоку.

У розділі виконано узагальнення принципів B1 і B2 в умовах декількох категорій об'єктів автотранспортного потоку. При цьому отримуємо наступну узагальнену модель принципу рівноваги неоднорідного потоку (B1):

$$\forall k : G(x_p^{(k)}) = G(x_q^{(k)}); \forall (p, q) : x_p^{(k)}, x_q^{(k)} \in X^{(k)}; \quad (5)$$

$$\sum_p x_p^{(k)} = X^{(k)}, \quad \sum_k X^{(k)} = 1; \quad (6)$$

$$x_p^{(k)} \geq 0, \quad p \in I_p. \quad (7)$$

В (5) - (7)  $p \in I_k$  множина індексів маршрутів для категорії транспорту « $k$ ».

Використовуючи такі ж передумови, узагальнений принцип Вардропа 2 (B2), відповідно вимозі системної оптимізації для « $k$ » учасників потоку, може бути представлений наступною моделлю рівноваги:

$$G_*(\bar{X}) = \sum_k \sum_i \beta_i^{(k)} (x_i^{(k)})^{(1+\gamma(i,k))} \rightarrow \min \quad (8)$$

$$\sum_k x_i^{(k)} \leq c_i; \quad 0 \leq x_i^{(k)} \leq c_i^{(k)}; \quad i \in I_X; \quad (9)$$

$$\sum_k \sum_i \beta_i^{(k)} = 1. \quad (10)$$

У моделі B2 (8) – (10) параметри  $\beta_i^{(k)}$  питомі витрати на маршруті  $x_i^{(k)}$   $k$ -ого учасника транспортного потоку;  $\gamma(i,k)$  - параметр, який враховує залежність питомих витрат залежно від значення потоку  $x_i^{(k)}$ . Решта позначень і обмежень відповідають моделі B1 (5) – (7).

Більшість з існуючих методів рішення задачі про максимальний потік в мережі не дозволяє враховувати невизначеності, пов'язані з розкидом значень, неточним визначенням даних, обліком помилок вимірювань та ін. У розділі досліджене завдання оптимального планування конкурентних транспортних

потоків за умов інтервальної невизначеності експлуатаційних параметрів. У зв'язку з цим виникає потреба в розробці методів, що враховують перераховані види невизначеностей. Вирішується задача вибору компромісних варіантів на множині траєкторій носіїв потоку. В моделі задачі є  $n$  власників, яким належать задані кількості одиниць потоку:  $m_1, m_2, \dots, m_n$ . Розраховується інтервальна максимінна оцінка ефективності потоку з власними властивостями носіїв в наступному вигляді:

$$\tilde{F}(s) = \max_s \min_{i \in [1, n]} \frac{\tilde{f}_i^+(s) - \tilde{f}_i^-}{\tilde{f}_i^+ - \tilde{f}_i^-} \quad (11)$$

де  $s$  – розподіл одиниць потоку в мережі (потужність множини  $s$  рівна максимальному потоку),  $\tilde{f}_i(s)$  – інтервальний дохід  $i$ -го перевізника при  $s$ -ом розподілі  $\tilde{f}_i^+$ ,  $\tilde{f}_i^-$  – найбільший і найменший інтервальний дохід  $i$ -го перевізника. Інтервальні значення доходу виникають, наприклад, у разі різної завантаженості засобів перевезення, різні тарифи на перевезення, які подані через інтервали значень.

Розроблено метод двохкритеріального порівняння інтервалів з урахуванням вірогідності домінування одного інтервалу над іншим і розмірів інтервалів, який ураховує коефіцієнти відносної важливості часткових критеріїв. Розглянемо два інтервали  $A$  і  $B$ . Оскільки в загальному випадку можуть бути мати місце три інтервальні події  $A < B$ ,  $A = B$  і  $A > B$ , сформульовано наступні інтегральні критерії для оцінки величини інтервалів:

$$D_{A < B}(A, B) = \frac{1}{2} \cdot (r_p P(A < B) + r_w \mu_w(x_A)) \quad (12)$$

$$D_{A > B}(A, B) = \frac{1}{2} \cdot (r_p P(A > B) + r_w \mu_w(x_B)) \quad (13)$$

$$D_{A = B}(A, B) = \max(D'_{A = B}(A, B), D''_{A = B}(A, B)) \quad (14)$$

де

$$D'_{A = B}(A, B) = \frac{1}{2} \cdot (r_p P(A = B) + r_w \mu_w(x_A)) \quad (15)$$

$$D''_{A = B}(A, B) = \frac{1}{2} \cdot (r_p P(A = B) + r_w \mu_w(x_B)) \quad (16)$$

У (12) - (16)  $r_p$ ,  $r_w$  – коефіцієнти відносної важливості критеріїв вірогідності і ширини, відповідно. За наявності тільки двох часткових критеріїв, задача визначення їх  $r_p$ ,  $r_w$  не викликає труднощів. Проте при цьому повинне бути виконане обмеження:

$$(r_p + r_w) / 2 = 1 \quad (17)$$

При дотриманні (17) для будь-якого випадку двохкритерійного порівняння інтервалів виконуватиметься нерівність:

$$0 \leq D_{A < B}, D_{B < A}, D_{A = B} \leq 1 \quad (18)$$

Застосування такого методу порівняння інтервалів з урахуванням вірогідності переваги одного інтервалу над іншим і відносної ширини в процесі оптимізації для порівняння поточного значення цільової функції з оптимальним, знайденим на попередніх кроках, дозволяє досягти зниження невизначеності результату.

З представлено на рис. 1 витікає, що при збільшенні показника важливості ширини відбувається зрушення оптимуму у бік з інтервалами меншої ширини. Проте зменшення ширини оптимального інтервалу досягається за рахунок деякого погіршення (збільшення) середнього значення інтервалу. При цьому при наближенні показника важливості ширини до значення 2 відбувається різке збільшення середньоінтервального значення цільової функції.

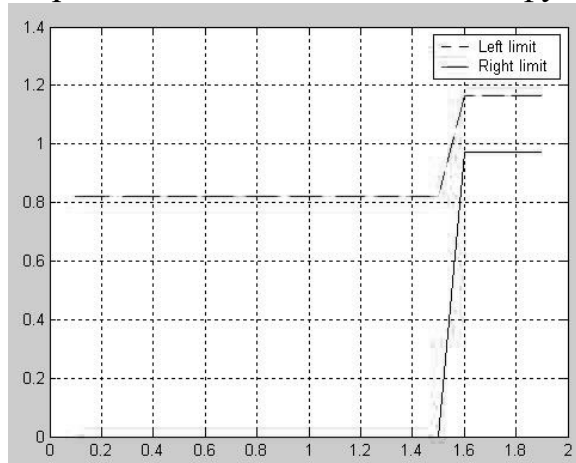


Рис.1. Залежність значення інтервальної цільової функції  $\tilde{F}(s)$  від показника важливості ширини

Таким чином, в процесі варіювання важливостей часткових критеріїв вірогідності і ширини інтервалу можна досягти необхідного компромісу між шириною вихідного інтервалу і його середнім значенням, що цілком узгоджується з нашими інтуїтивними уявленнями.

У **третьому розділі** розглядаються паралельні синхронні алгоритми аналізу та планування неоднорідних потоків у транспортних мережах.

Узагальнена схема базового паралельного синхронного алгоритму аналізу потоків в транспортних мережах (БПСА)

Основними для визначення максимальних потоків у транспортних мережах являються відповідна теорема та метод Форда-Фалкерсона, що призначені для аналізу однопродуктових цілочисельних потоків. На теперішній період існує більше двадцяти алгоритмів для розрахунку максимальних потоків у мережах, серед яких одними із перших та найбільш поширеними є алгоритми Форда-Фалкерсона, Едмондса-Карпа, Дініца. Проведений аналіз особливостей, переваг і недоліків алгоритмів, відомі оцінки складності таких алгоритмів. Розроблена значна кількість програмних реалізацій цих алгоритмів, у тому числі їх паралельних версій. Необхідно зазначити, що завдання розрахунку максимального потоку є досить ресурсовитратним, при цьому існують структури мереж, для яких алгоритми мають слабку збіжність. При аналізі багатодуктових (неоднорідних) потоків у транспортних та інших мережах

складності побудови та реалізації алгоритмів оцінки параметрів максимальних потоків суттєво зростають.

У традиційних методах розрахунків максимальних потоків виділяють 3 основних етапи: розрахунок усіх можливих шляхів; вибір одного з мінімальним значенням довжини; пропуск максимального доповнюючого потоку цим шляхом з подальшим коригуванням пропускних спроможностей.

У запропонованому алгоритмі у прямому ході об'єднуються етапи 1-3, а за рахунок синхронізації створюється можливість обробки декількох потоків одночасно. З урахуванням цього загальна схема базового синхронного паралельного алгоритму (БПСА) пошуку максимального потоку зі властивістю P наступна:

1. Встановити значення $V_{\max} = 0$ , пропускні спроможності всіх дуг модифікованої мережі $G'(N, A)$ рівні вихідній $G(N, A)$ (прямий хід $U_p = 0$ )
2. До тих пір, поки не досягнутий стік $t$ виконувати наступне: <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1. Синхронно виконувати передачу потоку по мережі відповідно номерам вузлів <math>\{N_i\}</math>, контролюючи їх активність і готовність.</li> <li>2.2. Для готових вузлів виконувати передачу <math>\max</math> вхідного потоку в вузли які виходять.</li> <li>2.3. Сформувані всі варіанти шляхів через мережу</li> <li>2.4. Знайти величини потоків по кожному з можливих шляхів</li> </ol>
3. Змінити напрямок потоку на протилежний (зворотний хід $U_p = 1$ )
4. Поки не досягнутий вузол (джерело) $s$ виконувати: <ol style="list-style-type: none"> <li>4.1. Аналіз зворотних додаткових неперервних потоків.</li> <li>4.2. Процедура розпаралелювання.</li> <li>4.3. Фіксація вузлів зворотних маршрутів.</li> </ol>
5. Перерахунок розміру додаткового потоку $V^*(U_p = 1)$ , якщо $V^*(U_p = 1) = 0$ - кінець алгоритму.
6. Коригування $V_{\max}$ відповідно до $V^*(U_p = 1)$ . Модифікація мережі $G'(N, A)$ . Перейти на крок 2.

В представленій схемі алгоритму при прямому проході аналізу мережі будуються всі можливі шляхи і одночасно оцінюється їх максимальна пропускна здатність, а при зворотному ході формуються справжні додаткові потоки і перевіряється можливість їх додаткового обліку. Для цього прийнята така схема обробки потоків у вузлах мережі.

Стани вузлів моделі мережі: ЧЕКАЄ, АКТИВНИЙ, ГОТОВИЙ, ПЕРЕДАНО.

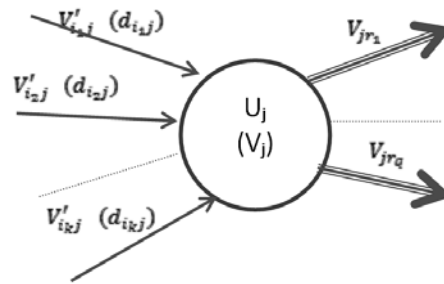


Рис. 2. Схема паралельних потоків у вузлах моделі мережі

$$V_{i_kj} = \min \{d_{i_kj}, V'_{i_kj}\} \quad V_{jr_q} = \max \{V_{i_kj}\}$$

Додатковий потік:  $V''_{i_kj} = \max(\min) \{V_{jr_q}\}$   $i_k$  - max вхідний потік  $V_{i_kj}$

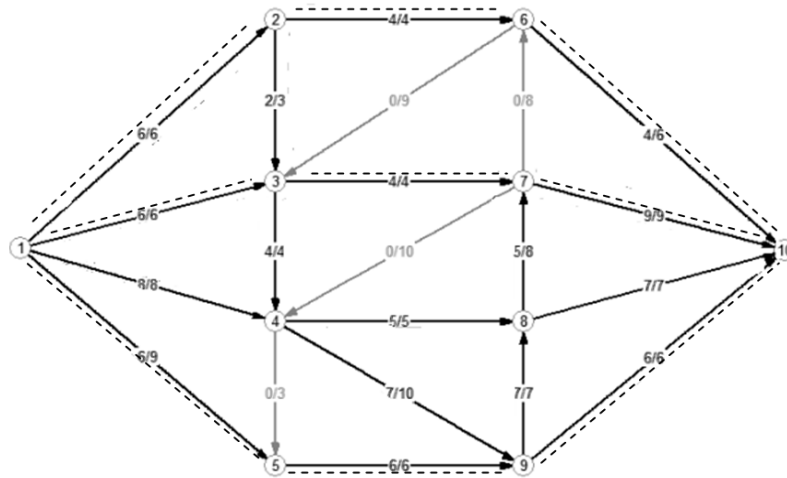


Рис. 3. Формування максимального потоку паралельним алгоритмом

На рис. 3 показано приклад аналізу потоків у складних орієнтованих мережах, який паралельним алгоритмом БПСА, на відміну від інших, знайдено за один прохід. Це потоки по траєкторіях: 1 – 2 – 6 – 10, 1 – 3 – 7 – 10 та 1 – 5 – 9 – 10 (які виділені штрихпунктирними лініями).

Для забезпечення можливості паралельної обробки декількох потоків застосовано процедури синхронізації потоків. При цьому враховані наступні властивості потоків у мережах, які дають вибір вузла для передачі потоку синхронізації (процедура розблокування): входить в множину активних вузлів; мінімальне число не активізованих вхідних потоків; мінімальна відстань від витоку мережі; максимальне число вхідних потоків; мінімальний номер вузла мережі. В результаті виконання процедури розблокування обирається вузол мережі для передачі синхронізованого потоку.

В роботі розроблено паралельний алгоритм для неоднорідних потоків який має таке представлення:

$$s = \{(s_k, t_k)\} \quad G_k(N_k, A_k) \text{ – підмережа } k\text{-ого продукту}$$

1. Для кожного продукту встановити початкові значення $V_k^* = 0; G_k(N_k, A_k)$
2. Незалежно виконати паралельний аналіз всіх продуктів, використовуючи БПСА (без обм. на загальну пропускну здатність)
3. Виділити роздільну множину, визначити потоки продуктів по дугам цієї множини
4. Вирішити конфлікт продуктів на кожній дузі роздільної множини (з урахуванням загального обмеження на пропускну здатність)
5. Розрахувати оцінки потоків продуктів по всім дугам роздільної множини
6. Розрахувати потоки продуктів по мережі
7. Контроль умов закінчення або ж коригування мереж $G_k(N_k, A_k)$ .

У розділі наводиться процедура і результати планування потоків на основі принципу компромісу виду

$$F_C(V) = \max_V (\theta = \min_k (V_k / D_k)) = \theta_C$$

де  $V_k$  – величина компромісного потоку  $k$ -ого продукту, а  $D_k$  – його максимальний потік в мережі.

Цей алгоритм був успішно використаний для аналізу конкурентних багатопродуктових потоків в мережі з 8 маршрутами передачі повідомлень при обмежених пропускних спроможностях, яка представлена на рис. 4.

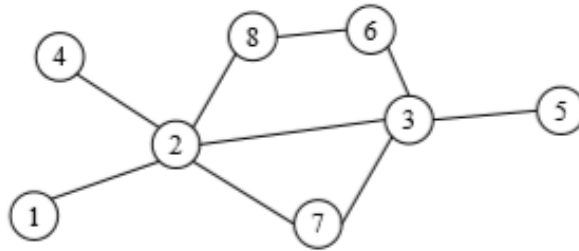


Рис. 4. Структура мережі передачі повідомлень

У прикладі найменша величина критерію рівна 76,00%. Результати планування розподілу інформаційних потоків на основі цього алгоритму повністю збігаються з відомими розрахунками, що підтверджує достовірність і ефективність пропонувананих методів розрахунку багатопродуктових потоків.

В роботі також вирішені завдання знаходження максимального потоку в нечіткій динамічній транспортній мережі

$$\text{Minimize } \sum_{\theta=0}^p \sum_{(x_i, x_j) \in \tilde{A}} \tilde{c}_{ij} \times \tilde{\xi}_{ij}(\theta), \quad (19)$$

$$\sum_{\theta=0}^p \sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{sj}(\theta) - \tilde{\xi}_{js}(\theta - \tau_{js}(\theta))] - \tilde{v}(p) = \tilde{0}, \quad (20)$$

$$\sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{ij}(\theta) - \tilde{\xi}_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta))] = \tilde{0}, \quad x_i \neq s, t; \theta \in T, \quad (21)$$

$$\sum_{\theta=0}^p \sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{ij}(\theta) - \tilde{\xi}_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta))] + \tilde{v}(p) = \tilde{0}, \quad (22)$$

$$0 \leq \tilde{\xi}_{ij}(\theta) \leq \tilde{u}_{ij}(\theta), \forall (x_i, x_j) \in \tilde{A}, \theta \in T. \quad (23)$$

На основі модифікації БПСА для динамічних потоків маємо алгоритм:

1. Задати пропускні спроможності в залежності від часу $d_{ij}(T)$ . Задати час проходження потоку дугами динамічної мережі $G(T)$
2. Створити статичну «розтягнуту в часі» мережу $\tilde{G}(T)$ .
3. Використати алгоритм БПСА для знаходження максимального потоку в мережі $\tilde{G}(T)$
4. Перейти від статичної мережі до динамічної $G(T)$ . Значення максимального потоку з пункту 3 є результатом $\tilde{G}(T)$ .

Значення пропускних здатностей  $d_{ij}(T)$  можуть бути нечіткими або інтервальними. Методика переходу до «розтягнутої в часі» мережі розглядається в роботах Л. Форда та Д. Фалкерсона.

В **четвертому розділі** формуються спеціалізовані моделі аналізу та оптимального планування неоднорідних пасажиропотоків.

Процес планування пасажиропотоків з пересадками у залізничних транспортних мережах ускладнений нерівномірністю пасажиропотоків у часі та просторі. Для реалізації завдання проводять дослідження завантаженості інфраструктури залізничних вокзалів і станцій при змінах розмірів руху пасажирських поїздів. При плануванні заздалегідь визначаються станції пересадки пасажиропотоків та категорії пасажирських поїздів, для яких слід передбачити узгодження часу прибуття та відправлення в графіках руху. В математичному сенсі виникає задача оптимізації розподілу потоків в багатопродуктових мережах.

У розділі запропоновано узагальнену модель планування поїздок з пересадками, яка ураховує неоднорідність вимог пасажирів до процесу перевезень, яка полягає у наступному. Залізнична мережа подається у вигляді орієнтованого графу  $G(E, A)$ , де вершини  $E$  мережі відповідають станціям формування та обертву пасажирських поїздів, а орієнтовані ребра  $A$  фізичного графу напрямкам призначення пасажирських поїздів. Величина інтенсивності пасажиропотоку (кількість пасажирів, що прямують по кожному із напрямків за встановлений період, наприклад, добу) для кожного  $r$ -того напрямку, який прямує з джерел  $s^r$  до стоків  $t^r$ , відома і дорівнює  $f^r$ . Позначимо, через  $x_{ij}^r$ -потік по дузі  $A_{ij}$ , що відповідає числу пасажирів, які прямують із станції  $i$  до станції  $j$   $r$ - тим напрямом поїздів. Нехай  $c_{ij}^r$  - це вартість перевезення одиниці потоку (пасажира) із станції  $i$  до станції  $j$ , в яку входить і вартість за пересадку для деяких станцій. Тоді математична модель оптимального планування поїздок з пересадками має вигляд:



$$\sum_r \sum_i \sum_j c_{ij}^r x_{ij}^r \rightarrow \min \quad (24)$$

при обмеженнях:

$$\sum_j x_{ij}^r - \sum_j x_{ji}^r = -f^r, i \in s^r, r = 1, 2, \dots, R \quad (25)$$

$$\sum_j x_{ij}^r - \sum_j x_{ji}^r = 0, i \notin E_s, j \notin E_t, r = 1, 2, \dots, R \quad (26)$$

$$\sum_j x_{ji}^r - \sum_j x_{ij}^r = f^r, i \in t^r, r = 1, 2, \dots, R \quad (27)$$

$$0 \leq \sum_r x_{ij}^r \leq U_{ij}, (i, j) \in A. \quad (28)$$

В цій моделі  $U_{ij}$  це пропускна здатність ребра  $(i, j)$ , тобто число місць в поїздах, які прямують зі станції  $i$  до станції  $j$ .

Для прикладу розглянуто логічний граф мережі  $G$  наступного вигляду:

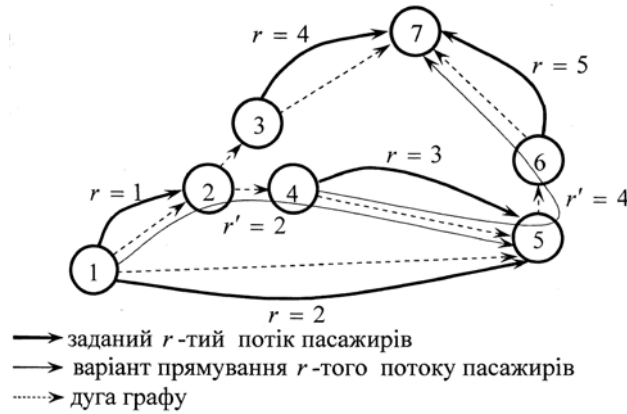


Рис. 5. Логічний граф мережі потоків з пересадками  $G$

Урахування вимог пасажирів, їх неоднорідність, суттєво змінює зміст і складність задач планування. У цих випадках виникають моделі планування з індивідуальними властивостями (ІВ) елементів. Сутність спеціалізації вимог пасажирів для моделі (24) – (28) полягає в урахуванні категорій пасажирів (місця у вагонах різних типів: плацкарт, купейний та інші). Вирішення оптимізаційних завдань, подібних (24) – (28) з урахуванням ІВ виконується за допомогою методу редукції – шляхом збільшення кількості станів моделі планування. Сформована економіко-математична модель планування поїздок з пересадками, яка розширює (24) – (28) за рахунок обліку неоднорідності вимог пасажирів:

$$\sum_r \sum_k \sum_i \sum_j c_{ij}^{rk} x_{ij}^{rk} \rightarrow \min \quad (29)$$

при обмеженнях:

$$\sum_k \sum_j x_{ij}^{rk} - \sum_k \sum_j x_{ji}^{rk} = -f^{rk}, i \in s^r, r = 1, 2, \dots, R; \quad (30)$$

$$\sum_k \sum_j x_{ij}^{rk} - \sum_j x_{ji}^{rk} = 0, i \notin E_s, j \notin E_t, r = 1, 2, \dots, R; \quad (31)$$

$$\sum_k \sum_j x_{ji}^{rk} - \sum_k \sum_j x_{ij}^{rk} = f^{rk}, i \in t^r, r = 1, 2, \dots, R \quad (32)$$

$$0 \leq \sum_r x_{ij}^{rk} \leq U_{ij}^k, (i, j) \in A, k = 1, 2, \dots, K. \quad (33)$$

В моделі  $U_{ij}^k$  – пропускна здатність ребра  $(i, j)$  в  $k$ -тому типі вагону. На відміну від моделі (24) – (28) кількість обмежень моделі (29) – (33) збільшується.

В розділі також вирішується завдання для математичної моделі динамічної потокової задачі з пересадками:

$$\sum_t \sum_r \sum_k \sum_i \sum_j c_{ij}^{rk}(t) x_{ij}^{rk}(t) \rightarrow \min \quad (34)$$

при обмеженнях:

$$\sum_k \sum_j x_{ij}^{rk}(t) - \sum_k \sum_j x_{ji}^{rk}(t) = -f^{rk}(t), i \in s^r, r = 1, 2, \dots, R, t = 1, 2, \dots \quad (35)$$

$$\sum_k \sum_j x_{ij}^{rk}(t) - \sum_j x_{ji}^{rk}(t) = 0, i \notin E_s, j \in E_l, r = 1, 2, \dots, R, t = 1, 2, \dots \quad (36)$$

$$\sum_k \sum_j x_{ji}^{rk}(t) - \sum_k \sum_j x_{ij}^{rk}(t) = f^{rk}(t), i \in l^r, r = 1, 2, \dots, R, t = 1, 2, \dots \quad (37)$$

$$0 \leq \sum_r x_{ij}^{rk}(t) \leq U_{ij}^k(t), (i, j) \in A, k = 1, 2, \dots, K, t = 1, 2, \dots \quad (38)$$

У моделі планування перевезень (34) – (38), на відміну від попередньої, введено параметр  $t$ , який означає моменти часу (години, дні, тижні і так далі). Також від часу може залежати параметр  $r$ , тобто види напрямів руху (закриття ділянок руху; виникнення нових напрямів в літній період відпусток тощо). При введенні в модель часу пересування від пункту  $i$  до пункт  $j$  виникає багатокритеріальна задача планування з другим критерієм – мінімальним часом пересування.

Питання моделювання транспортних потоків, що враховують аспекти конкуренції обслуговуючих систем (ОС), спрямовані на оптимальне планування розподілу потоків в мережах, коли питомі показники ефективності перевезень, відповідні тарифам, залежать від величини потоку і задаються різними способами. У цьому розділі розглянуті також наступні варіанти умов планування перевезень: питомі витрати (прибуток) постійні, елементи матриць питомих витрат деякої дуги залежать від власного потоку, питомі витрати дуги залежать від величин потоків декількох дуг, підмережі. Останній випадок планування безпосередньо відображає конкуренцію ОС за рахунок вибору значень тарифів.

Розглянемо узагальнену математичну модель потокової задачі про взаємодію ОС, тут – видів транспорту. Представимо транспортну мережу у вигляді орієнтованого графа  $G(E, A)$ . Величина інтенсивності пасажиропотоку, який прямує з джерела  $s$  до стоку  $t$ , відома і дорівнює  $f$ . Позначимо через  $x_{ij}^k$  – потік по дузі  $A_{ij}$ , рівний (умовно) числу пасажирів, які прямують з пункту  $i$  в пункт  $j$ , в  $k$ -тому виді транспорту. Тоді математична модель планування з урахуванням неоднорідності елементів потоку матиме вигляд:

$$\Phi(\bar{\alpha}, \bar{\varphi}_k(\bar{x})) = \sum_k \bar{\varphi}_k(\bar{x}) \alpha_k \rightarrow \max \quad (39)$$

при обмеженнях:

$$\sum_k \sum_j x_{ij}^k - \sum_k \sum_j x_{ji}^k = -f \quad (40)$$

$$\sum_k \sum_j x_{ij}^k - \sum_k \sum_j x_{ji}^k = 0 \quad (41)$$

$$\sum_k \sum_j x_{ji}^k - \sum_k \sum_j x_{ij}^k = f \quad (42)$$

$$0 \leq x_{ij}^k \leq U_{ij}^k \quad (43)$$

$$\prod_k x_{ij}^k = 0 \quad (44)$$

$$\sum_{k=1}^m x_{ij}^k \leq U_{ij} \quad (45)$$

У моделі (39) – (45)  $x_{ij}^k$  – потік по дузі, а  $U_{ij}^k$  – це пропускна здатність ребра (кількість пасажирів, які перевозяться з пункту  $i$  в пункт  $j$  в  $k$  - тому виді транспорту (продукт « $k$ »). Обмеження (43), (44) відповідають математичним моделям потокових задач з індивідуальними властивостями, а обмеження (45) відносять модель до багатопродуктових задач. Зокрема, обмеження (44) забороняють одночасне переміщення товарів « $k$ » по дугах  $(i, j)$ . У функції мети (39)  $\alpha_k$  – це вагові коефіцієнти, а  $\varphi_k$  – показники ефективності для кожного  $k$  - ого виду транспорту.

Якщо в (39) – (45) ввести години переміщення з пунктів  $i$  в  $j$ , то модель можна розглядати як багатокритеріальну з додатковим критерієм - мінімальним часом пересування.

Розглянуто деякі постановки потокових задач про розподіл неоднорідних потоків, взаємодію ОС транспорту, враховуючи різні моделі елементів матриць питомих ефективностей перевезень  $c_{ij}^k$ .

Якщо в (39) усі  $\alpha_k$  однакові, а функції  $\varphi_k$  мають вигляд

$$\varphi_k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}^k x_{ij}^k, \quad (46)$$

тоді модель (39) – (45) описує багатопродуктову задачу з індивідуальними властивостями. У моделі (46)  $c_{ij}^k$  - це питомий дохід від перевезення (пасажирів) з пункту  $i$  в пункт  $j$  для  $k$  - того «продукту», виду транспорту.

Нехай в (39), всі  $\alpha_k$  рівні, а функції  $\varphi_k$  мають вигляд:

$$\varphi_k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}^k (x_{ij}^k) x_{ij}^k \quad (47)$$

Тут для деякої дуги питомий дохід залежить від потоку по цій дузі, встановлюється в залежності від потреби.

Далі розглянемо модель (39), в якій всі  $\alpha_k$  є рівними, а  $\varphi_k$  мають вигляд:

$$\varphi_k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}^k(\bar{x}) x_{ij}^k \quad (48)$$

У цій моделі доходи за деякими дугами залежать від потоків по декількох інших дугах, представляючи умови конкуренції.

Розроблено модель планування із функцією цілі (40), в якій всі  $\alpha_k$  нерівноцінні і пов'язані співвідношенням  $\sum_k \alpha_k = 1$ , а функції  $\varphi_k$  мають вигляд (48). У цьому випадку модель (39) – (45) відноситься до багатокритеріальних задач, які реалізуються шляхом формування ефективних по Парето розв'язків.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання – розвитку і вдосконаленню спеціалізованих багатокритеріальних математичних моделей, методів аналізу і планування процесів, представлених неоднорідними потоками в транспортних та інших мережах, з урахуванням умов невизначеності параметрів систем.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. В дисертаційній роботі запропонована класифікація задач і математичних моделей аналізу і планування неоднорідних потоків, які враховують спеціалізовані вимоги до транспортних мереж і взаємодію окремих складових досліджуваних процесів.
2. Виконано узагальнення принципів рівноваги транспортних потоків Вардропа на випадок неоднорідних потоків в транспортних мережах.
3. Розроблено узагальнені математичні багатокритеріальні моделі для аналізу і планування неоднорідних потоків, що враховують умови невизначеності різних категорій (нечіткість, інтервальні величини).
4. Розроблено уніфікований паралельний синхронний алгоритм аналізу і планування неоднорідних стаціонарних і динамічних потоків в транспортних мережах. На відміну від відомих алгоритмів в пропонуваному уніфікованому паралельному алгоритмі за рахунок синхронізації процесів формування вузлів дерева шляхів в них також одночасно виконуються процедури аналізу можливих значень додаткових, збільшуючих потоків. Додаткова інформація у вузлах дозволяє паралельно (на одній ітерації) виконувати аналіз декількох збільшуючих потоків через мережу.
5. Розроблено модифікації паралельного синхронного алгоритму для багатопродуктових, динамічних потоків, а також для неоднорідних потоків зі структурними вимогами.
6. В дисертації запропонована удосконалена модель оптимального планування поїздок з пересадками з урахуванням неоднорідності вимог пасажирів до якості послуг транспортної мережі. Показано, що використання процедури редукції дозволяє застосовувати методи лінійного програмування для ефективною чисельної реалізації завдань планування поїздок з пересадками.

7. Аналіз моделей планування пасажиропотоків з пересадками дозволив встановити, що введення у моделі для кожної дуги графу окремих обмежень на пропускну здатність по різних типах вагонів, призводить до розділення потоку за категоріями пасажирів, і за допомогою цього можливо мати різні маршрути пересування одиниць потоку, в залежності від категорії, тобто вимог до перевезень.
8. В дисертації розроблені або вдосконалені моделі аналізу і планування багатопродуктових потоків в транспортних мережах в умовах конкуренції перевізників на основі застосування змінних тарифів, а також при обліку додаткових вимог, пов'язаних із заданими наборами індивідуальних властивостей носіїв потоків або ж «продуктів». Досліджено питання впливу на планування неоднорідних транспортних потоків залежностей питомих показників ефективності перевезень від величин потоків в мережі, заданої різним чином, а також багатокритерійний аналіз компромісу декількох перевізників, які обслуговують систему.
9. Встановлено, що використовуючи область ефективних компромісів забезпечується можливість узгодження очікуваних рівнів доходів перевізників, що робить плани перевезень більш стабільним при реалізації.
10. Створено інформаційну технологію для реалізації задач аналізу і планування неоднорідних потоків в транспортних мережах.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

#### ***Статті у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз:***

1. Паник Л.А. О динамических моделях управления неоднородными транспортными сетями / Л.А. Паник // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4(93), 2014. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 58-64. Цитується у базі Index Copernicus.
2. Паник Л.А. О построении обобщенных моделей планирования неоднородных транспортных потоков / В.В. Скалозуб, Л.А. Паник // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5(106), 2016. – Дніпропетровськ, 2016. – С. 94-101. Цитується у базі Index Copernicus.
3. Панік Л.О. Паралельні синхронні алгоритми аналізу та планування неоднорідних потоків у транспортних мережах / В.В. Скалозуб, Л.О. Панік // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5(112), 2017. – Дніпропетровськ, 2017. – С. 183-197. Цитується у базі Index Copernicus.
4. Паник Л.А. Реализация динамических, конкурентных и нечетких моделей планирования многопродуктовых потоков в транспортных сетях / В.В. Скалозуб, Л.А. Паник // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – Днепропетровск, 2018. - № 3(75). – С. 113-127.

#### ***Статті у наукових фахових виданнях:***

5. Паник Л.А. Моделирование и анализ потоковых задач с неоднородными носителями / В.В. Скалозуб, Л.А. Паник // Наука и прогресс транспорта.

Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – Днепропетровск, 2007. - № 19. – С. 134-137.

6. Паник Л.А. Анализ и многокритериальное планирование потоков в транспортных сетях с учетом интервальных неопределенностей / Л.А. Паник // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – Днепропетровск, 2008. - № 24. – С. 167-171.
7. Панік Л.О. Автоматизація планування неоднорідних динамічних потоків в транспортних мережах / Л.О. Панік // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – Днепропетровск, 2011. - № 36. – С. 194-197.
8. Паник Л.А. Развитие многопродуктовых и многокритериальных моделей потоковых задач с учетом специализации носителей потоков / В.В. Скалозуб, Е.С. Блохин, Л.А. Паник // Научно-технический журнал «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті». – Харків, 2011. № 4(89). – С. 7-11.
9. Панік Л.О. Планування поїздок в транспортних системах з пересадками з урахуванням спеціалізації вимог пасажирів / Т.В. Бутько, В.В. Скалозуб, А.В. Прохорченко, Л.А. Панік // Збірник наукових праць Донецького Інституту Залізничного Транспорту (ДонІЗТ). – Донецьк, 2012. № 30. – С. 5-9.
10. Паник Л.А. Моделирование неоднородных транспортных потоков с переменными тарифами / В.В. Скалозуб, Л.А. Паник // Транспортні системи та технології перевезень. Збірник наукових праць дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2015. - № 10. – С. 105-111.

***Матеріали наукових конференцій:***

11. Паник Л.А. Моделирование и экономический анализ потоковых задач с неоднородными носителями / В.В. Скалозуб, Л.А. Паник // Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми економіки транспорту», 23-24 квітня. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 102-103.
12. Паник Л.А. Экономико-математическая и технологическая интерпретация задачи о максимальном потоке для транспортных сетей с накоплением повреждений / Л.А. Паник // Тези доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми економіки транспорту», – Дніпропетровськ, 2009.
13. Паник Л.А. Двухкритериальный анализ специализированных потоковых моделей задач планирования перевозок / Л.А. Паник // III Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании». 2009 р., ДНУЗТ, г. Дніпропетровськ.
14. Паник Л.А. К вопросу оценки эффективности динамических транспортных потоков / Л.А. Паник // Тези доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми економіки транспорту», – Дніпропетровськ, 2010.
15. Паник Л.А. Автоматизация планирования неоднородных динамических потоков в транспортных сетях / В.В. Скалозуб, Л.А. Паник // IV

- Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании». 2010 р., ДНУЗТ, г. Дніпропетровськ.
16. Паник Л.А. Автоматизация анализа неоднородных транспортных потоков с использованием клеточных автоматов / Л.А. Паник // V Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании». 12-13 мая 2011 р., ДНУЗТ, г. Дніпропетровськ.
  17. Паник Л.А. К вопросу развития многопродуктовых и многокритериальных моделей потоковых задач с учетом специализации носителей потока / Л.А. Паник // III Международная научно-практическая конференция: «Интеграция Украины в международную транспортную систему», ДНУЗТ, ноябрь 2011 года, г. Днепрпетровск.
  18. Паник Л.А. О реализации потоковых задач с неоднородными носителями клеточными автоматами / Л.А. Паник, М.В. Скалозуб // V Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании». 5-6 апреля 2012 р., ДНУЗТ, г. Дніпропетровськ.
  19. Панік Л.О. Економіко-математичне моделювання пасажиропотоків з урахуванням пересадок / Л.О. Панік // Тези доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми економіки транспорту», – Дніпропетровськ, 2012.
  20. Паник Л.А. Многокритериальные динамические модели потоковых задач с неоднородными носителями для интеллектуальных систем транспорта / В.В. Скалозуб, Л.А. Паник, М.В. Скалозуб // 73 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». 23.05-24.05.2013 р., ДНУЗТ.
  21. Паник Л.А. Динамическое планирование затрат на пассажирские перевозки с учетом пересадок на разные виды транспорта / Л.А. Паник // XII Міжнародна наукова конференція «Проблеми економіки транспорту». 24.04-25.04.2014 р., ДНУЗТ.
  22. Паник Л.А. О динамических моделях управления неоднородными транспортными сетями / Л.А. Паник // 74 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». 15.05-16.05.2014 р., ДНУЗТ.
  23. Паник Л.А. Развитие моделей динамических потоковых задачи с неоднородными носителями для формирования интеллектуальных систем транспорта / В.В. Скалозуб, Л.А. Паник, М.В. Скалозуб // III Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы развития интеллектуальных систем транспорта». 27.01-31.01.2014 р., ДНУЗТ.
  24. Паник Л.А. Модель для оценки затрат на поездки на поездки с пересадками с использованием динамических потоковых задач / Л.А. Паник // XIII Міжнародна наукова конференція «Проблеми економіки транспорту». 23.04-24.04.2015 р., ДНУЗТ.
  25. Панік Л.О. Розвиток багатокритеріальних моделей потокових задач у сфері економіки транспорту / В.В. Скалозуб, Л.О. Панік // XIII Міжнародна

- наукова конференція «Проблеми економіки транспорту». 23.04-24.04.2015 р., ДНУЗТ.
26. Паник Л.А. Планирование многопродуктовых транспортных потоков при переменных тарифах / В.В. Скалозуб, Л.А. Паник, Б.Б. Белый // IX Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании». 16-17 декабря 2015 р., ДНУЗТ, г. Дніпропетровськ.
27. Панік Л.О. Про застосування узагальнених моделей планування неоднорідних транспортних потоків / В.В. Скалозуб, Л.О. Панік // X Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании». 14-15 декабря 2016 р., ДНУЗТ, г. Дніпропетровськ.
28. Паник Л.А. Математические модели экономических принципов равновесия для неоднородных транспортных потоков / Л.А. Паник // Тези доповідей XV міжнародної наукової конференції «Проблеми економіки транспорту» - 20.04.17-21.04.17 р., ДНУЗТ.
29. Панік Л.О. Багатокритеріальні моделі планування неоднорідних транспортних потоків / Л.О. Панік // XI Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании». 13-14 декабря 2017 р., ДНУЗТ, г. Дніпропетровськ.
30. Панік Л.О. Розподіл неоднорідних потоків у транспортних мережах на основі динамічних, нечітких та конкурентних моделей планування / В.В. Скалозуб, Л.О. Панік // 78 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». 17.05-18.05.2018 р., ДНУЗТ.
31. Панік Л.О. Паралельні уніфіковані алгоритми оптимального планування неоднорідних динамічних, нечітких і конкурентних процесів у транспортних мережах / Л.О. Панік // XII Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании». 12-13 декабря 2018 р., ДНУЗТ, м. Дніпро.

**Авторські свідоцтва:**

32. Авторське свідоцтво на твір № 85769 «Паралельні уніфіковані алгоритми оптимального планування неоднорідних динамічних, нечітких і конкурентних процесів у транспортних мережах».

**АНОТАЦІЯ**

**Панік Л. О. Спеціалізовані багатокритеріальні моделі аналізу та планування неоднорідних потоків у транспортних мережах.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки). – Національна металургійна академія України, Дніпро, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання – розвитку і вдосконаленню спеціалізованих



багатокритеріальних математичних моделей, методів аналізу і планування процесів, представлених неоднорідними потоками в транспортних та інших мережах, з урахуванням умов невизначеності параметрів систем.

В роботі вперше запропоновано класифікацію задач і математичних моделей аналізу і планування неоднорідних потоків, а також розроблено уніфікований паралельний синхронний алгоритм аналізу і планування неоднорідних, стаціонарних і динамічних потоків в транспортних мережах. Удосконалено спеціалізовані моделі аналізу і планування стаціонарних, неоднорідних, нечітких і динамічних транспортних потоків, які враховують взаємодію транспортних потоків, варіативність вимог пасажирів, застосування змінних тарифів в умовах конкуренції. Розроблено уніфіковану процедуру планування нечітких багатопродуктових, динамічних і конкурентних потоків в транспортних і мережах інформаційних систем на основі створених паралельних алгоритмів. В роботі також отримали розвиток модель економічної рівноваги Вардропа для задач планування неоднорідних транспортних потоків.

Ключові слова: транспортні мережі, моделі планування, неоднорідні нечіткі і динамічні потоки, багатокритеріальний аналіз, уніфіковані процедури, паралельні алгоритми.

## ABSTRACT

Panik L. A. Specialized multicriteria models of analysis and planning of heterogeneous flows in transport networks. - On the rights of the manuscript.

The dissertation for candidate degree in engineering sciences in specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods (technical science). – National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro, 2019.

Dissertation focuses on relevant applied scientific problem of development and improvement specialized mathematical multicriteria models, analysis and process planning methods, which are presented by heterogeneous flows in transport and other networks with uncertainty.

The classification of tasks and mathematical models for analysis and planning heterogeneous flows, which consider specialized demands to transport networks and interactions of individual processes components, was proposed for the first time. Unified parallel synchronous algorithm of analysis and planning stationary and dynamic flows in transport networks was developed.

This algorithm, like the Edmonds-Karp algorithm (A-EK), uses a wide search strategy with determining possible flow paths through a network with arcs (edges), which bandwidth capacities are known at a certain point in the residual network. As well as in the implementation of the Ford-Fulkerson method, in A-EK method for iteration the shortest path in the number of edges is chosen in the constructed tree of possible paths and an additional increasing flow is passed along it. In A-EK one of them is selected for further analysis on iteration. The reason is that the primary formation of the tree determines only the length of the paths.

In contrast to A-EK and similar algorithms, the proposed unified parallel synchronous algorithm the possible values of additional, increasing flows, that can be propagated (by parallel invocation of the corresponding nodal procedures) by the following defined edges of the residual network, are analyzed simultaneously in nodal procedures by synchronizing the processes of forming tree. In this case, it becomes a possibility to perform the analysis of several incremental flows through the network in parallel way (on iteration).

Another significant advantage of the algorithm is its ability to estimate the maximum multiproduct flows, with minor "technical" changes in the algorithm structure, that are necessary to ensure the typical processing of the several multiproduct flow components through the network.

Also in the dissertation the multicriteria models of traffic flow planning were improved considering the conditions of interval uncertainty, specialized analysis and planning models of stationary nonuniform traffic flows, which allow the interaction of traffic flows, the variability of passenger requirements and the usage of variable tariffs in a competitive environment. A unified procedure for planning uncertain multiproduct, dynamic and competitive flows in the transport networks of information systems based on the parallel algorithms has been developed. In this work the Wardrop economic equilibrium model for planning nonuniform traffic flows has been developed. In this model two principles are postulated.

1. Independent choice of the route corresponding to the minimum transport costs of each of them (the first Wardrop principle, W1).

2. The choice of routes for users to follow is based on the minimization of total transportation costs in the network (the second Wardrop principle, W2).

These principles were summarized to be applied to nonuniform traffic flows when the network is used by several different categories of transport.

And also multicriteria models of analysis and planning were developed for the interaction of heterogeneous, stationary, uncertain and dynamic flows in networks that consider the competition conditions and specialized requirements for the components of transport processes.

The results of the work were used in the creation of software ACS for freight transportation of Ukrainian Railways and in training courses for bachelor and master degrees.

Keywords: transport networks, planning models, heterogeneous uncertain and dynamic flows, multicriteria analysis, unified procedures, parallel algorithms.