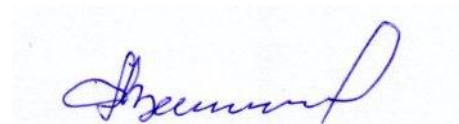


**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ І ГЛОБАЛЬНОГО
ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ**

ВАСЯНІН ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 519.854:004.9:004.422.63

**МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОПРОДУКТОВИХ
КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ З ДИСКРЕТНИМИ ПОТОКАМИ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України.

**Науковий
консультант:**

член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор
Трофимчук Олександр Миколайович,
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного
простору НАН України, директор

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Гуляницький Леонід Федорович,
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України,
завідувач відділу методів комбінаторної оптимізації та
інтелектуальних інформаційних технологій

доктор технічних наук, професор
Данилов Валерій Якович,
Інститут прикладного системного аналізу Національного
технічного університету України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри математичних методів системного
аналізу

доктор технічних наук, професор
Мокін Віталій Борисович,
Вінницький національний технічний університет МОН
України, завідувач кафедри системного аналізу,
комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки

Захист відбудеться 30 червня 2017 року о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.255.01 в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України за адресою: 03186, Київ 186, Чоколівський бульвар, 13, кім. № 601. Телефон: (044) 245-87-97.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України за адресою: 03186, Київ 186, Чоколівський бульвар, 13

Автореферат розісланий « 27 » травня 2017

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.255.01,
кандидат технічних наук



О.Г. Лебідь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одними із пріоритетних галузей розвитку економіки України визначено транспорт і зв'язок, підвищення ефективності функціонування яких вимагає створення прикладного математичного забезпечення для вирішення завдань оптимізації транспортних процесів та інформаційно-аналітичних систем підтримки прийняття рішень (ІАС ППР) для управління обробкою і розподілом транспортних потоків. У зв'язку з важливістю даної проблематики для інтенсифікації ринкових перетворень в Україні і, зокрема, у сфері перевезень дрібнопартійних вантажів, в дисертаційній роботі досліджуються задачі математичного моделювання та проектування багатопродуктових комунікаційних мереж з дискретними потоками дрібнопартійних кореспонденцій. Територіально-розподілені комунікаційні мережі, які вже існують або ще проектується, як правило, мають багаторівневу структуру, де кількість рівнів ієрархії визначається адміністративним поділом території, підпорядкуванням органів територіального управління, прийнятою технологією обробки і розподілу потоків вантажів та інформації тощо. В більшості випадків вони складаються з децентралізованої розподіленої мережі верхнього рівня — магістральної, і низових мереж — зональних і внутрішніх.

Проектування багаторівневих мереж повинно відображати характерну для складних систем неможливість повної централізації в одній ланці обробки інформації та прийняття рішень з управління процесами їх розвитку і функціонування. Це призводить до необхідності формування ієрархічної структури системи автоматизованого управління ресурсами і розподілом потоків в мережі. Проектування ієрархічних мережових структур зазвичай має спадний характер. На верхньому рівні вирішуються задачі структурного синтезу і перспективного розвитку мережі, для яких використовуються крупно-агреговані моделі розподілу потоків. На нижчих рівнях проектування деталізація об'єктів повинна збільшуватися з метою найбільш адекватного опису їх функціонування і прийняття раціональних рішень. Це обумовлює ітераційно-циклічний характер процесів проектування і управління, що включають процедури синтезу та аналізу можливих рішень на всіх рівнях мережі. Оскільки рішення приймаються в умовах невизначеності, пов'язаних з неповнотою наявної інформації і коливаннями потоків у часі, а також з огрубінням математичних моделей, необхідно розділяти рішення на перспективні, поточні та оперативні. У зв'язку з цим, представляється актуальною розробка комплексу взаємопов'язаних багаторівневих моделей перспективного розвитку, поточного планування і оперативного управління, що відображають ієрархію мережі і відповідну їй ступінь агрегування показників.

У теорії проектування великомасштабних мережових структур, вирішення завдань структурного аналізу, синтезу та оптимізації, управління розподілом потоків у багатопродуктових мережах, наукою накопичено значний теоретичний матеріал і практичний досвід. Причому вагомий внесок у розвиток моделей і методів управління мережевими ресурсами зробили зарубіжні та вітчизняні вчені, серед яких, в першу чергу, слід виділити таких як Green P., Lucky R., Kleinrock L., Gallager R., Ford L.R., Fulkerson D.R., Hu T., Tomlin J., Assad A.A., Kennington J.L., Fratta L., Gerla M., Castro J., Nabona N., Frangioni A., Gratzner F.J., Steiglitz K., Takahara Y., Ahuja R.K., Magnanti T.L., Orlin J.B., Steenbrink P.A., Vutukury S., Моисеев М.М., Краснощеков П.С., Вішневський В.М., Оліфер В.Г., Оліфер Н.О., Малащенко Ю.Є., Новікова Н.М., Бусленко М.П., Гнеденко Б.В., Глушков В.М., Михалевич В.С., Сер-

гієнко І.В., Зайченко Ю.П. і багато інших. Як правило, в роботах цих авторів розглядаються детерміновані моделі та моделі, засновані на математичних методах теорій масового обслуговування і випадкових марковських процесів. При цьому фактично передбачається або детермінованість, або стаціонарність потоків на окремих проміжках часу розподілу ресурсів. Реальні потоки цих властивостей не мають. Крім того, в більшості випадків, потоки і параметри елементів мережі є дискретними величинами. Математичний апарат для моделювання і аналізу функціонування багатопродуктових мереж з дискретними потоками розвинений недостатньо. Необхідна розробка математичних моделей і методів вирішення, які враховують немарковський характер випадкових процесів, що протікають в багатопродуктових мережах, неоднорідність, нестационарність і дискретність потоків, що розподіляються. В більшості з відомих робіт, безпосередньо присвячених розподілу багатопродуктових потоків і пов'язаних із завданнями аналізу і синтезу багатопродуктових мереж, пропонуються лінійні і нелінійні моделі і відповідні методи вирішення, в основному для безперервних змінних і параметрів елементів мережі. Крім того, дані моделі є, як правило, досить грубими математичними описами функціонування складної мережевої структури і не враховують цілий ряд фізичних характеристик і параметрів, які властиві реальним системам (тобто є сильно агрегованими).

Разом із тим, у випадку розподілу дрібнопартійних потоків у багатопродуктової мережі, сама постановка загальної проблеми і окремих завдань управління мережевими ресурсами істотно змінюється через необхідність урахування низки загальних, одночасно діючих, факторів. До них, в першу чергу, слід віднести: організацію процесів сортування дрібнопартійних потоків кореспонденцій у вузлах мережі, які безпосередньо пов'язані з їх транспортуванням у вузли призначення; обмеження на час доставки кореспонденцій кінцевим одержувачам; обмеження на пропускну спроможність транспортних ліній зв'язку (вантажопідйомність транспортних засобів, пропускну здатність каналів зв'язку); обмеження на обсяги обробки транспортованих одиниць (транспортних блоків, контейнерів) у проміжних пунктах ліній зв'язку; нелінійність приведених (експлуатаційних і капітальних) витрат на обробку і транспортування потоків.

Тому актуальною залишається проблема розробки методології моделювання та проектування багатопродуктових комунікаційних мереж, що узагальнює отримані раніше результати і дозволяє використовувати моделі різного ступеня агрегування і для всіх рівнів ієрархії успішно вирішувати практичні задачі перспективного розвитку, поточного планування і оперативного управління для мереж великої розмірності з дискретними потоками і дискретними параметрами елементів мережі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Розроблена в дисертації методологія математичного моделювання функціонування і розвитку багатопродуктових мереж з дискретними потоками є подальшим продовженням досліджень, розпочатих автором у кандидатській дисертації. Всі математичні моделі, методи та алгоритми розв'язання задач, розглянутих у кандидатській дисертації отримали подальший розвиток і для них досягнуті нові наукові результати. Результати, включені в дисертаційну роботу, отримані при виконанні науково-дослідних робіт по створенню інструментарію та інформаційної платформи (порталу) для автоматизації процесів прийняття рішень в управлінні розвитком і функціонуванням багатопродуктових комунікаційних мереж з дискретними потоками. Роботи проводились Інститутом телекомунікацій і глобального інформаційного

простору НАН України в рамках наукових робіт за відомчою тематикою «Розробка індикативних методів моделювання та моніторингу процесів технологічного розвитку в Україні» (2013-2015 рр., № ДР 0112U007445), «Розробка нових програмних засобів і технологій пошуку, впорядкування, обробки та представлення інформації у інформаційному просторі» (2014-2016 рр., № ДР 0114U000798), «Розробка програмно-технічних комплексів взаємодії новітніх телекомунікаційних технологій з мережами загального користування» (2014-2016 рр., № ДР 0114U004983), одним із виконавців яких був здобувач.

Мета та завдання дослідження. Підвищення ефективності функціонування багатопродуктових транспортних мереж за рахунок зниження дефіцитних матеріальних, сировинних, енергетичних, фінансових і трудових витрат на основі запропонованої методології моделювання та проектування процесів обробки і розподілу дрібнопартійних дискретних потоків і комплексу заходів інформаційно-аналітичного забезпечення та автоматизації процедур прийняття рішень в управлінні транспортними потоками. Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі були поставлені такі основні задачі.

1. Всебічно досліджувати і визначити структуру і властивості багатопродуктових мереж з дрібнопартійними потоками, критерії та вартісні функції обробки і розподілу потоків.

2. Провести аналіз сучасного стану та проблем організації розподілу дрібнопартійних потоків у транспортних системах і мережах передачі даних.

3. Розробити теоретико-методологічні основи побудови багаторівневої структури багатопродуктової мережі і її математичну модель. Визначити принципи і концепції обробки і розподілу дрібнопартійних потоків у багаторівневій (зонально-вузловій) структурі багатопродуктової мережі.

4. Провести огляд і аналіз розвитку теорії та практики проектування територіально-розподілених комунікаційних мереж із безперервними і дискретними потоками, математичних моделей і методів вирішення задач обробки, розподілу і маршрутизації потоків на всіх рівнях ієрархічної мережі. Обґрунтувати вибір наближених і евристичних методів для розв'язання задач моделювання і проектування багатопродуктової мережі з дрібнопартійними дискретними потоками.

5. Провести огляд і аналіз сучасних інформаційних платформ та інструментарію для побудови ІАС ППР в управлінні складними територіально-розподіленими мережами. Визначити основні задачі ІАС ППР і розробити методологію проектування структури системи управління процесами обробки і розподілу дрібнопартійних дискретних потоків у багатопродуктових комунікаційних мережах.

6. Провести огляд і аналіз основних моделей, методів і алгоритмів для розв'язання окремих задач поточного планування, побудови найкоротших шляхів і кістякових дерев.

7. Розробити методологію математичного моделювання процесів обробки та розподілу дрібнопартійних дискретних потоків на магістральному, зональному і внутрішньому рівнях багатопродуктової мережі для періодів поточного планування функціонування мережі. Розробити математичні моделі, методи та алгоритми розв'язання задач поточного планування. Експериментально дослідити розв'язки задач на чутливість, провести параметричний і постоптимальний числовий аналіз розв'язків, визначити часову складність алгоритмів розв'язування задач.

8. Визначити основні завдання перспективного розвитку та оперативного управління на магістральному рівні мережі. Показати взаємозв'язок їх вирішення з завданнями поточного планування у випадках граничного коливання навантажень, перевантажень, відмов вузлів і ліній зв'язку та виникнення інших позаштатних ситуацій. Розробити методику та схему прийняття рішень щодо стабілізації роботи магістральної мережі в штатному режимі.

9. Розробити методику розв'язання комплексу задач поточного планування в середовищі ІАС ППР і комп'ютерні програми для розв'язання задач вибору структури магістральної мережі і схем сортування, розподілу і маршрутизації потоків. Дослідити розроблені методи, алгоритми та програми на числових прикладах, провести аналіз результатів цифрового моделювання розв'язання задач на мережах великої розмірності.

Об'єкт дослідження — процеси обробки і розподілу дрібнопартійних дискретних потоків у багатопродуктових мережах.

Предмет дослідження — методологія математичного моделювання та проектування багатопродуктових комунікаційних мереж з дрібнопартійними дискретними потоками, що включає понятійний базис, концепції, принципи, математичні моделі, теоретичні методи, алгоритми, технології, методики, схеми і сценарії, націлені на ефективне використання ресурсного потенціалу мереж при заданих обмеженнях.

Методи дослідження. Основою наукових досліджень в дисертаційній роботі були загальна методологія системного аналізу і моделювання складних систем, теорія розподілу потоків у багатопродуктових мережах, методи дослідження операцій і математичного програмування, комбінаторний і евристичний аналіз, теорія графів, теорія множин, методологія побудови інформаційно-аналітичних систем підтримки прийняття рішень.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі одержані такі основні результати, що мають наукову новизну:

1. Вперше запропоновано теоретико-методологічні основи побудови розподіленої ієрархічної багатопродуктової комунікаційної мережі з дрібнопартійними дискретними потоками, що включають: понятійний базис; принципи, концепції і критерії обробки і розподілу дрібнопартійних потоків, методологію синтезу та аналізу багаторівневої структури мережі. На відміну від існуючих підходів, запропонована методологія дозволяє логічно пов'язати процеси обробки дрібнопартійних потоків у вузлах мережі з їх подальшим розподілом по мережі і доставкою одержувачам та підвищити економічну ефективність функціонування і розвитку транспортної системи в цілому за рахунок зниження приведених витрат як у вузлах, так і на транспортних магістралях мережі, при заданих обмеженнях.

2. Вперше для управління нестаціонарними процесами обробки і розподілу дрібнопартійних дискретних потоків у багатопродуктовій комунікаційній мережі запропоновані засновані на комплексному розв'язанні задач поточного планування, оперативного управління і перспективного розвитку концепція і методологія побудови багаторівневої ІАС ППР, яка функціонує в масштабі реального часу, що відкриває нові напрямки для створення інтелектуальних методів і методик в управлінні складними процесами і об'єктами у транспортних системах.

3. Вдосконалено типові математичні моделі задач побудови постачальних, складальних і комбінованих маршрутів транспортних засобів, які відрізняються від відомих моделей більшою адекватністю реальним процесам перевезення дрібнопартійних вантажів у внутрішній зоні магістрального вузла.

4. Отримала подальший розвиток раніше запропонована автором математична модель задачі упаковки дрібнопартійних кореспонденцій у транспортні блоки, в якій враховуються нові обмеження на кількість об'єднань кореспонденцій, час їх доставки кінцевому одержувачу, пропускні спроможності дуг і середній час затримки потоків у мережі. Вперше доведено NP-складність задачі, розроблені евристичні методи та алгоритми розв'язання задачі і доведена їх збіжність до локального оптимуму. Отримано оцінки часової складності алгоритмів. Доведено, що розв'язання задачі упаковки з додатковими обмеженнями на пропускні спроможності дуг і середній час затримки потоків у мережі можна звести до послідовного розв'язання задачі упаковки без зазначених обмежень та задачі вибору пропускних спроможностей дуг.

5. Вперше запропоновано евристичний метод розв'язання задачі вибору ієрархічної структури багатопродуктової мережі у відповідності з принципами, концепціями і критеріями, закладеними в основу обробки і розподілу дрібнопартійних дискретних потоків, який відрізняється від існуючих своєю оригінальністю і дозволяє проектувальнику мережі проводити числове моделювання, аналіз і вибір структури мережі при зміні різних початкових даних, параметрів і обмежень в інтерактивному режимі.

6. Отримала подальший розвиток раніше запропонована автором математична модель задачі розподілу і маршрутизації потоків транспортних блоків у багатопродуктовій магістральній мережі. Розроблено сукупність нових методів і алгоритмів для розв'язання задачі при обмеженнях на пропускні спроможності вузлів і транспортних ліній зв'язку, обсяги обробки транспортних блоків у транзитних вузлах ліній зв'язку, середній час затримки потоків у мережі та час доставки дрібнопартійних кореспонденцій одержувачу. Отримано асимптотичні оцінки часової складності алгоритмів. Запропоновані методи та алгоритми, на відміну від відомих підходів до розв'язання задач розподілу цілочислових потоків у багатопродуктовій мережі, спираються на евристичні прийоми розв'язання системи багатовимірних задач про ранець зі зв'язуючими обмеженнями і на ефективні способи представлення структур даних, що генеруються в процесі вирішення задачі, та дозволяють проектувати нові маршрути транспортування для розгалужених і нерозгалужених потоків.

7. Вперше всебічно досліджена група задач поточного планування, теоретично і експериментально обґрунтовано їх використання як методологічної основи — ядра для розв'язання задач перспективного розвитку багатопродуктової мережі і оперативного управління процесами обробки і транспортування потоків.

8. Для окремих підзадач, що виникають при розв'язанні основних задач поточного планування, розроблений новий лексикографічний двокритеріальний алгоритм побудови найкоротших шляхів, а також запропонована ефективна реалізація алгоритму Краскала для знаходження мінімального кістякового лісу графа або мережі. У порівнянні з алгоритмом Флойда-Уоршелла, модифікованим для знаходження двокритеріальних найкоротших шляхів між усіма n вузлами мережі з часової складністю $O(n^3)$, запропонований алгоритм завжди має меншу трудомісткість і зі збільшенням щільності мережі швидше першого в кілька разів. Часова складність вдосконаленої версії алгоритму Краскала практично доведена до порядку $O(e)$, де e — кількість ребер графа. Отримано оцінку порівняльності швидкодії запропонованого алгоритму з алгоритмом Прима, з якої випливає, що для зв'язних графів запропонований алгоритм краще алгоритму Прима при $e \leq 0,27n^2$, де n — кількість вершин графа.

Практичне значення одержаних результатів. Практична значущість одержаних у дисертаційній роботі результатів полягає в доведенні їх до рівня практичної реалізації — створення макетного зразка комплексу програм ІАС ППР для управління процесами обробки і транспортування дрібнопартійних вантажів у багато-продуктовій транспортній мережі в реальному часі. Окремі результати дисертації можуть з успіхом застосовуватися і до інших мережевих структур — мереж передачі даних, мереж мобільного, поштового зв'язку та ін. Так, наприклад, схожа технологія віртуальних контейнерів, при якій в один віртуальний контейнер можуть об'єднуватися повідомлення з різними адресами призначення, застосовується при побудові перспективних великомасштабних загальнонаціональних і інтернаціональних мереж передачі даних на основі надширокосмугових каналів і схем типу опорної мережі. Тому математичні моделі задач обробки та транспортування дрібнопартійних потоків кореспонденцій, а також запропоновані методи і алгоритми їх розв'язання можуть бути використані для проектування магістральних мереж передачі даних з технологією віртуальних контейнерів.

Впровадження результатів дисертаційної роботи в діяльність транспортних підприємств, що займаються перевезенням різної дрібнопартійної продукції, забезпечує можливість науково обґрунтованого вирішення важливих для транспортних систем завдань: розрахувати основні техніко-експлуатаційні та економічні показники функціонування транспортної мережі; підвищити ефективність функціонування мережі в реальному масштабі часу за рахунок оптимізації схем обробки і перевезення вантажів та зниження приведених витрат на її створення і експлуатацію; оперативно управляти процесами обробки і перевезення вантажів у випадках виникнення позаштатних ситуацій за рахунок своєчасного їх виявлення і перерозподілу потоків; планувати поетапний розвиток мережі з урахуванням комерційного ризику вкладення інвестицій в умовах нестабільності економіки і девальвації ресурсів; знизити витрати на проектування мережі і з мінімальними витратами праці моделювати різні варіанти транспортної мережі, в інтерактивному режимі оптимізації змінюючи топологію, ієрархічну структуру, потоки, маршрути транспортних засобів, різні параметри і обмеження транспортної моделі і з комплексу отриманих результатів вибрати найкращий варіант з урахуванням обраної функції мети і прийнятих обмежень. Крім того, одержані результати роботи можуть бути використані в навчальному процесі при підготовці фахівців в галузі розробки і проектування складних розподілених багатопродуктових мереж з дискретними потоками.

Впровадження результатів. Результати дисертаційних досліджень використані і впроваджені у декількох приватних міжнародних транспортних компаніях та у навчальному процесі факультету "Інженерії та транспорту" Академії транспорту, інформатики і комунікацій Республіки Молдова та факультету інформаційно-комп'ютерних технологій Житомирського державного технологічного університету, що підтверджується відповідними актами, які є в дисертаційній роботі.

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати, викладені в дисертації, отримані автором особисто. В наукових роботах, опублікованих у співавторстві [2, 3, 5-10, 12, 15, 16, 18, 19, 21], автору дисертації належить: визначення понятійного базису, принципів, концепцій і критеріїв обробки і розподілу дрібнопартійних потоків, методологія синтезу та аналізу багаторівневої структури мережі та ІАС ППР, формулювання математичних постановок, доказі тверджень, розробка методів, алгоритмів, абстрактних структур даних та комп'ютерних технологій розв'язання поставлених задач.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися і пройшли апробацію на: VII та VIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Інформаційно-комп'ютерні технології» (Житомир, 2014, 2016); Conferințe Internaționale «Modelare matematică, optimizare și tehnologii informaționale» (Chișinău, 2014, 2016); Conferinței Internaționale «Sisteme de transport și logistică» (Chișinău, 2013, 2015); 14 Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях» (Київ, Пуща-Водиця, 2015); V and VI International Conferences on Optimization Methods and Applications «Optimization and applications» — OPTIMA-2014, 2015, (Petrovac, Montenegro, 2014, 2015); VI Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Інформатика та системні науки» — ICH-2015, (Полтава, 2015); VIII Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование развивающейся экономики, экологии и технологий (ЭКОМОД-2014)», посвященной 80-летию академика А.А. Петрова и 100-летию академика Г.С. Поспелова (Москва, ВЦ РАН, 2014); International Scientific Practical Conferences «Information Control Systems and Technologies» (ICST-ODESSA-2013-2014), (Одесса, 2013, 2014); 15-th and 16-th International conference on System Analysis and Information Technologies (SAIT2013, SAIT2014), (Киев, 2013, 2014); XI Міжнародній науково-практичній конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (MPZIS-2013), (Дніпропетровськ 2013); научной конференции «Информационные технологии в управлении сложными системами – 2013» (Днепропетровск, 2013); Міжнародній науковій конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту» (Євпаторія, 2008).

Крім того, результати дисертації доповідалися на наукових семінарах в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України та Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України.

Публікації. Всього за тематикою дисертації опубліковано 51 наукову роботу, в тому числі: 21 стаття з переліку наукових фахових видань України (з них 5 у виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз); 2 статті у зарубіжних наукових періодичних виданнях; 23 у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій (з них 9 — у зарубіжних виданнях); отримано 5 свідоцтв про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів і висновків, викладених на 326 сторінках основного тексту та 20 сторінках рисунків та таблиць і включає вісім додатків на 105 сторінках. Всього робота містить 66 рисунків, 31 таблицю і список літератури з 493 найменувань на 46 сторінках. Загальний обсяг дисертації займає 497 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показано актуальність дисертаційного дослідження, сформульовані його мета і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показано наукову новизну, теоретичне та практичне значення одержаних результатів. Наведено відомості про впровадження і апробацію одержаних результатів та публікації.

У першому розділі дисертації розглядаються методологічні підходи до побудови багатопродуктових ієрархічних комунікаційних мереж та визначено основні завдання обробки і розподілу дрібнопартійних дискретних потоків кореспонденцій.

Наводяться деякі аспекти створення інфраструктури просторових даних (ІПД), геоінформаційної системи (ГІС) і спеціального математичного забезпечення для транспортних мереж і мереж передачі даних. На відміну від існуючих підходів, запропонована методологія ґрунтується на комплексному вирішенні завдань перспективного, поточного та оперативного планування і управління та дозволяє логічно пов'язати процеси обробки потоків у вузлах мережі з їх подальшим розподілом на мережі. Розглянуто ієрархічна зонально-вузлова структура багатопродуктової мережі, принципи і технологія організації сортування і транспортування дрібнопартійних кореспонденцій і математична модель мережі. Виділено три рівні ієрархії — магістральний, зональний і внутрішній і чотири типи вузлів — вузли першого, другого, третього і четвертого типів (рис. 1). Для кожного рівня ієрархії визначені три групи задач: перспективного розвитку, поточного планування і оперативного управління.

Визначено основні задачі поточного планування на магістральному рівні — задача упаковки дрібнопартійних кореспонденцій у транспортні блоки і задача розподілу і

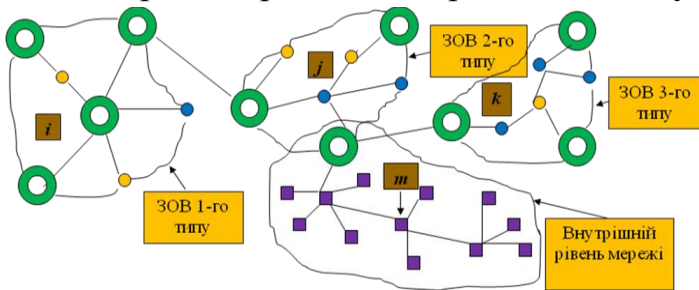


Рис. 1. i, j, k, m — відповідно вузли першого, другого, третього і четвертого типу, ЗОВ — зона обслуговування вузла

маршрутизації транспортних блоків. Показано, що ці задачі становлять методологічну основу — ядро для розв'язання задач оперативного управління процесами обробки і розподілу потоків, а також для розв'язання задач перспективного розвитку мережі.

При розв'язанні задач передбачається, що відомі географічні координати всіх вузлів, тобто то-

пологія мережі задана. Вузли мережі відповідають пунктам сортування, відправлення, призначення і перевантаження потоків, а дуги — ділянкам доріг для транспортних мереж (ТМ) або каналам зв'язку для мереж передачі даних (МПД), що зв'язує вузли мережі. У багатопродуктової мережі кожен вузол може обмінюватися кореспонденціями (продуктами, вимогами) з усіма іншими вузлами. Кореспонденція характеризується вузлом-джерелом, вузлом-стоком і величиною, яка для транспортних мереж задається кількістю тарно-штучних вантажів в упаковці уніфікованого розміру, а для мереж передачі даних — числом біт, байт, мегабайт і т.д. в переданих даних (повідомленнях). Кореспонденції задані матрицею дрібнопартійних дискретних потоків, у якій рядки відповідають вузлам-джерелам, стовпці — вузлам-стокам, а елементи матриці визначають величину кореспонденцій. У магістральній мережі всі кореспонденції повинні транспортуватися у транспортних засобах або передаватися по каналах зв'язку у транспортних блоках заданого розміру (ємності, обсягу). Розмір транспортного блоку вимірюється кількістю одиниць кореспонденцій, що в нього вміщаються. Всі магістральні вузли є сортувальними центрами, в яких кореспонденції спочатку сортуються за адресами (вузлами) призначення, а потім упаковуються у транспортні блоки. Оскільки величини більшості кореспонденцій значно менше розміру транспортного блоку, вони при сортуванні можуть кілька разів і у різних вузлах об'єднуватися (упаковуватися) з кореспонденціями, що мають інші адреси призначення. При такому об'єднанні кореспонденцій у вузлах мережі зменшується кількість напрямків їх сортування і кількість транспортних блоків, необхідних для їх упакування, але в окремих вузлах з'являються додаткові обсяги сортування

кореспонденцій, які не досягли адреси свого призначення. Крім того, збільшується час на доставку одержувачеві тих кореспонденцій, які проходять додаткове сортування у транзитних вузлах проходження. Кожен магістральний вузол має внутрішню зону обслуговування, в яку входять тільки вузли четвертого типу. Вузли четвертого типу явно не входять в математичні моделі задач поточного планування на магістральному рівні. Передбачається, що вихідні та вхідні потоки цих вузлів обробляються в головному вузлі (першого, другого або третього типу) внутрішньої мережі. Вихідні потоки у вузлах четвертого типу не сортуються за адресами призначення, а доставляються у головний вузол внутрішньої мережі та сортуються разом з вихідними потоками із головного вузла. Таким чином, приймається, що потоки вузлів четвертого типу враховані в потоках між вузлами магістральної мережі. На магістральному рівні вузли першого типу можуть відправляти транспортні блоки у будь-які інші вузли першого типу, а також у вузли другого і третього типу, що знаходяться у магістральній зоні їх обслуговування. Вузли другого і третього типу можуть відправляти транспортні блоки тільки в найближчі вузли першого типу і у вузли другого і третього типу, що знаходяться у їх магістральній зоні обслуговування. Вхідні потоки в транспортних блоках у вузли другого і третього типу можуть надходити тільки від вузлів, розташованих у магістральній зоні обслуговування цих вузлів. У вузлах другого і третього типу кількість магістральних напрямків сортування дрібнопартійних потоків обмежена зоною обслуговування вузла, в той час як вузли першого типу можуть сортувати дрібнопартійні потоки в усі магістральні вузли в зоні свого обслуговування і в усі інші вузли першого типу у магістральній мережі. Вузли другого і третього типу відрізняються функціональними можливостями, рівнем технічної оснащеності, числом обслуговуючого персоналу та ін. В цих вузлах заборонено сортування транзитних дрібнопартійних потоків (крім потоків між вузлами четвертого типу у внутрішній мережі). У вузлах третього типу, на відміну від вузлів другого типу, заборонено обробку транзитних потоків транспортних блоків. Типи вузлів і зони їх обслуговування можуть бути задані проектувальником мережі або визначатися при розв'язанні задачі вибору структури мережі. В останньому випадку за критерієм мінімуму приведених витрат на функціонування мережі визначається склад і кількість вузлів кожного типу в автоматизованому режимі.

Кількість магістральних і зональних напрямків сортування для вузлів першого, другого і третього типу визначається після розв'язання задачі упаковки і формування потоків транспортних блоків, розглянутої в третьому розділі. Для сортування дрібнопартійних кореспонденцій в транспортних мережах використовуються високопродуктивні поточкові системи автоматизованої обробки вантажів (САОДВ), схема роботи яких проілюстрована на рис. 2. У магістральних МПД подібні функції виконують мультиплексори передачі даних. Перевезення дрібнопартійних кореспонденцій, відсортованих по магістральним і зональним напрямкам і упакованих у транспортні блоки, здійснюється на підставі схеми транспортування, отриманої після розв'язання задачі розподілу і маршрутизації сформованих потоків транспортних блоків. Кількість внутрішніх напрямків сортування для будь-якого магістрального вузла визначається числом обслуговуваних вузлів четвертого типу у внутрішній мережі. Перевезення кореспонденцій по внутрішніх напрямках виконується оптимізованими автомобільними маршрутами, отриманими після розв'язання задач поточного планування внутрішніх перевезень.

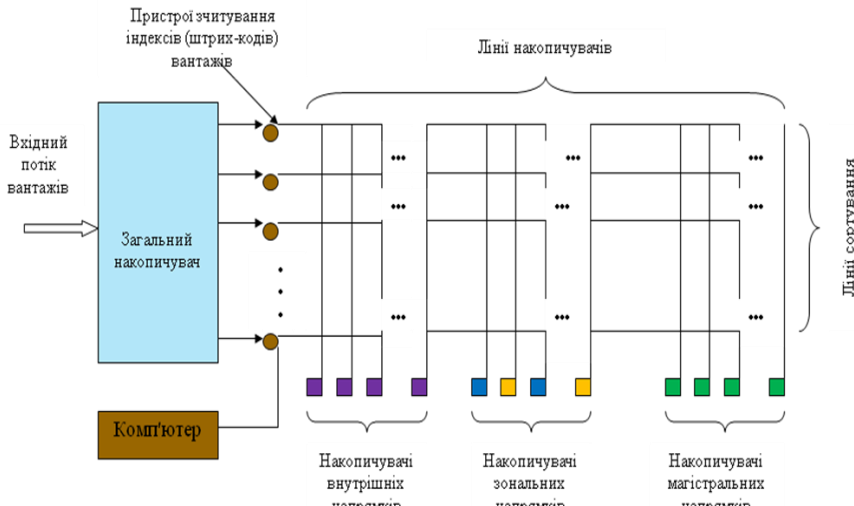


Рис. 2

Управління нелінійними і нестационарними процесами обробки і транспортування потоків на всіх рівнях мережі здійснюється за допомогою ІАС ППР, загальна схема якої для транспортної мережі показана на рис. 3. ІАС функціонує в масштабі реального часу і являє собою інформаційно-картографічну систему на базі ІПД, ГІС та розподіленої обчислювальної мережі. У головному

вузлі управління розміщуються центральний геопортал, розподілена база даних і метаданих, база знань, спеціалізоване програмне забезпечення, ГІС-сервер, веб-сервер, прикладне програмне забезпечення магістрального рівня. У всіх магістральних вузлах розміщуються локальні (зональні і внутрішні) бази даних, спеціалізоване і прикладне програмне забезпечення. ІАС включає глобальну мережу передачі даних, що сполучає всі вузли магістральної мережі і локальні обчислювальні мережі (ЛОМ) в магістральних вузлах.

Для транспортної мережі ІПД і ГІС забезпечують всім диспетчерським службам інтерактивний картографічний доступ до наборів просторових даних, що характеризують стан вузлів і транспортних магістралей в реальному часі, а також до розв'язування різних задач прогнозування, аналізу, перспективного розвитку, поточного планування і оперативного управління на всіх рівнях ієрархії мережі перевезень. Доступ може здійснюватися через відомчі канали зв'язку або Інтернет за допомогою веб-серверів і звичайного веб-браузера (наприклад, Internet Explorer).

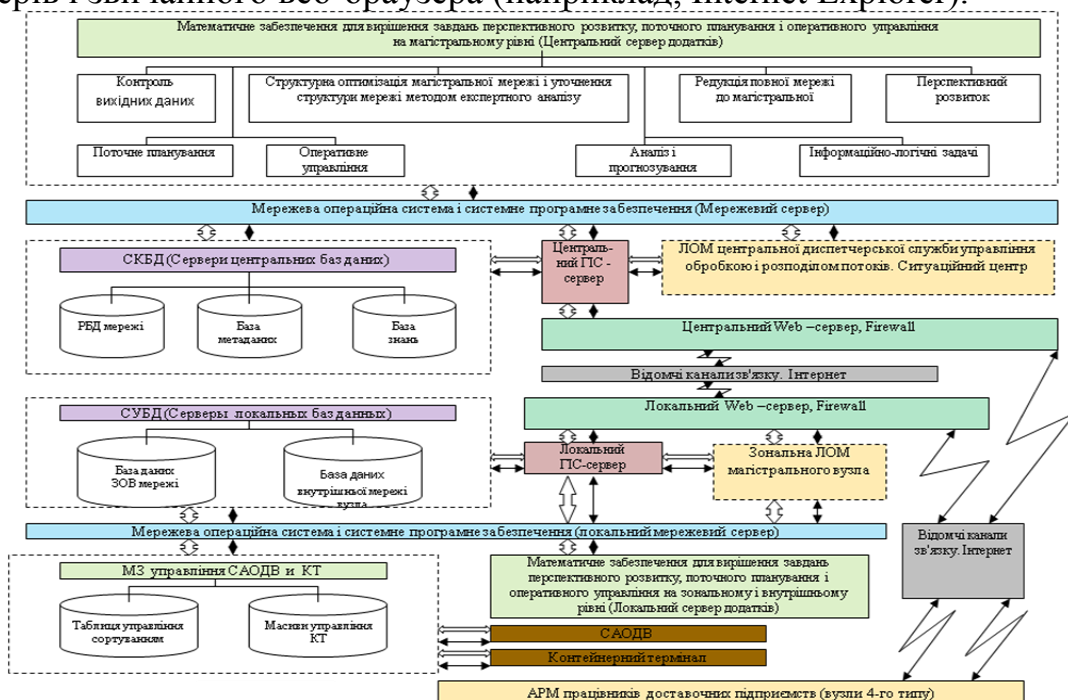


Рис. 3

Інформаційно-картографічна система надає можливість працювати з багатошаровою електронною картою вузлів і транспортних магістралей мережі перевезень. На карті можна одночасно або в будь-якій комбінації бачити вузли, їх зони обслуговування (ЗОВ), транспортні магістралі, виділені фрагменти мережі (полігони), маршрути руху транспортних засобів, планову і поточну завантаженість вузлів і транспортних засобів на маршрутах руху, обсяги невідправлених вчасно вантажів у вузлах мережі і безліч іншої інформації, що характеризує мережу перевезень. При цьому можна змінювати масштаб зображення, переключатися на різні шари електронної карти, викликати різні прикладні програми.

У магістральних вузлах першого типу можуть розміщуватися автоматизовані системи управління технологічними процесами сортування дрібнопартійних вантажів (САОДВ) і обробки контейнерів на контейнерному терміналі (КТ), що працюють в реальному масштабі часу. Для управління САОДВ і КТ використовуються таблиці управління сортуванням і інформаційні масиви управління контейнерним терміналом. Ця управляюча інформація є результатом розв'язання задач поточного планування і оперативного управління обробкою і розподілом потоків вантажів на магістральному і зональному рівнях транспортної мережі.

Вся необхідна оперативна інформація про мережу (обсяги добових потоків у вузлах мережі, маршрути і провізні можливості магістрального транспорту, пропускні спроможності вузлів і безліч іншої поточної інформації) надходить в розподілену базу даних (РБД) через апаратуру передачі даних і відомчі канали зв'язку або Інтернет від магістральних вузлів і доставочних підприємств (вузлів четвертого типу). У РБД зберігається і оновлюється з певною періодичністю вся інформація, необхідна для розв'язання задач управління системою перевезень на магістральному рівні. Призначення бази даних полягає не тільки в підтримці в актуальному стані вихідних інформаційних масивів, а й в зберіганні результатів розв'язання усіх задач управління на магістральному рівні. База метаданих містить стандартизований набір відомостей — каталог про всі існуючі інформаційні ресурси мережі і їх розташуванні в ІАС. У базі знань розташовується і накопичується інформація для оперативного реагування та прийняття рішень у разі виникнення позаштатних ситуацій. База знань і ситуаційний центр використовуються в експертно-навчальній системі диспетчерів при аналізі і виборі альтернативних варіантів виходу з критичних станів мережі (перевантаженнях маршрутів і вузлів, відмов сортувального обладнання та контейнерних терміналів і т.п.).

Центральний ГІС сервер здійснює необхідну функціональну геообробку і візуалізацію даних на робочих місцях ЛОМ центральної диспетчерської служби магістральних перевезень і екрані ситуаційного центру. Управління базами даних здійснюється системами керування базами даних (СКБД). Web-сервери з міжмережевим захистом (Firewall) забезпечують розмежований доступ різних користувачів до ресурсів системи управління перевезеннями.

Математична модель фізичної мережі задана зв'язним графом $\hat{G}(\hat{N}, \hat{P})$ з множиною вузлів $\hat{N} = N_1 \cup N_2 \cup N_3 \cup N_4$, $\hat{n} = |\hat{N}|$ і множиною дуг $\hat{P}$, $\hat{p} = |\hat{P}|$, де N_1, N_2, N_3, N_4 — множини вузлів першого, другого, третього і четвертого типу, $\hat{n}$ і $\hat{p}$ відповідно число вузлів і дуг мережі, а $|\cdot|$ — знак потужності. Дуги представляють собою ділянки доріг або лінії зв'язку МПД і можуть бути як орієнтованими, так

і неорієнтованими. Довжини дуг задані матрицею $\hat{R} = \|\hat{r}_{ij}\|_{\hat{n} \times \hat{n}}$, $\hat{r}_{ij} \in R^1$, $(i, j) \in \hat{P}$, де R^1 — множина дійсних чисел. Потоки дрібнопартійних кореспонденцій між усіма парами вузлів задані цілочисловою матрицею $\hat{A} = \|\hat{a}_{ij}\|_{\hat{n} \times \hat{n}}$, де $\hat{a}_{ij}$ — потік з вузла i у вузол j , $i, j = \overline{1, \hat{n}}$, $i \neq j$. Визначимо також магістральну мережу $G(N, P)$ з множиною вузлів $N = N_1 \cup N_2 \cup N_3$, $n = |N|$, множиною дуг P , $p = |P|$ і внутрішньо вузлові мережі $\tilde{G}_k(\tilde{N}_k, \tilde{P}_k)$, $\tilde{N}_k = \{N_0^k, N_4^k\}$, $N_0^k \in N$, $N_4^k \subseteq N_4$, $|N_0^k| = 1$, $n_k = |\tilde{N}_k| = 1 + |N_4^k|$, $p_k = |\tilde{P}_k|$, $k = \overline{1, n}$.

Для внутрішньо вузлових мереж виконується умова $\bigcap_{k=1}^n \tilde{G}_k(\tilde{N}_k, \tilde{P}_k) = \emptyset$. Для повної мережі є процедура редукції $\phi: \hat{G}(\hat{N}, \hat{P}) \Rightarrow G(N, P) + \bigcup_{k=1}^n \tilde{G}_k(\tilde{N}_k, \tilde{P}_k)$, яка відповідно до принципів сортування і транспортування дрібнопартійних кореспонденцій в ієрархічній мережі перетворює потокову матрицю $\hat{A} = \|\hat{a}_{ij}\|_{\hat{n} \times \hat{n}}$ у матриці $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$ і $\tilde{A}_k = \|\tilde{a}_{ij}^k\|_{n_k \times n_k}$, а матрицю довжини дуг $\hat{R} = \|\hat{r}_{ij}\|_{\hat{n} \times \hat{n}}$ відповідно в матриці $R = \|r_{ij}\|_{n \times n}$ і $\tilde{R}_k = \|\tilde{r}_{ij}^k\|_{n_k \times n_k}$, $k = \overline{1, n}$. В матриці A значення a_{ii} , $i = \overline{1, n}$ визначають внутрішньо вузлові обсяги на обробку потоків у магістральній мережі. Процедура редукції дозволяє автоматизованим способом перетворити дані вихідної повної мережі в дані магістральної і внутрішньо вузлових мереж при зміні її структури і підпорядкуванні вузлів четвертого типу магістральним вузлом.

У другому розділі обговорюються питання організації перевезень у внутрішній зоні магістрального вузла, наводяться основні принципи і схеми, закладені в основу побудови маршрутів транспортних засобів. Розглядаються технічні та економічні особливості і характеристики реальних транспортних процесів, які повинні бути враховані при формуванні цільових функцій математичних моделей задач маршрутизації на рівнях довгострокового і поточного планування і оперативного управління. Наводяться класифікація задач маршрутизації за основними ознаками і бібліографічний огляд літератури, присвяченої їх розв'язанню. Обговорюються методи, алгоритми та пакети програм, що застосовуються в даний час для розв'язання задач подібного класу. Показано, що при визначенні структури внутрішньо вузлової мережі перевезень і її математичної моделі повинні враховуватися реальні географічні особливості і характеристики ділянок доріг транспортної мережі, різні зовнішні фактори що складно формалізуються, а сама модель фізичної структури мережі повинна формуватися за участю досвідчених експертів і диспетчерів транспортних підприємств для кожного магістрального вузла. Проведений аналіз літературних джерел показав, що в більшості відомих робіт, присвячених розв'язанню задач маршрутизації, розглядаються ідеалізовані математичні моделі, в яких не враховується багато обмежень, властивих реальним процесам обробки та транспортування вантажів. Часто приймається евклідова відстань між вузлами мережі перевезень, коли виконується правило трикутника, а такі важливі параметри як відстань, час поїздки, транспортні витрати, час обслуговування та інші, присутні в деякому абстрактному вигляді і моделюються константами. У запропонованих постановках задач враховані всі обмеження і параметри, які дозволяють розрахувати близькі до фактичних, тех-

нічні та економічні показники функціонування внутрішньої мережі магістральних вузлів. Виявлено, що для розв'язання задач побудови маршрутів з неоднорідним парком транспортних засобів найбільш часто застосовуються класичні евристичні і метаевристичні алгоритми, що пояснюється з одного боку NP-складністю розв'язання задач, а з іншого — відносно низькою трудомісткістю розробки таких алгоритмів. Однак слід враховувати, що більшість евристичних алгоритмів на різних екземплярах індивідуальних задач оптимізації можуть дати розв'язки, які як завгодно відрізняються від глобального оптимуму. Тому для розв'язання задач великої розмірності (більше 100 вузлів четвертого типу) краще використовувати гібридні алгоритми, в яких поєднуються в різних комбінаціях точні і численні евристичні і метаевристичні методи і підходи. Сьогодні можна стверджувати, що розробка гібридних алгоритмів для розв'язання NP-складних кластерних задач маршрутизації стала загальноновизнаною у світовій практиці.

Запропоновано декілька варіантів математичних постановок задач побудови постачальних, складальних, комбінованих маршрутів і маршрутів з розщепленої доставки, які засновані на відомих типових моделях і можуть бути використані при проектуванні неоднорідного робочого парку транспортних засобів для обслуговування вузлів четвертого типу у внутрішній зоні магістрального вузла. Для розв'язання поставлених задач можуть бути застосовані точні, наближені і метаевристичні методи і алгоритми, реалізовані в численних комерційних, наприклад, IBM ILOG CPLEX, GAMS, AIMMS, Gurobi Optimizer і некомерційних, наприклад, ABACUS, COIN-OR, GLPK, lp_solve пакетах програм змішаного і цілочислового лінійного програмування. З огляду на ієрархічну структуру магістральної мережі перевезень і, як наслідок, невелику кількість вузлів четвертого типу у внутрішніх зонах магістральних вузлів, перевагу слід віддати точним і гібридним методам і алгоритмам. Зокрема, з успіхом можуть використовуватися алгоритми, запропоновані R. Baldacci і ін., які в даний час прийнято вважати одними з кращих точних універсальних алгоритмів, здатних знаходити оптимальні розв'язки багатьох задач маршрутизації з кількістю внутрішніх вузлів (клієнтів) до 100.

Матеріали розділу складають методологічну основу для розробки сучасного математичного забезпечення розв'язання задач довгострокового, поточного і оперативного планування і управління у внутрішніх зонах магістральних вузлів.

Третій розділ присвячений розробці методів і алгоритмів розв'язання задачі упаковки дрібнопартійних кореспонденцій у транспортні блоки і вибору ієрархічної структури магістральної мережі. У першому підрозділі наведено спосіб формування довідкової матриці об'єднання дрібнопартійних потоків кореспонденцій при розв'язанні задачі упаковки з обмеженнями на час доставки та число об'єднань потоків. На підставі доведених тверджень розроблені ефективні (поліноміальні) обчислювальні алгоритми для визначення вузлів об'єднання і об'єднаних потоків для всіх пар в мережі що кореспондуються. Алгоритми використовуються всередині основних схем оптимізації для розрахунку часу доставки кореспонденцій одержувачу і перевірки відповідних обмежень.

Змістовна постановка задачі полягає в наступному. Задана неорієнтована мережа $G(N, P)$ з множиною вузлів N , $n = |N|$ і множиною ребер P , $p = |P|$, де n і p відповідно кількість вузлів і ребер мережі. На мережі задана цілочислова матриця потоків кореспонденцій $A = \| a_{ij} \|_{n \times n}$, $a_{ii} = 0$, $i = \overline{1, n}$, які підлягають транспортуванню

з джерел i у стоки j , $i, j = \overline{1, n}$. Потоки кореспонденцій повинні транспортуватися по мережі в транспортних блоках обсягу $\omega \gg a_{ij}$. При цьому передбачається, що кожна кореспонденція може бути упакована в транспортний блок тільки повністю.

При розв'язанні оптимізаційної задачі над потоками a_{ij} ітераційно виконуються наступні перетворення:

$$a'_{ik} \leftarrow a_{ik} + a_{ij}, \quad a'_{kj} \leftarrow a_{kj} + a_{ij}, \quad c_{ij} \leftarrow k, \quad a_{ij} \leftarrow 0, \quad (1)$$

де « $\leftarrow$ » знак операції присвоювання; k — вузол, через який виконується перетворення; c_{ij} — елементи довідкової матриці об'єднання потоків $C = \|c_{ij}\|_{n \times n}$, які визна-

$$\text{чаються так: } c_{ij} = \begin{cases} k, \text{ якщо потік } a_{ij} \text{ об'єднується з потоком } a_{ik}, \\ i, \text{ якщо потік } a_{ij} \text{ безпосередньо направляєтся у вузол } j, \\ 0, \text{ якщо } i = j. \end{cases} \quad (2)$$

На різних етапах роботи алгоритму оптимізації необхідно (наприклад, для розрахунку часу доставки кореспонденцій одержувачу) визначати послідовність $\Omega_{ij} = \{(i, k_1), (k_1, k_2), \dots, (k_m, j)\}$ з проміжними вузлами $\{k_1, k_2, \dots, k_m\}$, в яких виконуються додаткова обробка кожного з потоків a_{ij} і їх загальне число $\nu_{ij} = |\{k_1, k_2, \dots, k_m\}|$. Крім того, при виборі чергового потоку a_{ij} для перетворення (1) може знадобитися знаходження множини інших потоків $\{a_{ij}^*\}$, які вже були об'єднані з потоком на попередніх ітераціях.

Теорема 1. Для будь-якого $a_{ij} \in \{a_{ij} \mid c_{ij} \neq i \wedge c_{ij} \neq 0\}$ побудова матриці C відповідно до (2) дозволяє визначити послідовність Ω_{ij} і встановити число додаткових обробок потоку a_{ij} , де « $\wedge$ » — знак кон'юнкції (логічного «і»).

Лема 1. Листя бінарного дерева, побудованого проходженням в глибину з використанням елементів матриці C , породжують послідовність Ω_{ij} при їх перегляді зліва направо.

Затвердження лема дозволяє побудувати ефективний алгоритм побудови і проходження бінарного дерева, в якому піддерева генеруються в порядку їх перегляду.

При роботі з довідковою матрицею об'єднання потоків в основному алгоритмі оптимізації при виборі чергового потоку a_{ij} для перетворення (1) може знадобитися знаходження множини інших потоків $\{a_{ij}^*\}$, які вже були об'єднані з потоком a_{ij} на попередніх ітераціях, так як перетворення a_{ij} призводить до збільшення часу доставки потоку одержувачу не тільки для a_{ij} , але і для множини $\{a_{ij}^*\}$. Виявляється, що для визначення множини $\{a_{ij}^*\}$ для будь-якого a_{ij} , досить скористатися довідковою матрицею C , що формується відповідно до (2).

Теорема 2. Для будь-якого потоку a_{ij} , над яким виконується перетворення (1), множина $\{a_{ij}^*\}$ може бути визначено з довідкової матриці C .

Для визначення множини $\{a_{ij}^*\}$ розроблена рекурсивна процедура, яка здійснює побудову дерева вичерпного пошуку і для будь-якого потоку a_{ij} коректно знаходить множину потоків $\{a_{ij}^*\}$, які були злиті з потоком a_{ij} на попередніх ітераціях основного алгоритму оптимізації упаковки.

У другому підрозділі розглянуто задачу упаковки елементів квадратної матриці, заданих цілими позитивними числами, в блоки фіксованого розміру. Запропоновано постановка задачі і досліджена трудомісткість повного перебору її розв'язків. Доведено, що задача є NP-повною, шляхом поліноміального зведення до неї NP-повної цілочислової задачі про багатопродуктовий потік мінімальної вартості. Суть задачі полягає в знаходженні раціональної схеми об'єднання дрібнопартійних потоків кореспонденцій з різними адресами призначення що виходять з вузлів мережі і упаковки їх в транспортні блоки (контейнери) заданого розміру. При цьому необхідно мінімізувати кількість транспортних блоків для упаковки всіх кореспонденцій заданих на мережі. Задана матриця $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$ з цілими позитивними елементами поза діагоналлю і з нульовою діагоналлю. Над елементами матриці можна виконувати якусь операцію об'єднання, дотримуючись певних обмежень. Для виконання окремої операції вибирається елемент $a_{ij} > 0$ і непорожня множина непересічних індексів $\{k_1, k_2, \dots, k_m\}$, відмінних від i і j ($\bigcap_{m=1}^{n-2} k_m = \emptyset$, $n \geq 3$). Внаслідок цього, елементи $a_{ik_1}, a_{ik_2}, \dots, a_{ik_m}$ збільшуються на величину a_{ij} і елемент a_{ij} обнуляється. Кожен перетворений $a_{ik_1}, a_{ik_2}, \dots, a_{ik_m}$ або неперетворений елемент a_{ij} (коли $\{k_1, k_2, \dots, k_m\} = \emptyset$) розміщується («упаковується») в цілу кількість блоків розміру $\omega \in \mathbb{Z}^+$. При зміні матриці змінюється сумарна кількість блоків, необхідних для розміщення всіх елементів. Потрібно знайти таку послідовність операцій об'єднання, щоб в результаті отримати матрицю з мінімальним числом блоків. Змістовно вихідна матриця A задає потреби в транспортуванні, а операція об'єднання означає, що якщо є прямий потік a_{ij} , то його можна направити через транзитні вузли $k_1, k_2, \dots, k_m$, відповідно змінивши елементи $a_{ik_1}, a_{ik_2}, \dots, a_{ik_m}, a_{ij}$.

Наведемо формальну постановку задачі, розділивши початковий стан матриці і змінений. Є матриця цілочислових змінних $X = \|x_{ij}\|_{n \times n}$, початкові значення якої збігаються зі значеннями матриці A . Потрібно знайти мінімум функції

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lceil x_{ij} / \omega \rceil, \quad x_{ij} = \begin{cases} a_{ij} + \sum_{rs} a_{rs}^*, & \text{що } a_{ij} \text{ безпосередньо не об'єднався} \\ \text{з іншими елементами, } i, j = \overline{1, n}, \\ 0 & \text{в іншому випадку,} \end{cases} \quad (3)$$

де $\lceil x \rceil$ — найменше ціле, більше або рівне x , $\{a_{rs}^*\}$ — множина елементів (може бути порожній), об'єднаних с a_{ij} . Умови балансу мають вигляд

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n a_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ji} - \sum_{j=1}^n a_{ji}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Обмеження на величину значень x_{ij} визначаються так:

$$x_{ij} \leq \left\lceil \frac{a_{ij}}{\omega} \right\rceil \omega, \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Лема 2. Максимальне число елементів, що перетворюються за допомогою операції об'єднання, не може перевищувати значення $n^2 - 3n + 2$.

Задача (3)–(5), сформульована як задача розпізнавання: чи існує послідовність об'єднань така, що значення функції (3) не перевищує $B \in \mathbb{Z}^+$, належить до класу NP, так як для неї завжди знайдеться сертифікат з довжиною, обмеженою поліномом $n^2 - 3n + 2$ (лема 2).

Теорема 3. Задача упаковки (3)–(5) є NP-повною. Доказ теореми ґрунтується на поліноміальному перетворенні за час $O(n^2)$ NP-повної цілочислової задачі про багатопродуктовий потік мінімальної вартості (minimum-cost integer multicommodity flow problem, MC IMCF) до задачі (3)–(5).

Далі на прикладі тестових алгоритмів упаковки показано як впливають зміна границь вихідних даних і різні перебірні схеми розв'язання задачі на кінцеві результати. Отримані дані експерименту показали сильну залежність результатів розв'язку задачі від вибору елементів x_{ij} та індексів k для виконання операцій об'єднання і від границь зміни вихідних даних — значень n , a_{ij} , ω , і вказують на необхідність пошуку і розробки ефективних евристичних алгоритмів.

У третьому підрозділі запропоновано метод та алгоритми для розв'язання практичних задач упаковки з функціями витрат на обробку і транспортування дрібнопартиційних кореспонденцій, які засновані на дискретному аналогу методу локального спуску, коли околі метричного простору допустимих розв'язків вибираються з евристичних (інтуїтивних) міркувань з урахуванням специфіки структур даних і особливостей розв'язуваної задачі. Обговорюються питання збіжності і часової складності алгоритмів, а також на числових прикладах досліджується їх порівняльна обчислювальна ефективність. Нехай $G(N, E)$ — неорієнтована магістральна мережа з множиною вузлів N , $n = |N|$, і множиною дуг E , $e = |E|$. Задано множина кореспонденцій, кожна з яких характеризується вузлом відправлення i , вузлом призначення j і обсягом кореспонденції $a_{ij} \in \mathbb{Z}^+$, $i, j = \overline{1, n}$. Все кореспонденції повинні транспортуватися по мережі в деяких транспортних блоках фіксованої ємності $\omega \in \mathbb{Z}^+$. Величини a_{ii} , $i = \overline{1, n}$, визначають внутрішньо вузлові обсяги на обробку кореспонденцій, які у транспортні блоки не упаковуються і по мережі не транспортуються. Всі кореспонденції однорідні (одного типу), при транспортуванні можуть об'єднуватися в різних вузлах і упаковуватися у транспортні блоки тільки цілком, тобто забороняється їх розгалуження (розщеплення, дроблення на частини) і транспортування по декількох шляхах. Нехай обсяги кореспонденції задані вихідний матрицею вимог $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$, $a_{ij} \in \{1, \dots, \omega, \dots, a_{\max}\}$, $i, j = \overline{1, n}$, в якій рядки відповідають вузлам відправлення, а стовпці — вузлам призначення, і є деяка перетворена матриця $X = \|x_{ij}\|_{n \times n}$, елементи якої є цілочисловими шуканими змінними задачі упаковки. Потрібно знайти мінімум функції

$$\sum_{ij \in S} C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij}) + \sum_{i=1}^n C_{sort}^i(x_i, q_i) + \sum_{i=1}^n C_{load}^i(u_i), \quad (6)$$

при обмеженнях

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ji} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ji}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} \leq h_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (8)$$

$$x_{ij}, u_{ij} \geq 0 \text{ і цілі, } \forall ij \in S, \quad (9)$$

де S — множина пар індексів ij кореспонденцій, визначена на декартовому множенні $n \times n$; $x_{ij} = a_{ij} + \sum_{rs} a_{rs}^*$, якщо кореспонденція a_{ij} не об'єдналась ні з якою іншою кореспонденцією ($\{a_{rs}^*\}$ — множина кореспонденції, об'єднаних з кореспонденцією a_{ij}), і $x_{ij} = 0$, якщо кореспонденція a_{ij} об'єднувалась з будь-якої іншою кореспонденцією або $i = j$; $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij})$ — нелінійна функція транспортних витрат, що залежить від кількості транспортних блоків $u_{ij} = \left\lceil \frac{x_{ij}}{\omega} \right\rceil$, і довжини d_{ij} — шляху їх транспортування між вузлами i і j ; $C_{sort}^i(x_i, q_i)$ — нелінійна функція витрат від сумарного обсягу $x_i = a_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (a_{ij} + a_{ji}) + \sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}$ і кількості напрямків сортування $q_i = q_{in}^i + \sum_{j=1}^n \delta_{ij}$ дрібнопартійних кореспонденцій, що оброблюються в вузлі i ($\delta_{ij} = 1$, якщо $x_{ij} \neq 0$, і $\delta_{ij} = 0$, якщо $x_{ij} = 0$, а q_{in}^i визначає задану кількість напрямків сортування для обробки кореспонденцій a_{ii} , $i = \overline{1, n}$); $C_{load}^i(u_i)$ — нелінійна функція витрат від сумарної кількості транспортних блоків $u_i = \sum_{j=1}^n (u_{ij} + u_{ji})$, що оброблюються в вузлі i ; h_i , $i = \overline{1, n}$, — максимальна пропускна здатність i -го вузла по обробці транзитних дрібнопартійних кореспонденцій.

При розв'язанні задачі також враховуються обмеження на час доставки $t_{ij} \leq T_{ij}$ $\forall ij \in S$ і кількість транзитних об'єднань $v_{ij} \leq v_{\max}$ $\forall ij \in S$ дрібнопартійних кореспонденцій при їх транспортуванні з вузлів відправлення у вузли призначення, де T_{ij} і $v_{\max}$ — відповідно заданий час доставки дрібнопартійних кореспонденцій одержувачу і максимально допустима кількість транзитних об'єднань кореспонденцій.

Перша складова функції (6) визначає транспортні витрати, друга — витрати на сортування, а третя — витрати на обробку транспортних блоків. Вирази (7), (8) і (9) представляють умови балансу, обмеження на пропускні спроможності вузлів і значення змінних x_{ij} .

Особливістю задачі упаковки є те, що при її розв'язанні розраховується тільки орієнтовна оцінка транспортних витрат і нижня границя витрат на обробку транспортних блоків. Тому в якості $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij})$ може бути прийнята функція питомої вартості транспортування потоку величиною u_{ij} на відстань d_{ij} від вантажопідйомності транспортного засобу або пропускної здатності каналу зв'язку, що задається у вигляді параметра $w_\xi \in \{w_1, w_2, \dots, w_\alpha\}$, $\xi = \overline{1, \alpha}$. Наприклад, можна вважати, що $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij}) = u_{ij}(k_1^\xi + k_2^\xi d_{ij}) / w_\xi$ $\forall ij \in S$, де k_1^ξ , k_2^ξ — задані коефіцієнти.

Для розв'язання задачі запропоновані дві групи евристичних алгоритмів локального спуску, які використовують (алгоритми Optpac1, Optpac2) і не використовують

ють (алгоритми Optpac3, Optpac4 і Optpac5) задані функції витрат. Нехай F_0 — значення функції (6) при $X = A$, а ν — радіус околі пошуку локального оптимуму (наростаюче значення кількості об'єднань потоків $\nu \leq \nu_{\max}$). Для алгоритму Optpac1 доведена наступна теорема.

Теорема 4. Якщо множина M допустимих розв'язків задачі (6)-(9), що визначаються обмеженнями (8), (9) і $t_{ij} \leq T_{ij}$, $\nu_{ij} \leq \nu_{\max}$, не порожня, то за допомогою алгоритму Optpac1 в гіршому випадку за асимптотичний час $O(Cn^5)$ буде отримано деякій поточний розв'язок $F_\nu < F_0$ або знайдений локальний мінімум $F_{\min}$ функції (6).

Загальний час роботи алгоритму Optpac1 в гіршому випадку становить $O(\nu_{\max} [C_1 C_2 n^3 + 2C_1 n^2 + C_1 n] + 4n^2)$. Величина C_1 істотно залежить від границь зміни значень a_{ij} в порівнянні зі значенням ω , а також від області допустимих розв'язків, яка визначається обмеженнями на h_i і T_{ij} . Значення C_1 може бути досить великим у порівнянні зі значенням $\nu_{\max} C_2$ і досягати $(n^2 - n)$, де C_2 — деяка константа, максимальне значення якої залежить від $\{a_{rs}^*\}$ і числа рекурсій алгоритмів для знаходження $\{a_{rs}^*\}$ і перевірки обмежень $t_{rs} \leq T_{rs}$ і $\nu_{rs} \leq \nu$. Таким чином, в асимптотиці час роботи алгоритму Optpac1 не краще, ніж $O(Cn^5)$, де $C = \nu_{\max} C_2$. Складність алгоритму Optpac2 знижена до $O(Cn^4 n_{av})$ за рахунок спеціального вибору вузлів для операцій об'єднання потоків, де n_{av} — середнє число транзитних вузлів у шляху від i до j в мережі G . Розробка алгоритмів другої групи обґрунтована великою складністю алгоритмів першої групи і тим, що для реальних комунікаційних мереж важко визначити функції C_{tr}^{ij} , C_{sort}^i і C_{load}^i які досить адекватно характеризують витрати на процеси транспортування і обробки потоків кореспонденцій. Перша група алгоритмів застосовується для розв'язання задачі в разі, коли можна стверджувати, що задані функції витрат на транспортування і обробку потоків адекватно відображають вартісні залежності реальних процесів від основних змінних і параметрів, друга група — в разі, коли немає твердої впевненості в адекватності використовуваних функцій витрат, а також у разі, коли функції витрат взагалі не задані. Алгоритми другої групи орієнтовані на максимальне скорочення транспортних блоків у мережі і не використовують у своїй роботі функції витрат. Однак отриманий за допомогою цих алгоритмів розв'язок задачі оцінюється по заданим функціям приведених витрат. Часова складність алгоритмів Optpac3, Optpac4 і Optpac5 відповідно складає $O(\nu_{\max} [(n^4 + C_2 n^3 - n^3 - C_2 n^2) + 4n^2])$, $O(\nu_{\max} [(n^4 + C_2 n^2 n_{av} - n^3 - C_2 n n_{av}) + 4n^2])$ і $O(\nu_{\max} [n^2 n_L + C_L n_L C_2 n_{av} + 4n^2])$, де n_L визначається середнім числом елементів в деякому списку пошуку, що мають однакове значення x_{ij} . Проведене експериментальне дослідження алгоритмів Optpac1-Optpac5 на мережах які містять від 25 до 500 вузлів показало велику обчислювальну трудомісткість алгоритмів Optpac1 і Optpac2 і їх «розумне» застосування на звичайних персональних комп'ютерах можливо на мережах, що містять до 100 вузлів. Алгоритми Optpac3-Optpac5 працюють значно швидше (час роботи алгоритму Optpac5 на мережі з $n = 500$ склало 47,85с), а отримані ними розв'язки відрізняються від кращих результатів алгоритму Optpac1 не більше ніж на 2.65 %.

Всі алгоритми допускають розпаралелювання обчислювального процесу за значеннями розміру околі пошуку локального мінімуму (параметра $\nu = 1, 2, \dots, \nu_{\max}$). Тому розв'язання задачі упаковки можливо на потужних обчислювальних кластерах (High performance computing clusters, HPC) і багатопроцесорних комп'ютерах, що істотно скоротить час її розв'язання на мережах великої розмірності.

У четвертому підрозділі розглядається задача упаковки, в якій поряд з функціями витрат на обробку і транспортування дрібнопартійних кореспонденцій і обмеженнями на пропускні спроможності вузлів задані обмеження на пропускні спроможності дуг мережі. Доведено, що при розв'язанні задачі упаковки нелінійна функція транспортних витрат може бути замінена на функцію питомої вартості транспортування транспортних блоків від відстані і вантажопідйомності транспортних засобів або пропускної здатності каналів зв'язку, а задача вибору пропускних спроможностей дуг може вирішуватися незалежно при оптимізації розподілу сформованих потоків транспортних блоків. Задача формулюється на орієнтованій мережі $G(N, E)$ та приймається, що для кожної прямої дуги kl , ($k < l$) існує зворотна lk , ($l > k$). Як і раніше x_{ij} , u_{ij} — змінні, що визначають відповідно величину потоку з i в j у вихід-

них одиницях і транспортних блоках. Спочатку всі $x_{ij} = a_{ij}$, а $u_{ij} = \left\lceil \frac{x_{ij}}{\omega} \right\rceil$, $ij \in S$. Не-

хай w_{kl} , $kl \in E$ — шукані пропускні спроможності дуг мережі у транспортних блоках, $w_{kl} \in \{w_1, w_2, \dots, w_\alpha\}$, w_i , $i = \overline{1, \alpha}$ — впорядковані по неубуванню цілі позитивні числа; d_{kl} , $kl \in E$ — довжини дуг; f_{kl} , $kl \in E$ — сумарні потоки в транспортних блоках, що протікають по дугам мережі при заданому способі маршрутизації потоків, $f_{kl} = \sum_{ij \in S} u_{ij}^{kl}$, де u_{ij}^{kl} — потік транспортних блоків з i в j , що проходить по дузі kl ; t_{av} , $T_{\max}$ — розрахункова середня і встановлена максимальна затримка в передачі потоків в мережі.

Потрібно мінімізувати функцію:

$$\sum_{kl \in E} C_{tr}^{kl}(w_{kl}, d_{kl}) + \sum_{i=1}^n C_{sort}^i(x_i, q_i) + \sum_{i=1}^n C_{load}^i(u_i), \quad (10)$$

при обмеженнях балансу потоків

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ji} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ji}, \quad i = \overline{1, n},$$

и обмеженнях:

$$w_{kl} > f_{kl}, \quad w_{kl} \in \{w_1, w_2, \dots, w_\alpha\}, \quad \forall kl \in E, \quad (11)$$

$$t_{av} = 1/U_\Sigma \sum_{kl \in E} f_{kl} / (w_{kl} - f_{kl}) \leq T_{\max}, \quad U_\Sigma = \sum_{ij \in S} u_{ij}, \quad (12)$$

$$x_i \leq h_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (13)$$

$$t_{ij} \leq T_{ij}, \quad ij \in S, \quad (14)$$

$$v_{ij} \leq \nu_{\max}, \quad ij \in S. \quad (15)$$

Функції C_{tr}^{kl} мають дискретний характер в залежності від f_{kl} і d_{kl} . При $f_{kl} > w_{kl}$, $w_{kl} \in \{w_1, w_2, \dots, w_\alpha\}$, $kl \in E$ необхідно збільшити пропускну здатність дуги kl до бі-

льшого значення з допустимої множини. Більш того, при розв'язанні задачі пропускну здатність дуг потрібно збільшувати до тих пір, поки не почне виконуватися обмеження (12).

Твердження 1. Розв'язання задачі (10)-(15) може бути зведене до незалежного послідовного розв'язання наступних задач: знайти мінімальне значення функції

$$\sum_{ij \in S} C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij}) + \sum_{i=1}^n C_{sort}^i(x_i, q_i) + \sum_{i=1}^n C_{load}^i(u_i), \quad (16)$$

при обмеженнях (13)-(15);

знайти мінімальне значення функції

$$\sum_{kl \in E} C_{tr}^{kl}(w_{kl}, d_{kl}), \quad (17)$$

при обмеженнях (11), (12).

Твердження 2. При розв'язанні задачі (16), (13)-(15) збільшення величини w_ξ призводить до зменшення транспортних витрат і зменшення значення t_{av} , тобто є можливість попередньої оцінки величини пропускну здатності, при якій починає виконуватися обмеження (12).

Докази тверджень підтверджені при проведенні числових експериментів на мережах, що містять до 1000 вузлів і 200000 орієнтованих дуг.

Для прояснення алгоритмічної складності розв'язання задачі вибору пропускну спроможностей (17), (11), (12), запишемо її в наступному вигляді:

$$\min \sum_{i=1}^e \sum_{j=k}^{\alpha} c_{ij} x_{ij}, \quad k = \text{The first index}_{\xi=1, \alpha} (w_{i\xi} > f_i), \quad i = \overline{1, e}, \quad (18)$$

при обмеженнях

$$t_{av} = \sum_{i=1}^e \sum_{j=k}^{\alpha} t_{ij}^{av} x_{ij} \leq T_{\max} u_\Sigma, \quad (19)$$

$$\sum_{j=k}^{\alpha} x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, e}, \quad (20)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad (21)$$

де вартості дуг c_{ij} обчислені, наприклад, як $c_{ij} = k_{ij}^1 + k_{ij}^2 d_i$, $j = \overline{k, \alpha}$, $i = \overline{1, e}$, а k_{ij}^1 , k_{ij}^2 — задані вартісні коефіцієнти для дуги i в стані j , $w_{ij} \in \{w_1, w_2, \dots, w_\alpha\}$; d_i — довжина дуги i ; середні затримки в дугах $t_{ij}^{av} = f_i / (w_{ij} - f_i)$, $j = \overline{k, \alpha}$, $i = \overline{1, e}$; f_i — потік по дузі i . Шукані пропускну спроможності відповідають оптимальному розв'язку задачі. Сформульована задача відома як задача про ранець з мультівибором (Multiple-choice Knapsack Problem, МСКР) і булевими змінними і відноситься до класу NP-складних.

Твердження 3. Задачі (17), (11), (12) і (18)-(21) є NP-повними і їх можна розв'язати за псевдополіноміальний час. Доказ засновано на поліноміальному перетворенні відомої NP-повної задачі в задачу (17), (11), (12). Неважко бачити також, що будь-яку індивідуальну задачу виду (17), (11), (12) можна за час $O(e\alpha)$ перетворити у відповідний екземпляр задачі (18)-(21). Для цього необхідно побудувати матрицю розміром $e \times \alpha$, рядки якої відповідають дугам, стовпці — набору дискретних пропускну спроможностей, а в якості елементів матриці виступають вартості дуг.

Для розв'язання задачі запропоновано два наближених алгоритмів, заснованих на апроксимації дискретних функцій витрат лінійними, і на методі послідовного аналізу варіантів. Часова складність першого алгоритму становить $O(e\alpha^2 + e\alpha + e\log e + K_1e)$, де K_1 — деяка константа, і в основному визначається часовою складністю апроксимації вартостей ліній зв'язку лінійними функціями і вибором алгоритму сортування. Складність другого алгоритму має порядок $O[\lambda(e(e + \alpha) + Ke(e + \alpha)) + e\log e + K_1e]$, де λ — кількість ітерацій алгоритму, а K — число звужень і розширень області допустимих розв'язків.

Проведені експериментальні дослідження алгоритмів показали, що обидва алгоритми без повного перебору варіантів на заключному етапі не дають точного розв'язку. Алгоритми псевдополіноміальні, так як для повного перебору потрібно $O(2^e)$ часу.

У п'ятому підрозділі розглядається і експериментально досліджується задача вибору ієрархічної структури магістральної мережі з множиною вузлів $N = N_1 \cup N_2 \cup N_3$, де N_1, N_2, N_3 — множини вузлів першого, другого і третього типу відповідно. Потрібно визначити кількісний і якісний склад вузлів мережі і схему сортування дрібнопартійних кореспонденцій в кожному вузлі, при яких максимально знижуються приведені витрати на функціонування мережі. Формально, необхідно для всіх можливих комбінацій типів вузлів розв'язати задачу упаковки (6)-(9) з обмеженнями на час доставки $t_{ij} \leq T_{ij} \quad \forall ij \in S$ і кількість транзитних об'єднань $\nu_{ij} \leq \nu_{\max} \quad \forall ij \in S$ дрібнопартійних кореспонденцій при їх транспортуванні з вузлів відправлення в вузли призначення. Для розв'язання задачі запропоновано оригінальний метод, заснований на використанні алгоритмів розв'язування задач упаковки і розподілу потоків у зональних мережах. Проведено аналіз результатів обчислювального експерименту з вирішення задачі. Моделі та алгоритми розв'язання задачі розподілу і упаковки дрібнопартійних кореспонденцій в зональних мережах, які є окремими фрагментами магістральної мережі, розглянуті в додатку Б дисертації.

У додатку В розглядаються два способи балансування матриці контейнерних потоків при розв'язанні задачі перевезення дрібнопартійних вантажів у транспортній мережі. Необхідність балансування виникає через нерівності суми вихідних і вхідних потоків контейнерів у вузлах мережі. Запропоновано математичну модель і алгоритм розв'язання задачі розвезення порожніх контейнерів і проведено огляд та аналіз сучасних методів і алгоритмів розв'язання транспортної задачі. Експериментально показано, що оптимальне балансування у порівнянні із симетричним балансуванням дозволяє значно скоротити сумарні витрати на транспортування і обробку порожніх контейнерів (на мережах від 100 до 4000 вузлів в 17 і 174 разів відповідно).

Четвертий розділ дисертації присвячений розробці методів і алгоритмів розв'язання нелінійної багатоекстремальної дискретної задачі розподілу і маршрутизації транспортних блоків з упакованими в них дрібнопартійними потоками вантажів або повідомлень з різними адресами призначення. У першому підрозділі розглядається математична модель задачі. Обговорюються особливості її розв'язання для транспортної мережі та мережі передачі даних для нерозгалужених і розгалужених потоків при заданих обмеженнях на час доставки дрібнопартійних потоків кореспонденцій одержувачу і середній час затримки потоків. Запропоновано метод зведення розв'язання вихідної задачі до розв'язання деякої сукупності лінійних ба-

готовимірних задач про ранець зі зв'язуючими обмеженнями. Нехай $G(N, P)$ — ієрархічна магістральна мережа з множиною неорієнтованих дуг P , $p = |P|$, і множиною вузлів $N = N_1 \cup N_2 \cup N_3$, $n = |N|$. Дрібнопартійні потоки кореспонденцій задані вихідною цілочисловою матрицею $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$ і перетвореною цілочисловою матрицею $A' = \|a'_{ij}\|_{n \times n}$, отриманою після розв'язання задачі упаковки транспортних блоків. Нехай $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{ij}\|_{n \times n}$, $\tilde{a}_{ij} = \left\lceil \frac{a'_{ij}}{\omega} \right\rceil$ — матриця потоків транспортних блоків. Ви-

значено $\{m_k\}$, $k = \overline{1, l}$, множина проєктованих маршрутів транспортних засобів або каналів зв'язку, кожен з яких складається з послідовності вузлів і дуг мережі G , що з'єднує початковий і кінцевий вузли маршруту або каналу зв'язку. Передбачається, що множина $\{m_k\}$ для кожної неорієнтованої дуги мережі G містить прямої і зворотний маршрути, і в процесі розв'язання задачі в множину $\{m_k\}$ можуть включатися нові маршрути, які генеруються за певними правилами. Множина $\{m_k\}$ може містити кілька маршрутів, що з'єднують будь-яку пару вузлів. З кожним маршрутом транспортної мережі пов'язані його характеристики: функція середньорічних приведених витрат на експлуатацію та утримання маршруту; вантажопідйомність і періодичність руху транспортних засобів; час прибуття і відправлення транспортного засобу для кожного вузла в маршруті і ін. Для кожного маршруту в мережі передачі даних задані функція середньорічних приведених витрат на експлуатацію та утримання каналу зв'язку, його довжина і пропускна здатність.

Побудуємо маршрутну мультимережу $G_M(N, P_M)$ транзитивним замиканням вузлів всіх маршрутів з $\{m_k\}$, де N — множина вузлів мережі, P_M — множина її орієнтованих маршрутних дуг. Між будь-якими вузлами α і β мережі G_M існує маршрутна дуга, якщо вони пов'язані хоча б одним маршрутом транспортного засобу або каналом зв'язку з $\{m_k\}$. Введемо змінні: $u_{ij,k}^{\alpha\beta}$ — невідомий потік транспортних блоків з i в j , що проходить по дузі $p_{\alpha\beta} \in P_M$, отриманої з маршруту m_k ($u_{ij,k}^{\alpha\beta}$ визначають дугові потоки в транспортних блоках на маршрутній мережі G_M); $u_{ij,k}^{\eta\xi}$ — невідомий потік транспортних блоків з i в j , що проходить по дузі $p_{\eta\xi} \in P$ на маршруті m_k . Потрібно мінімізувати функцію

$$\sum_{k=1}^l C_{tr}^k \left(\left(\sum_{\eta\xi \in q_k} \sum_{ij \in S} u_{ij,k}^{\eta\xi} \right), d_k \right) + \sum_{\beta=1}^n C_{load}^{\beta} \left(\sum_{\alpha=1}^n \sum_{k=1}^l \sum_{ij \in S} (u_{ij,k}^{\alpha\beta} + u_{ij,k}^{\beta\alpha}) \right), \quad (22)$$

при обмеженнях:

$$\sum_{\beta=1}^n \sum_{k=1}^l u_{ij,k}^{\alpha\beta} - \sum_{\beta=1}^n \sum_{k=1}^l u_{ij,k}^{\beta\alpha} = \begin{cases} \tilde{a}_{ij} & \text{при } i = \alpha, \\ 0 & \text{при } i \neq \alpha, j \neq \alpha, \\ -\tilde{a}_{ij} & \text{при } j = \alpha, \text{ для } \alpha = \overline{1, n}, ij \in S; \end{cases} \quad (23)$$

$$\sum_{\alpha=1}^n \sum_{k=1}^l \sum_{ij \in S} (u_{ij,k}^{\alpha\beta} + u_{ij,k}^{\beta\alpha}) - \sum_{j=1}^n (\tilde{a}_{\beta j} + \tilde{a}_{j\beta}) \leq 2b_{\beta}, \quad \beta = \overline{1, n}; \quad (24)$$

$$\sum_{ij \in S} u_{ij,k}^{\eta\xi} \leq W_{\eta\xi}^k \quad \forall \eta\xi \in q_k, \quad k = \overline{1, l}; \quad (25)$$

$$\sum_{\beta=1}^n \sum_{ij \in S} (u_{ij,k}^{\alpha\beta} + u_{ij,k}^{\beta\alpha}) \leq b_{\alpha}^k, \quad \alpha \in \nu_k, \quad k = \overline{1, l}; \quad (26)$$

$$t_{av} = 1/\tilde{a}_{\Sigma} \sum_{k=1}^l \sum_{\eta\xi \in q_k} f_{\eta\xi}^k / (W_{\eta\xi}^k - f_{\eta\xi}^k) \leq T_{\max}, \quad \text{де } \tilde{a}_{\Sigma} = \sum_{ij \in S} \tilde{a}_{ij}, \quad f_{\eta\xi}^k = \sum_{ij \in S} u_{ij,k}^{\eta\xi}; \quad (27)$$

$$u_{ij,k}^{\alpha\beta} \geq 0, u_{ij,k}^{\eta\xi} \geq 0 - \text{цілі числа.} \quad (28)$$

Передбачається, що мається оператор $\Phi: u_{ij,k}^{\alpha\beta} \Rightarrow \{u_{ij,k}^{\eta\xi}\}$, $p_{\alpha\beta} \in P_M$, $p_{\eta\xi} \in P$, $ij \in S$, $k = \overline{1, l}$, що відображає потік по маршрутній дузі маршруту m_k в мережі G_M на відповідну підмножину дуг маршруту m_k в мережі G ; враховуються обмеження на час доставки дрібнопартійних потоків одержувачу $t_{ij} \leq T_{ij}$, $ij \in S$. У конкретних випадках розв'язання задачі до вказаних обмежень можуть бути додані обмеження на заборону розгалуження потоків:

$$u_{ij,k}^{\alpha\beta} = \begin{cases} \tilde{a}_{ij}, & \text{потік проходить по дузі } \alpha\beta \in m_k, \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (29)$$

У формулах (22)-(29) введені позначення: C_{tr}^k — нелінійна функція, яка визначає залежність транспортних витрат від кількості транспортних блоків, переданих по маршруту m_k , і від довжини маршруту d_k ; q_k — впорядкована множина дуг з P , які складають маршрут m_k ; C_{load}^{β} — нелінійна функція витрат на обробку транспортних блоків у вузлі β ; b_{β} , $\beta = \overline{1, n}$ — максимальна пропускна здатність β -го вузла у транспортних блоках, пропускна здатність задається для транзитних потоків, так як вихідні і вхідні потоки для кожного вузла повинні бути оброблені безумовно; $W_{\eta\xi}^k$ — вантажопідйомність транспортного засобу або пропускна здатність каналу зв'язку на маршруті m_k на дузі $\eta\xi \in P$ у транспортних блоках, $W_{\eta\xi}^k \in \{w_1, w_2, \dots, w_v\}$, де $w_1, w_2, \dots, w_v$ — цілі, впорядковані по зростанню позитивні числа; b_{α}^k — обмеження на максимальну сумарну кількість транспортних блоків, які можна обробити в транзитному вузлі α на маршруті m_k ; ν_k — впорядкована множина вузлів з N на маршруті m_k ; t_{av} , $T_{\max}$ — розрахункова середня і встановлена максимальна затримка в передачі транспортних блоків в мережі.

Перша складова функції визначає транспортні витрати, друга — витрати на обробку транспортних блоків. Умови (23) забезпечують нерозривність потоку, а умови (24)-(27) є відповідно обмеженнями на пропускні спроможності вузлів; пропускні спроможності маршрутів; обсяги обробки транспортних блоків в вузлах проходження транспортних засобів або в комутованих вузлах мережі передачі даних; середню затримку в передачі транспортних блоків.

Задача (22)–(29) відноситься до класу багатоекстремальних дискретних розподільних задач на мережі і є NP-складною. У зв'язку зі складністю сформульованої задачі запропоновано метод зведення її розв'язання до послідовного розв'язання деякої сукупності лінійних багатовимірних задач про ранець зі зв'язуючими обмеженнями. Ідея перетворення задачі заснована на тому, що зменшення значення цільової

функції (22) можна досягти при максимальному збільшенні значень $u_{ij,k}^{\eta\xi}$ на всіх дугах (ділянках) $\eta\xi \in P$ маршрутів $\{m_k\}$ при розподілу всіх потоків в мережі G_M за критерієм: мінімум транзитних перевантажень, за однакової кількості числа транзитних перевантажень — мінімум довжини шляху.

В результаті отримаємо деякий аналог двоїстої задачі до задачі (22)-(29) при виключенні з явного розгляду нелінійних функцій витрат C_{tr}^k і C_{load}^β . Перетворена задача має вигляд:

$$\text{знайти } \min_{|\{m_k\}|, C_r^k} \left\{ \{m_k\} \mid \sum_{j=1}^{\varepsilon_k} \dot{a}_{ij}^k x_{f_j^k}^k \Rightarrow \max, i = \overline{1, \eta_k - 1}, k = \overline{1, l} \right\}, \quad (30)$$

при обмеженнях

$$\sum_{k=1}^l \lambda_i^k = \sum_{j=1}^n (\tilde{a}_{ij} + \tilde{a}_{ji}), \quad i = \overline{1, n}, \quad (31)$$

$$\sum_{j=1}^{\varepsilon_k} \dot{a}_{ij}^k x_{f_j^k}^k \leq w_i^k, \quad i = \overline{1, \eta_k - 1}, k = \overline{1, l}, \quad (32)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{k=1}^l \psi_i^k \leq b_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (33)$$

$$\sum_{j=1}^{\varepsilon_k} \ddot{a}_{ij}^k x_{f_j^k}^k \leq b_i^k, \quad i = \overline{1, \eta_k}, k = \overline{1, l}, \quad (34)$$

$$t_{av} = 1 / \tilde{a}_\Sigma \sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^{\eta_k-1} \gamma_i^k / (w_i^k - \gamma_i^k) \leq T_{\max}, \quad (35)$$

$$x_j^k = \begin{cases} \text{одному з значень } 1 / \tilde{a}_{i',j'}, 2 / \tilde{a}_{i',j'}, \dots, \tilde{a}_{i',j'} / \tilde{a}_{i',j'}, & \text{що потік } \tilde{a}_{i',j'}, \\ \text{з номером } j \text{ обраний на маршрут } m_k, \\ 0 \text{ в іншому випадку,} \end{cases} \quad (36)$$

де $\eta_k = |\nu_k|$ — число вузлів в маршруті m_k ; $\varepsilon_k = |\{u_{ij,k}^{\alpha\beta}\}|$ — число потоків $\tilde{a}_{ij}$, $ij \in S$, які потенційно можуть бути розподілені на маршрут m_k ; $\dot{A}^k = \|\dot{a}_{ij}^k\|_{(\eta_k-1) \times \varepsilon_k}$, $\ddot{A}^k = \|\ddot{a}_{ij}^k\|_{\eta_k \times \varepsilon_k}$, $\dot{\ddot{A}}^k = \|\dot{\ddot{a}}_{ij}^k\|_{\eta_k \times \varepsilon_k}$ — підматриці, певним чином отримані з матриці $\tilde{A}$; $f^k = \|f_j^k\|_{\varepsilon_k}$, $f_j^k = h$, якщо потік з номером h в матриці $\tilde{A}$ може бути розподілений на маршрут m_k ; $W^k = \|w_i^k\|_{\eta_k-1}$, $B = \|b_i\|_n$, $B^k = \|b_i^k\|_{\eta_k}$, $k = \overline{1, l}$ — відповідні вектори обмежень; $\sum_{j=1}^{\varepsilon_k} \ddot{a}_{ij}^k x_{f_j^k}^k = \psi_{\varepsilon_i^k}^k$, $\sum_{j=1}^{\varepsilon_k} \dot{\ddot{a}}_{ij}^k x_{f_j^k}^k = \lambda_{\varepsilon_i^k}^k$, $i = \overline{1, \eta_k}$, $k = \overline{1, l}$; $\gamma_i^k = \sum_{j=1}^{\varepsilon_k} \dot{a}_{ij}^k x_{f_j^k}^k$, $i = \overline{1, \eta_k - 1}$, $k = \overline{1, l}$ — сумарний потік по дузі маршруту m_k ; індекси i' і j' потоків $\tilde{a}_{i',j'}$ визначають елементи $\tilde{a}_{ij}$ матриці $\tilde{A}$.

Обмеження на заборону розгалуження потоків (29) можна записати у вигляді

$$x_j^k = \begin{cases} 1, & \text{потік } \tilde{a}_{i',j'} \text{ з номером } j \text{ обрано на маршрут } m_k, \\ 0 & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (37)$$

Отже, в результаті перетворення задачі (22)-(29) її розв'язання звелось до деякої послідовності одночасного розв'язання l -багатовимірних задач про ранець (30) з блочними обмеженнями (32), (34) розмірністю $(\eta_k - 1) \times \varepsilon_k$ і $\eta_k \times \varepsilon_k$, зв'язуючими обмеженнями (31), (33) і обмеженнями (35), (37) і $t_{ij} \leq T_{ij}$, $ij \in S$.

Необхідність неодноразового (ітераційного) розв'язання задачі пов'язана з тим, що на одній ітерації всі потоки, задані матрицею $\tilde{A}$, можуть бути не розподілені по найкоротших шляхах через порушення будь-яких обмежень. В цьому випадку для нерозподілених потоків вибираються нові шляхи, відмінні від початкових, визначаються нові підмножини $\{u_{ij,k}^{\alpha\beta}\}$ і знову розв'язується ранцева задача з урахуванням резерву обмежень, якій залишився. Ітераційний процес триває до тих пір, поки на мережі не будуть розподілені всі потоки. Якщо все потоки розподілити не вдається через порушення окремих обмежень, то, за бажанням проектувальника, в інтерактивному режимі можуть бути введені ослаблення для всіх або окремих обмежень.

Отримана комбінаторна задача також є NP-складною, тому для її розв'язання в різних варіантах і режимах запропонований ряд алгоритмів, які істотно використовують специфіку структури задачі, абстрактні типи даних і прийоми, характерні для евристичних алгоритмів розв'язання багатовимірної задачі про ранець. Алгоритми дозволяють за прийнятний час отримати раціональні, з точки зору проектувальника мережі, розв'язки задачі.

У розглянутих математичних моделях задачі розподілу і маршрутизації потоків транспортних блоків обсяги та шляхи розподілу потоків зв'язуються з множиною шуканих «оптимальних» маршрутів транспортних засобів або каналів зв'язку. Така постановка задачі характерна при проектуванні нової або реконструкції існуючої мережі перевезень або мережі передачі даних. В цьому випадку для кожного визначеного в результаті розв'язку маршруту легко розрахувати необхідні витрати (наприклад, середньорічні приведені витрати) і отримати більш достовірну оцінку транспортних витрат для всієї мережі. Якщо транспортні послуги надаються сторонніми транспортними підприємствами (компаніями) або провайдером мережі передачі даних, то задача розподілу потоків спрощується, так як проектувати маршрути не потрібно і можна не враховувати обмеження (26) і (27), а в якості функцій транспортних витрат можна використовувати тарифи на перевезення або передачу одного транспортного блоку від відправника до одержувача. У другому підрозділі наведено формулювання задачі оптимізації розподілу потоків із заданими тарифами на дугах і у вузлах на транспортування та обробку потоків. Доведено, що задача з тарифами у мережевий постановці може бути за поліноміальний час перетворена до задачі цілочислового лінійного програмування з блочною структурою і зв'язуючими обмеженнями. Відзначаються особливості розв'язання перетвореної задачі при використанні відомих методів цілочислового програмування і пакетів прикладних програм.

У третьому підрозділі запропонована нова поліпшена версія SP2 матричного алгоритму SP1 побудови найкоротших шляхів (НШ) між усіма парами вузлів у неорієнтованій мережі за лексикографічним критерієм: мінімум дуг в шляху; мінімум довжини шляху. В алгоритмі SP2 на відміну від алгоритму SP1 застосовується ефективна техніка представлення абстрактних типів даних. Проведено аналіз складності алгоритмів і емпірично показано, що алгоритми SP1 і SP2, у міру збільшення щільності мережі, на кілька порядків швидше алгоритму Флойда — Floyd, відповідним чином модифікованого для знаходження найкоротших шляхів за ступінчастим кри-

терієм. У додатку Г до четвертого розділу наведено огляд і аналіз методів та алгоритмів побудови найкоротших шляхів.

Сутність задачі полягає в наступному. Задана проста неорієнтована мережа $G(N, P)$ з множиною вузлів N , $n = |N|$ і множиною дуг P , $p = |P|$. Кожній дузі $p_{kl} \in P$ поставлено у відповідність деяке число $r_{kl} > 0$, умовно зване її довжиною. Назвемо число дуг, які складають деякий шлях, рангом шляху. Потрібно побудувати НШ між усіма вузлами мережі, що задовольняють критерію: мінімум рангу шляху, за однакової кількості рангів — мінімум довжини.

Ідея запропонованих алгоритмів схожа з ідеєю алгоритму Беллмана-Шімбела і полягає в тому, що на кожній умовній l - ой ітерації будуються всі НШ в мережі з рангом до 2^l включно. При цьому на кожній наступній ітерації використовуються всі шляхи, побудовані на попередніх. Умовна ітерація містить три вкладених циклу за індексами $i, j, k, i, j, k = \overline{1, n}, i \neq j \neq k$.

Нехай кожному номеру $l, l = 0, 1, 2, \dots$ умовної ітерації алгоритму SP1 або SP2, поставлено у взаємно-однозначну відповідність множина $\{1 + 2^l, \dots, 2^{l+1}\}$ рангів шляхів. Назвемо цю відповідність таблицею рангів. Коректність алгоритмів впливає з наступних тверджень.

Лема 3. Нехай в алгоритмі SP1 або SP2 на l - ой ітерації допускається побудова шляхів з рангом більшим, ніж 2^l , тоді найкоротші шляхи будуть побудовані некоректно.

Теорема 5. На кожній умовній ітерації алгоритму SP1 або SP2 будуються всі найкоротші шляхи у мережі, відповідні таблиці рангів.

Нехай $S = \lceil \log_2 m \rceil$, де m — максимальний ранг шляху серед всіх найкоротших шляхів, побудованих у мережі.

Теорема 6. Час, необхідний алгоритму SP1 для побудови всіх найкоротших шляхів у мережі, зростає пропорційно функції $Sn^3 - n^2(3S + c) + 2n(S + c)$, де c — деяка константа.

Для алгоритмів SP1, Floyd і SP2 були розроблені також модифіковані алгоритми SP1S, FloydS і SP2S для випадку, коли матриця є симетричною.

На рис. 4, а і рис. 4, б наведені відповідно графіки зміни часу роботи алгоритмів SP1, Floyd, SP2 і SP1S, FloydS, SP2S в залежності від зростання ступеня вузлів від 2 до 999 для $n = 1000$. З графіків видно, що алгоритми SP1 і SP1S працюють швидше, ніж алгоритми Floyd і FloydS вже при ступені вузлів $val = 5$, а алгоритми SP2 і SP2S з ростом ступені вузлів значно випереджають алгоритми Floyd і FloydS. Для великих значень параметра val (від 200 до 999) алгоритми SP1, SP1S виявляються краще, ніж SP2, SP2S. Алгоритми SP2, SP2S завжди краще алгоритмів Флойда і з ростом ступеня вузлів швидше останніх в кілька разів.

У четвертому підрозділі проведено огляд та аналіз методів і алгоритмів побудови мінімального кістякового дерева на зважених графах і розглядаються дві реалізації алгоритму Краскала на списочних (запропонований алгоритм LINK) і деревовидних (алгоритм Тарьяна TREE) структурах даних. Отримано практична оцінка часової складності алгоритму LINK, яка для зв'язних графів становить $O(e)$, де e — кількість ребер графа. Шляхом численних експериментів на зв'язних і незв'язних, щільних і розріджених графах великої розмірності проведено порівняння обчислювальної ефективності алгоритмів LINK, TREE, і алгоритму Прима — PRIM в класичній матричній реалізації.

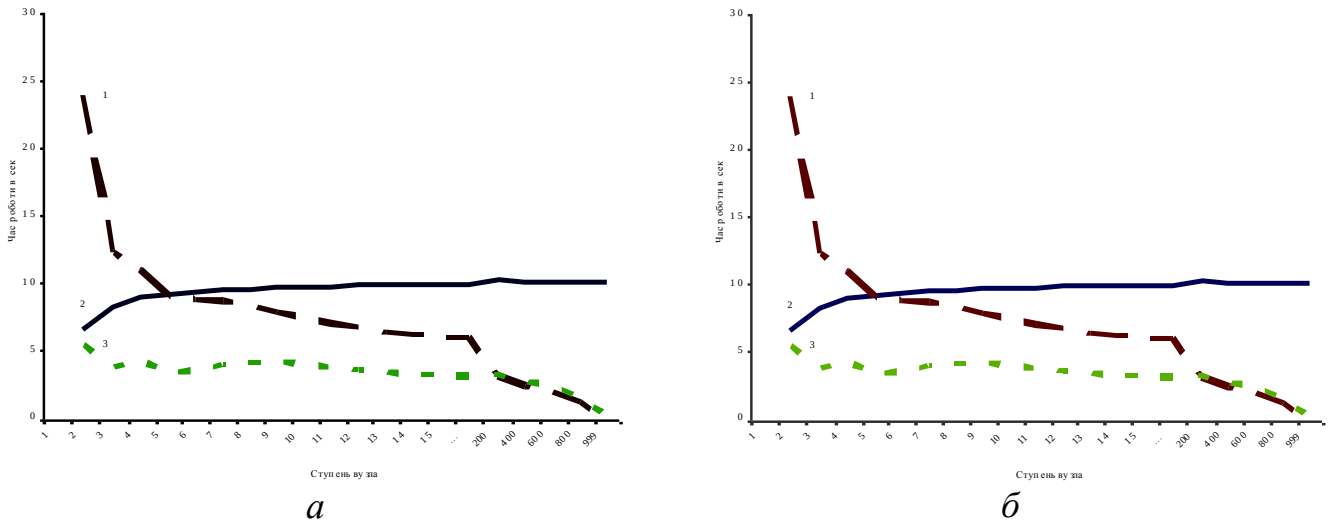


Рис. 4. Час роботи алгоритмів SP1(1), Floyd(2), SP2(3) — 4а і SP1S(1), FloydS(2), SP2S(3) — 4б у залежності від ступеня вузлів

Показано, що запропонований алгоритм LINK асимптотично краще алгоритму Прима для графів з кількістю ребер не більше ніж $0,27v^2$, де v — кількість вершин графа. Окремі результати експерименту для зв'язного графа який містить 11000 вершин при зміні ступеня вершин від 5 до 10999 показані на рис. 5.

Порівняння роботи алгоритмів на зв'язних графах

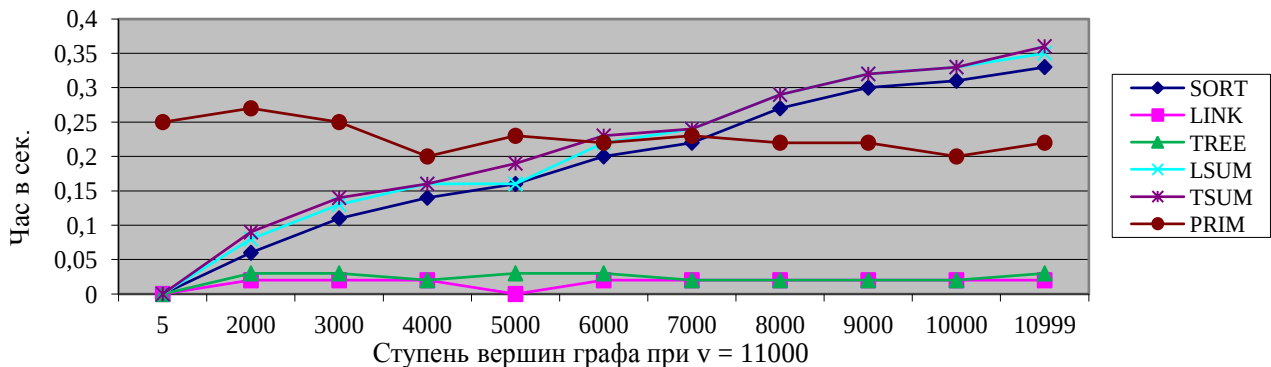


Рис. 5. Час побудови мінімального кістякового дерева різними алгоритмами

Для сильно розріджених графів швидкодія алгоритмів LINK і TREE з урахуванням часу сортування SORT ваг ребер методом bucket sort (перетворення ваги ребра на адресу оперативної пам'яті комп'ютера) може значно перевищувати швидкодію алгоритму Прима — в 15 і більше разів. В цілому, результати експериментальних досліджень проведених на графах, що містять від 499500 до 71994000 ребер, дозволяють стверджувати, що для розв'язання практичних задач знаходження мінімального або максимального кістякового дерева (лісу) алгоритми з списковою структурою даних працюють не гірше, а в більшості випадків швидше, ніж алгоритми з деревовидною структурою. У всіх прогонах алгоритм LINK виявлявся швидше алгоритму TREE, особливо на незв'язних графах.

У п'ятому підрозділі на основі запропонованих структур даних і евристичних підходів до розв'язання багатовимірної задачі про ранець розроблені методи та поліноміальні за складністю алгоритми розв'язання задачі розподілу і маршрутизації потоків транспортних блоків. Отримано оцінки часової складності алгоритмів. Алгоритми дозволяють отримати наближений розв'язок задачі за час

$$T_o = O(n^3) + O((l - lr)\eta_{cp}^2) + O(l^2(n + \eta_{cp}) + l\eta_{cp}) \text{ (або } O(l^2\eta_{cp})) + \\ + \gamma [O(n_g n^{4+\varepsilon}) + O[\lambda(e(e + \alpha) + Ke(e + \alpha)) + e \log e + K_1 e]].$$

де $O(n^3)$ — складність процедури генерації ліній зв'язку (шаблонів маршрутів), n — кількість вузлів в мережі, l — загальна кількість генерованих і заданих ліній зв'язку (маршрутів), η_{cp} — середня кількість вузлів в лінії зв'язку, lr — кількість редукованих ліній зв'язку, $O((l - lr)\eta_{cp}^2)$ — складність формування довідкової структури даних, $O(l^2(n + \eta_{cp}) + l\eta_{cp})$ — складність редукції по вузлах, $O(l^2\eta_{cp})$ — складність редукції по дугам, γ — число ітерацій розв'язання задачі вибору пропускних здатностей дуг, n_g — середня кількість частин в розгалуженому потоці, $\varepsilon \in [0, 0.3]$, $O[\lambda(e(e + \alpha) + Ke(e + \alpha)) + e \log e + K_1 e]$ — часова складність розв'язання задачі вибору пропускних здатностей дуг методом послідовного аналізу варіантів, e — кількість дуг в мережі, α — кількість різних дискретних пропускних здатностей дуг мережі, λ , K , K_1 — деякі константи.

Абстрактні типи даних для розробки алгоритмів розподілу і маршрутизації потоків і процедури редукції ліній зв'язку (маршрутів) розглянуті в додатку Д. Редукція дозволяє значно скоротити необхідні обсяги оперативної пам'яті для представлення структур даних при вирішенні задач проектування нових ліній зв'язку транспортування потоків, коли кількість шаблонів ліній зв'язку, що генеруються, дуже велика. Отримано оцінки складності алгоритмів редукції і формування довідкової структури даних. Розглянуто приклад побудови структур даних і проведено числовий експеримент для перевірки працездатності і обчислювальної ефективності запропонованих алгоритмів. У шостому підрозділі розглянуто числовий приклад проектування маршрутів для автотранспортної мережі перевезень.

У п'ятому розділі запропонована методика отримання вихідних даних для побудови динамічних моделей поетапного розвитку вузлів і транспортних маршрутів магістральної мережі, в основу якої закладено розв'язання задач оптимізації її структури та розподілу потоків. Запропоновану методику планується використовувати для побудови детермінованих і стохастичних моделей задач перспективного розвитку мережі при заданих величинах інвестицій за етапами розвитку і при їх обмеженому обсязі на кінцевий період планування і оцінки ризику вкладення інвестицій. На рис. 6 схематично показано взаємозв'язок задач поточного планування і перспективного розвитку. Також показано, яким чином можна використовувати задачі поточного планування для оперативного перерозподілу потоків у випадках утворення черг та відмов у вузлах і на лініях зв'язку. Задачі оперативного управління тісно пов'язані з дослідженням розв'язків задач поточного планування на стійкість і проведенням постоптимального аналізу і реоптимізації цих розв'язків при збуренні вихідних даних, а також з параметричним розв'язуванням задач поточного планування. У реальних мережах вихідні дані і параметри змінюються в часі, а багатьом факторам, що впливають на процеси обробки і транспортування потоків, властива невідомість. Тому виникає необхідність багаторазового розв'язання задач оптимізації в умовах, які динамічно змінюються.

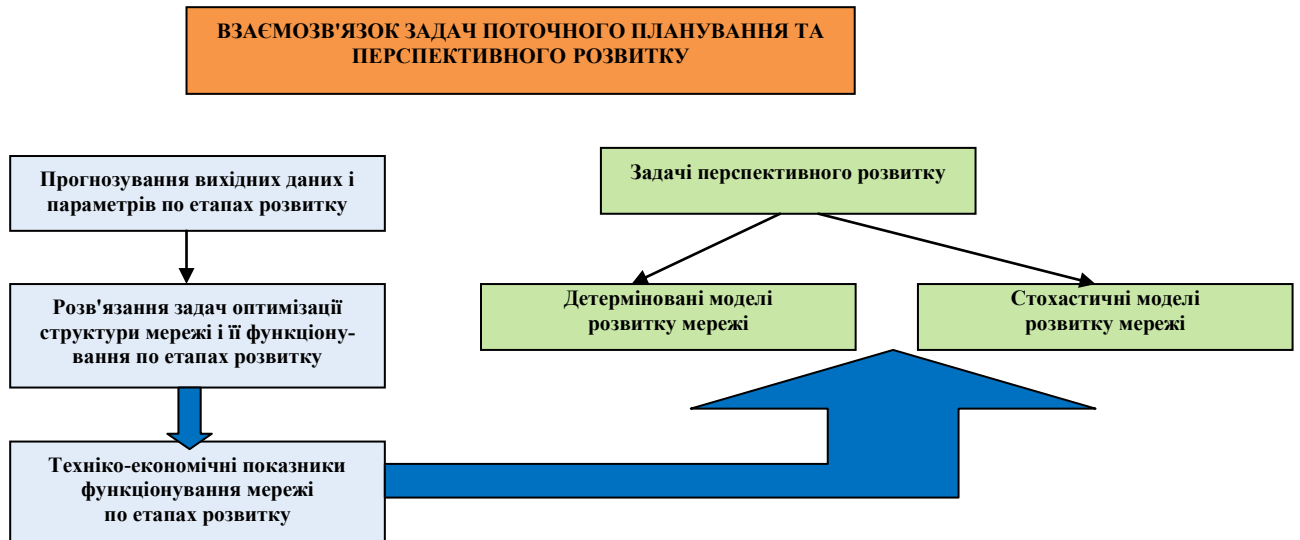


Рис. 6

На рис. 7 наведено загальна схема взаємодії задач поточного планування і оперативного управління на магістральному рівні мережі. Якщо мережа функціонує в штатному режимі, то по заданих границях зміни значень контрольованих параметрів здійснюється спостереження за процесами обробки і розподілу потоків у мережі. До основних контрольованих параметрах можна віднести: сумарні потоки дрібнопартійних кореспонденцій і транспортних блоків у вузлах мережі, обсяги необроблених потоків, середні коефіцієнти завантаження транспортного блоку і ліній зв'язку, середній час доставки кореспонденцій одержувачу. За бажанням проектувальника можуть бути визначені й інші критичні параметри стану мережі.

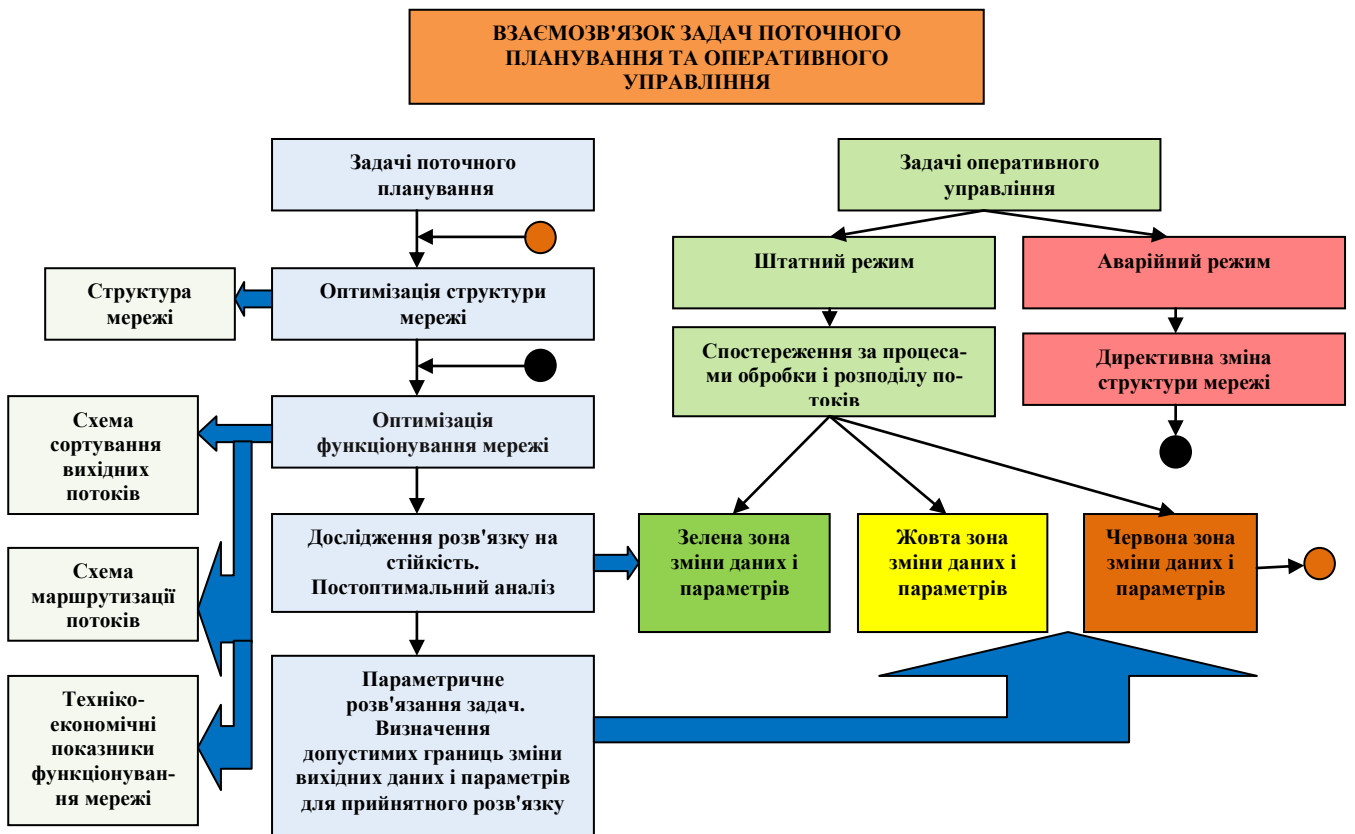


Рис. 7

Шкала допустимих значень критичних параметрів розбита на три зони — зелену, жовту і червону. Якщо всі значення параметрів знаходяться в зеленій зоні, то приймається, що мережа функціонує нормально. Жовта зона визначає граничні значення параметрів, при яких ще допускається функціонування мережі, але потрібно повторне розв'язання задачі вибору структури мережі і визначення схем сортування, розподілу і маршрутизації потоків. За результатами повторного розв'язання задач поточного планування можна оцінити відхилення повних витрат і витрат на обробку і транспортування потоків від допустимих границь їх зміни для роботи мережі в штатному режимі (в зеленій зоні). Якщо виявиться, що отримані після моделювання витрати перевищують допустимі границі, то необхідно фактично перебудовувати поточні схеми обробки і транспортування потоків. Повторне розв'язання задач поточного планування може знадобитися не тільки при перевищенні верхніх допустимих границь зміни контрольованих параметрів, а й при зменшенні нижніх границь. Так, наприклад, падіння потоків у вузлах мережі і зменшення нижче норми коефіцієнтів завантаження транспортних блоків і ліній зв'язку, також вимагає оперативного втручання і повторного розв'язання всього комплексу задач.

Головним критерієм для вибору границь в контрольованій трьох-зонній шкалі параметрів є допустиме відхилення значення цільової функції від її «оптимального» значення при збуреннях вихідних даних і параметрів вирішуваних задач. Границі допустимої зміни цільової функції встановлюються проектувальником мережі і можуть змінюватися, наприклад, в залежності від поточного фінансового стану транспортного підприємства.

У разі переходу мережі в аварійний режим, коли з різних причин виникають відмови в вузлах і на лініях зв'язку, задачі поточного планування повинні бути вирішені негайно і отримані нові техніко-економічні показники функціонування мережі в аварійному режимі.

У додатку Е наведені результати обчислювального експерименту, що показують як можна використовувати розв'язання задач поточного планування для перспективного розвитку вузлів і транспортних ліній зв'язку магістральної мережі і оперативного перерозподілу потоків при виникненні позаштатних ситуацій.

Шостий розділ присвячений практичній реалізації і дослідженню розв'язання задач поточного планування у магістральній мережі. У першому підрозділі запропонована методика розв'язання задач поточного планування, яка дозволяє в інтерактивному режимі здійснювати вибір ієрархічної структури мережі і визначати основні техніко-економічні показники її функціонування при зміні вихідних даних і параметрів. У другому і третьому підрозділах наводиться опис комп'ютерних програм (технологій) для моделювання ієрархічної структури, схеми сортування, розподілу і маршрутизації потоків. Розглядаються числові приклади розв'язання окремих задач. У четвертому підрозділі наведені результати моделювання автотранспортної мережі, що містить 120 магістральних вузлів. Комп'ютерні програми включені до складу інструментальних програмних засобів ІАС ППР, яка розробляється в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України.

На рис. 8 показано головна форма демонстраційної версії програми розв'язання задачі упаковки і вибору структури мережі, в яку вводяться вихідні дані. У ній можна вибрати різні варіанти роботи програми і вказати, чи потрібно оптимізувати

структуру мережі в автоматизованому режимі або вводити типи вузлів і зони їх обслуговування вручну, використовувати в алгоритмах розв'язання задачі функції витрат чи ні. Після старту програми з'являється діалогова форма (рис. 9).

Program of optimization of structure of a network and scheme of sorting of flows

☒ To output the protocol of work of the program? ☒ To enter nodes of 3 types?
☒ Optimize a structure of network? ☒ To use functions of expenses?

Enter basic data of a network:

12	Number of nodes in a network:	1.9,0	Scale of change of value of flows for nodes of 1 type
3	Number of outgoing of arcs from each node of a network:	1.5,0	Scale of change of value of flows for nodes of 3 type
80,300	Scale of change of lengths of arcs of a network in km through a comma, for example - 80,300		
500,500	Scale of change of restrictions on capacities of nodes through a comma, for example - 500,500		
15,15	Scale of change of restrictions on time-delivery through a comma, for example - 10,10		
15	Capacity of the transport block (virtual container):	20,0	Cost of the transport block (virtual container):
10	Maximum a loading capacity of the vehicle or a communication channel capacity	80,0	Average speed of vehicles in km/h or of transfer on a communication channel: 25000 of km/s
1,0	Given time of processing of initial flows in network node	0,5	A time on a transit overload of transport blocks in network node
1,0	Coefficient of forecasting of flows	10	Maximum number of merges of flows

2

Рис. 8

Dialogue window with the program

PROGRAM MESSAGE BOX

In total were generated of nodes of the third type: 5

☒ To consider restrictions on capacity of nodes?
☒ To consider restrictions on time-delivery of flows?

Change at need of value of the following parameters:

	Capacity of the transport block		Maximum a loading capacity of the vehicle or a communication channel capacity
	Average speed of vehicles or of transfer on a communication channel: 25000 of km/s		Given time of processing of initial flows in network node
	A time on a transit overload of transport blocks in network node		Current number of merges of flows
	Coefficient of forecasting of flows		Maximum number of merges of flows

☒ Critical parameters were changed? Mode of a conclusion of messages and data of program (1,2,3)

☒ Optimization variant is final?
 Mode of a conclusion of data after optimization (1,2,3)

Рис. 9

На формі розташовані: вікно для виведення інформаційних повідомлень і повідомлень, які потребують відповіді; покажчики врахування обмежень на пропускні спроможності вузлів, час доставки кореспонденцій одержувачу, зміни ключових (критичних) параметрів і вибору остаточного варіанта розв'язку задачі. До ключових параметрів відносяться ω , w_{ξ} , V_{av} (середня швидкість руху транспортних засобів), T_a (заданий час на сортування дрібнопартійних кореспонденцій), T_b (заданий час на транзитне перевантаження транспортних блоків), K_p (коефіцієнт прогнозування потоків). Не ключовими параметрами є поточне v і максимально допустима $v_{\max}$ кількість транзитних об'єднань потоків кореспонденцій, режим виведення повідомлень і результатів розв'язку задачі. Значення всіх змінних параметрів заносяться до відповідних вікон форми. Для вибору режиму виведення результатів остаточного варіанту розв'язання задачі використовується вікно в нижній частині форми. Всі вихідні дані виводяться в два набори даних outlopt і outl і відображаються на екрані комп'ютера за допомогою системної програми WordPad. У форму outlopt виводяться обрана структура мережі і основні техніко-економічні показники її функціонування. У форму outl для кожного вузла мережі у відредагованому вигляді виводиться схема сортування потоків кореспонденцій і формування потоків транспортних блоків.

Якщо задача вибору структури розв'язується для транспортної мережі, то в початок форми outl додатково виводяться результати розв'язання задачі балансування матриці контейнерних потоків, що виникає через порушення умов балансу — рівності суми вихідних і вхідних контейнерів в окремих вузлах мережі. Балансування матриці виконується при розв'язанні задачі розвезення порожніх контейнерів.

На рис. 10 показано головна форма демонстраційної програми розподілу і маршрутизації потоків транспортних блоків. Всі вихідні дані програми вводяться з наборів даних, що зберігають результати розв'язання задачі вибору структури мережі і

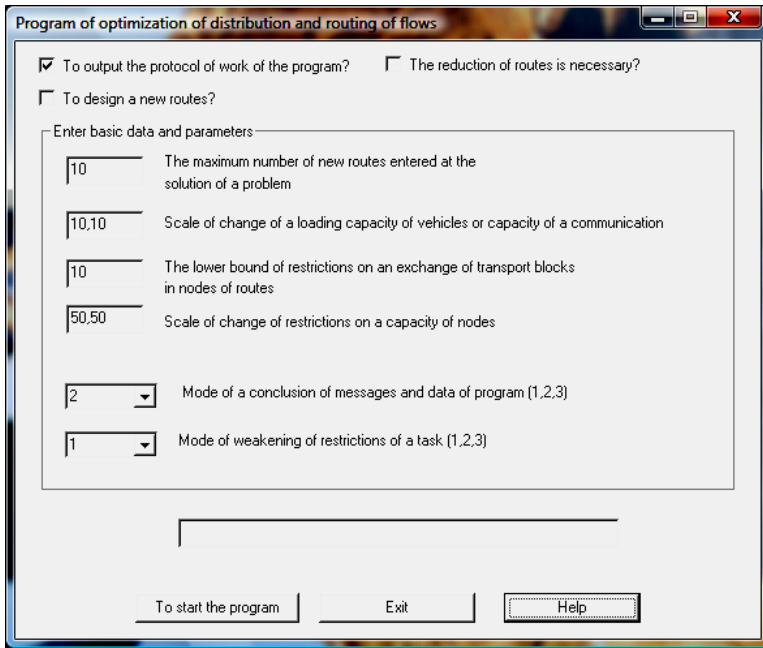


Рис. 10

Задача може вирішуватися при ручному проектуванні маршрутів і в автоматизованому режимі, коли маршрути генеруються в процесі розв'язання. Для автоматизованого режиму (відзначено поле «проектувати нові маршрути») у вікнах головної форми можна вказати нижню і верхню границі значень $W_{\eta\xi}^k$, нижню границю значень b_{α}^k (верхня границя дорівнює $2W_{\eta\xi}^k$) для проєктованих маршрутів і нижню і верхню границі для b_{β} . Так як в автоматизованому режимі генерується велика кількість шаблонів маршрутів, то можна відзначити поле «потрібна редукція маршрутів» для економії використовуваної оперативної пам'яті комп'ютера. При проектуванні маршрутів в ручному режимі відкривається вікно для введення маршрутів і їх характеристик. Для обох режимів можна вказати максимальну кількість маршрутів що вводяться при неможливості розподілу всіх потоків при заданих обмеженнях, вибрати умови ослаблення обмежень і параметр виводу результатів розв'язання задачі. Якщо умови ослаблення рівні одиниці, то всі порушені обмеження в процесі розв'язування будуть автоматично послаблюватися, якщо вони рівні двом, програма виводить запит на дозвіл ослаблення кожного обмеження, якщо умови рівні трьом — ослаблення обмежень заборонені. У нижній частині головної форми розташовані вікно для виведення поточних повідомлень програми і кнопки активізації дій.

Після установки потрібних параметрів і старту програми з'являється діалогова

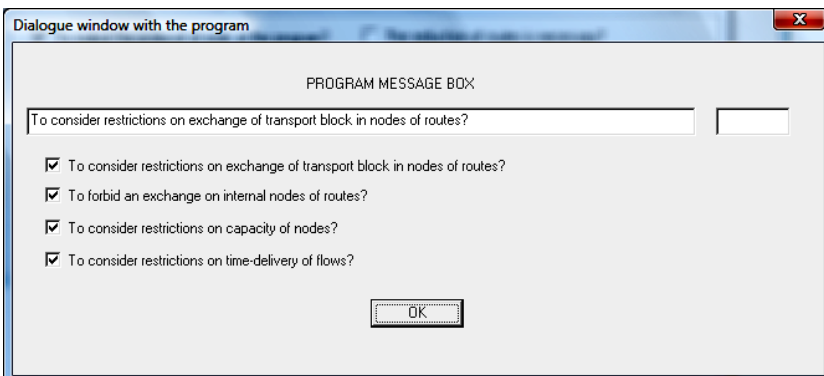


Рис. 11

схеми сортування потоків кореспонденцій. Вводяться вихідна і перетворена матриці потоків кореспонденцій $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$ і $A' = \|a'_{ij}\|_{n \times n}$, довідкова матриця об'єднання потоків $C = \|c_{ij}\|_{n \times n}$, матриця потоків транспортних блоків $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{ij}\|_{n \times n}$, матриця попередніх оцінок часу доставки $T = \|T_{ij}\|_{n \times n}$ і інша інформація, отримана після розв'язання задачі вибору структури мережі і необхідна для розв'язання задачі розподілу і маршрутизації потоків.

форма (рис. 11). На формі розташовані вікно для виведення інформаційних повідомлень і повідомлень, що вимагають відповіді і поля з прапорцями показниками врахування обмежень. Всі вихідні дані виводяться в три набори даних out1opt, out1 і out2 і відображаються на екрані комп'ютера за

допомогою системної програми WordPad. У форму out1opt виводяться основні техніко-економічні показники функціонування мережі, отримані в результаті розв'язання задачі вибору її структури. У форму out1 для кожного вузла мережі у відредагованому вигляді виводиться схема сортування потоків кореспонденцій і формування потоків транспортних блоків. У формі out2 наводяться схема сортування потоків кореспонденцій з остаточними оцінками часу доставки кореспонденцій одержувачам і результати розв'язання задачі розподілу і маршрутизації потоків транспортних блоків. Результати розв'язання містять техніко-економічні показники функціонування мережі і повну інформацію про шляхи транспортування потоків на оптимізованих маршрутах.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є закінченим науковим дослідженням, присвяченим вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми створення методології математичного моделювання та проектування багатопродуктових комунікаційних мереж з дискретними потоками. При виконанні досліджень в дисертаційній роботі отримані наступні основні науково-технічні результати.

1. Розроблено теоретичні та методологічні основи побудови та аналізу функціонування багатопродуктових ієрархічних мереж з дискретними параметрами і дрібнопартійними дискретними потоками кореспонденцій, в тому числі: концепції, принципи та критерії обробки і розподілу потоків, методологія синтезу та аналізу багаторівневої структури мережі. Визначено основні принципи та технологія організації сортування і транспортування потоків у зонально-вузловій структурі мережі. На відміну від існуючих підходів, запропонована методологія ґрунтується на комплексному вирішенні завдань довгострокового, поточного і оперативного планування та управління і дозволяє логічно пов'язати процеси обробки потоків у вузлах мережі з їх подальшим розподілом у мережі та доставкою одержувачам і при заданих обмеженнях підвищити економічну ефективність функціонування і розвитку транспортної системи в цілому за рахунок зниження приведених витрат у вузлах і на транспортних маршрутах.

2. Для управління нелінійними і нестационарними процесами обробки і розподілу потоків у мережі запропоновано концептуальний підхід до побудови багаторівневої ІАС ППР, яка ґрунтується на технологіях обробки просторових даних і геоінформаційних систем та функціонує в режимі реального часу.

3. Визначено основні задачі поточного планування, що становлять методологічну основу – ядро для вирішення завдань оперативного управління процесами обробки і розподілу потоків, а також для вирішення завдань перспективного розвитку мережі. Показано взаємозв'язок завдань поточного планування із завданнями оперативного управління і перспективного розвитку.

4. Запропоновано основні принципи та схеми організації перевезень у внутрішніх зонах магістральних вузлів і визначені технічні та економічні особливості реальних транспортних процесів обробки і транспортування дрібнопартійних вантажів, які повинні бути враховані при формуванні цільових функцій математичних моделей задач маршрутизації на рівнях довгострокового і поточного планування та оперативного управління. На підставі проведеного огляду і аналізу відомих математичних моделей розроблено кілька варіантів математичних постановок задачі проекту-

вання постачальних, складальних і комбінованих маршрутів транспортних засобів для перевезення дрібнопартійних вантажів. Для розв'язання поставлених задач можуть бути застосовані точні, евристичні і метаевристичні методи та алгоритми, реалізовані в багатьох комерційних і некомерційних пакетах програм змішаного і цілочислового лінійного програмування.

5. На підставі доведених тверджень запропоновані спосіб та ефективні алгоритми побудови довідкової матриці об'єднання дрібнопартійних потоків і, що дозволяють визначати вузли об'єднання і об'єднані потоки для всіх пар вузлів, що кореспондуються в багатопродуктовій мережі. Доведена NP-повнота задачі оптимізації упаковки, яка використовується при сортуванні, та упаковки дрібнопартійних вантажів у контейнери у транспортних мережах або об'єднанні повідомлень у віртуальні контейнери в мережах передачі даних. Отримала подальший розвиток математична модель задачі оптимізації упаковки з функціями витрат, розроблено метод та ряд евристичних алгоритмів її розв'язання і доведена збіжність алгоритмів до локального мінімуму за поліноміальний час. Отримано оцінки часової складності алгоритмів. Проведені експериментальні дослідження розроблених алгоритмів довели їх обчислювальну ефективність при розв'язанні практичних задач на мережах великої розмірності.

6. Доведено, що на етапі розв'язання задачі упаковки немає необхідності розв'язувати дискретну задачу вибору пропускних спроможностей дуг, а нелінійна функція транспортних витрат може бути замінена на функцію питомої вартості транспортування транспортних блоків від відстані і вантажопідйомності транспортних засобів або пропускної здатності ліній зв'язку. Це доводять результати числового моделювання. Показано, що задача вибору пропускних спроможностей може бути розв'язана незалежно після розв'язання задачі упаковки і використовуватися при розв'язанні задачі розподілу і маршрутизації транспортних блоків.

7. Доведено, що задача вибору пропускних спроможностей дуг, сформульована як задача розпізнавання, є NP-повною. Наведено поліноміальне перетворення вихідної постановки задачі до задачі про ранець з мультिवибором і булевими змінними, для розв'язання якої запропоновано два псевдополіноміальних алгоритми, заснованих на апроксимації дискретних функцій витрат лінійними та на методі послідовного аналізу варіантів.

8. Запропоновано математичну модель і евристичний метод вирішення задачі вибору ієрархічної структури магістральної мережі, заснований на застосуванні алгоритмів упаковки і розподілу потоків у зональних мережах. Експериментально показано, що вибір структури мережі слабо залежить від пропускних здатностей її дуг і їх можна не враховувати при розв'язанні задачі.

9. Отримала подальший розвиток математична модель задачі розподілу і маршрутизації потоків транспортних блоків з упакованими дрібнопартійними кореспонденціями. Запропоновано метод зведення розв'язання вихідної нелінійної багатоекстремальної дискретної задачі до послідовного розв'язання деякої сукупності лінійних багатовимірних задач про ранець зі зв'язуючими обмеженнями і обмеженнями на час доставки дрібнопартійних кореспонденцій одержувачу і середній час затримки потоків. На основі ефективних структур представлення даних розроблено методи та поліноміальні за складністю алгоритми розв'язання перетвореної задачі, які можуть працювати в інтерактивному режимі, і допускають можливість параметричного завдання прямих час-

тин всіх обмежень і їх ослаблення у процесі розв'язування за неможливості розподілу потоків. Отримано оцінки часової складності алгоритмів. Доведено, що при формулюванні початкової задачі у вигляді задачі із заданими тарифами на дугах і у вузлах, вона може бути за поліноміальний час перетворена до задачі цілочислового лінійного програмування, для розв'язання якої можна застосовувати відомі методи і пакети програм цілочислового програмування.

10. Розроблена поліпшена версія раніше запропонованого автором алгоритму побудови всіх найкоротших шляхів у мережі за лексикографічним критерієм: мінімум дуг в шляху; мінімум довжини шляху. Доведено, що час роботи нового алгоритму може бути скорочено за рахунок застосування абстрактних типів даних і зменшення перегляду вузлів у внутрішніх циклах. Емпірично показано, що покращений алгоритм на розріджених мережах працює швидше раніше запропонованого, і при збільшенні щільності мережі на кілька порядків перевищує за швидкістю роботи алгоритм Флойда, модифікований для побудови двокритеріальних шляхів.

11. Розроблено ефективна реалізація алгоритму Краскала для знаходження кістякового дерева мінімальної (максимальної) ваги для зв'язного неорієнтованого графа з практичною часовою складністю $O(e)$, де e — кількість ребер графа. На підставі проведених експериментальних досліджень отримана оцінка порівнянності швидкодії запропонованого алгоритму з алгоритмом Прима, з якої випливає, що для зв'язних графів запропонований алгоритм краще алгоритму Прима при $e \leq 0,27v^2$, де v — кількість вершин графа. Експериментальне порівняння швидкодії алгоритму Краскала із списковою і деревовидною структурою даних показало, що алгоритми із списковою структурою на практиці працюють швидше, ніж алгоритми з деревовидною структурою як на зв'язних, так і на незв'язних графах.

12. Запропоновано методику отримання вихідних даних для побудови динамічних моделей поетапного розвитку вузлів і транспортних маршрутів магістральної мережі, яка заснована на розв'язанні задач поточного планування. Методику пропонується використовувати для побудови детермінованих і стохастичних моделей задач перспективного розвитку транспортної системи при заданих величинах інвестицій за етапами розвитку і на кінцевий період планування з урахуванням ступеня ризику їх вкладення. Розроблено методику та схему прийняття оперативних рішень у ІАС ППР щодо стабілізації роботи магістральної мережі при перерозподілі потоків у випадках введення директивних обмежень на ієрархічну структуру і ресурси мережі, відмови окремих вузлів і ліній зв'язку, непередбачуваних ситуацій і стихійних лих.

13. Розроблені комп'ютерні технології та інструментальні програмні засоби призначені для математичного (комп'ютерного) моделювання функціонування комунікаційних мереж з дискретними дрібнопартійними потоками в інфраструктурних комплексах великих міст, регіонів і країни в цілому. Вони можуть бути використані для вирішення завдань поточного планування і управління в транспортних мережах, магістральних мережах передачі даних, мобільного і поштового зв'язку та ін., а також для вирішення завдань оперативного управління і перспективного розвитку та дозволяють підвищити розрахункову ефективність функціонування проєктованих комунікаційних мереж.

Розроблений інструментарій може бути також використаний для моделювання та оптимізації функціонування традиційних логістичних виробничих і транспортно-складських систем, що включають вузли постачальників сировини, виробництва товарів,

склади і кінцевих споживачів. Крім того, отримані результати роботи можуть бути корисні в навчальному процесі при підготовці фахівців у галузі розробки і проектування складних розподілених багатопродуктових мереж з дискретними потоками.

Результати роботи дозволяють намітити напрямки подальших досліджень: розробку динамічних детермінованих і стохастичних моделей, методів і алгоритмів для вирішення задач перспективного розвитку ієрархічних багатопродуктових мереж з обмеженнями на ресурси і можливості їх освоєння з урахуванням ступеня ризику вкладення інвестицій; розвиток методології дослідження стійкості, реоптимізації, постоптимального аналізу одержаних розв'язків задач поточного і довгострокового планування і параметричного розв'язання цих задач.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Васянин В.А. Задачи построения комбинированных и отдельных маршрутов перевозки мелкопартионных грузов во внутренних зонах иерархической автотранспортной сети / В. А. Васянин // Математичне моделювання в економіці. – 2017. – № 1–2. – С. 74–92.
2. Васянин В.А. Задачи построения доставочных и сборочных маршрутов перевозки мелкопартионных грузов во внутренних зонах иерархической автотранспортной сети / В.А. Васянин, Л.П. Ушакова // Математичне моделювання в економіці. – 2016. – № 3–4. – С. 102–131.
3. Васянин В.А. Экономико-математические модели задачи распределения потоков в многопродуктовой коммуникационной сети / В.А. Васянин, А.Н. Трофимчук, Л.П. Ушакова // Математичне моделювання в економіці. – 2016. – № 2. – С. 5–21.
4. Васянин В.А. Компьютерное моделирование распределения и маршрутизации дискретных многопродуктовых потоков в коммуникационной сети / В.А. Васянин // Управляющие системы и машины. – 2016. – № 3. – С. 43–53.
5. Трофимчук А.Н. Компьютерное моделирование иерархической структуры коммуникационной сети с дискретными многопродуктовыми потоками / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин // Управляющие системы и машины. – 2016. – № 2. – С. 48–57.
6. Трофимчук А.Н. Алгоритмы оптимизации упаковок мелкопартионных корреспонденций в коммуникационных сетях / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин, В.Н. Кузьменко // Кибернетика и системный анализ. – 2016. – Т. 52. – № 2. – С. 93–106.
7. Трофимчук А.Н. О сложности одной задачи оптимизации упаковок / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин, В.Н. Кузьменко // Кибернетика и системный анализ. – 2016. – Т. 52. – № 1. – С. 83–92.
8. Трофимчук А.Н. Время работы алгоритма Краскала с древовидной и списочной структурой данных / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2015. – № 3. – С. 48–61.
9. Васянин В.А. Балансировка матрицы контейнерных потоков в задаче перевозки мелкопартионных грузов / В.А. Васянин, Л.П. Ушакова // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць. – Київ, 2015. – Вип. 17. – С. 98–115.
10. Trofimchuk A.N. Simulation of Packing, Distribution and Routing of Small-Size Discrete Flows in a Multicommodity Network / A.N. Trofimchuk, V.A. Vasyanin // Journal of Automation and Information Sciences. – 2015. – Vol. – 47. – Issue 7. – P. 15–30.
11. Vasyanin V.A. Problem of Distribution and Routing of Transport Blocks with

Mixed Attachments and Its Decomposition / V.A. Vasyanin // Journal of Automation and Information Sciences. – 2015. – Vol. – 47. – Issue 2. – P. 56–69.

12. Васянин В.А. Структуры данных и процедуры редукции маршрутов в задачах распределения потоков в коммуникационных сетях / В.А. Васянин, Л.П. Ушакова // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць. – Київ, 2014. – Вип. 14. – С. 192–205.

13. Васянин В.А. Справочная матрица слияния потоков в задачах оптимизации упаковок на многопродуктовых сетях / В.А. Васянин // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2014. – № 3. – С. 42–49.

14. Васянин В.А. Двухкритериальный лексикографический алгоритм построения всех кратчайших путей в сети / В.А. Васянин // Кибернетика и системный анализ. – 2014. – № 5. – С. 122–131.

15. Трофимчук А.Н. Методика решения задачи оптимизации упаковок для управления перспективным развитием узлов коммуникационной сети / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин // Кибернетика и системный анализ. – 2014. – № 4. – С. 88–99.

16. Васянин В.А. Линейные целочисленные модели распределения потоков в задачах проектирования и анализа многопродуктовых коммуникационных сетей / В.А. Васянин, А.Н. Трофимчук // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць. – Київ, 2013. – Вип. 12. – С. 147–165.

17. Васянин В.А. Обобщенная задача упаковки и распределения мелкопартионных потоков в многопродуктовых иерархических сетях и ее последовательная декомпозиция / В.А. Васянин // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць. – Київ, 2012. – Вип. 11. – С. 136–154.

18. Васянин В.А. Задача выбора иерархической структуры многопродуктовой коммуникационной сети с мелкопартионными дискретными потоками / В.А. Васянин, А.Н. Трофимчук // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць. – Київ, 2012. – Вип. 10. – С. 182–204.

19. Васянин В.А. Выбор пропускных способностей дуг при оптимизации упаковок мелкопартионных потоков в многопродуктовых коммуникационных сетях / В.А. Васянин, А.Н. Трофимчук // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць. – Київ, 2012. – Вип. 9. – С. 181–200.

20. Васянин В.А. Модели и алгоритмы распределения дискретных многопродуктовых потоков в зональных сетях иерархических структур / В.А. Васянин // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць. – Київ, 2011. – Вип. 8. – С. 176–190.

21. Васянин В.А. Автоматизация процессов принятия решений в многопродуктовых коммуникационных сетях с мелкопартионными дискретными потоками / В.А. Васянин, А.Н. Трофимчук // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць. – Київ, 2010. – Вип. 5. – С. 172–213.

22. Васянин В.А. О вычислительной эффективности одного алгоритма для нахождения остовного леса графа с минимальным (максимальным) весом / В.А. Васянин // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць. – Київ, 2009. – Вип. 4. – С. 155–169.

23. Васянин В.А. Сравнительная эффективность алгоритмов оптимизации упаковок в мультипоточковых сетях / В.А. Васянин // Дискретные системы управления: Сб. науч. тр. – Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова АН УССР, 1988. – С. 36–45.

24. Трофимчук А.Н. Задача выбора пропускных способностей дуг при распределении потоков в многопродуктовых коммуникационных сетях [Электронный ресурс]: / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин // Відділ методів негладкої оптимізації - 2017: науковий семінар (31 січня 2017 р.). – Київ: Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2017. – Режим доступа <http://www.icyb.kiev.ua/s/412/ua/>.

25. Трофимчук А.Н. Задача распределения потоков в многопродуктовой сети с заданными тарифами на дугах / А.Н. Трофимчук, Л.П. Ушакова, В.А. Васянин // Тези VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології 2016», 22–23 квітня 2016 р., Житомир: тези доповідей – Житомир, Україна: Житомирський державний технологічний університет, 2016. – С. 93–94.

26. Трофимчук А.Н. Компьютерная технология моделирования иерархической структуры сети с дискретными потоками / А.Н. Трофимчук, Л.П. Ушакова, В.А. Васянин // Modelare matematică, optimizare și tehnologii informaționale: Materialele Conferinței Internaționale, Volumul II, Chișinău, 22–25 martie 2016 / red. resp.: Dumitru Solomon; col. red.: Dumitru Lozovanu [et al.]. – Chișinău: Evrica, ATIC, 2016 (Tipogr. AȘM). – Vol. 2. – P. 354-365. – Antetit.: Academia de Transporturi, Informatică și Comunicații.

27. Васянин В.А. О балансировке контейнеропотоков в транспортных сетях с мелкопартионными грузами / В.А. Васянин, Л.П. Ушакова // Sisteme de transport și logistică: Materialele Conferinței Internaționale, Chișinău, 27-30 octombrie 2015 / red. resp.: Dumitru Solomon; col. red.: Dumitru Gortolomei [et al.]. – Chișinău: Evrica, ATIC, 2015 (Tipogr. AȘM). – P. 347-359. – Antetit.: Academia de Transporturi, Informatică și Comunicații.

28. Трофимчук А.Н. Информационные технологии поддержки принятия решений в коммуникационных сетях с дискретными потоками / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин // 14 Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях», Київ, Пуща-Водиця, 5–9 жовтня 2015 р. – Київ, 2015. – С. 64-70.

29. Trofymchuk O. On complexity of one variety of the packing problem / O. Trofymchuk, L. Ushakova, V. Vasyanin // VI International Conference on Optimization Methods and Applications «Optimization and applications» (OPTIMA-2015) held in Petrovac, Montenegro, September 27 - October 3, 2015, Petrovac, Montenegro: Proceedings. – Moscow, Russia: ESC Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Russia, 2015. – P. 175–176.

30. Трофимчук А.Н. О вычислительной эффективности алгоритма Краскала со списочной и древовидной структурой данных / А. Н. Трофимчук, Л. П. Ушакова, В. А. Васянин // Інформатика та системні науки (ІСН-2015): матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної конференції за міжнародною участю, (м. Полтава, 19-21 берез. 2015 р.). – Полтава: ПУЕТ, 2015. – С. 349–350. <http://dspace.puet.edu.ua/handle/123456789/2458>

31. Трофимчук А.Н. Задачи текущего планирования процессов обработки и распределения мелкопартионных потоков в коммуникационных сетях в автоматизированной информационно-аналитической системе поддержки принятия решений / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин // VIII Всероссийская научная конференция с международным участием «Математическое моделирование развивающейся экономики, экологии и технологий (ЭКОМОД-2014)», посвященная 80-летию академика А.А. Петрова и 100-летию академика Г.С. Поспелова, 21–24 октября 2014 г., Москва, ВЦ РАН: тезисы докладов, 2014. – С. 84.

32. Trofimchuk A.N. Management and decision making in hierarchical communication networks with discrete flows / A.N. Trofimchuk, L.P. Ushakova, V.A. Vasjanin // V International Conference on Optimization Methods and Applications «Optimization and applications» (OPTIMA-2014) held in Petrovac, Montenegro, September 28 – October 4, 2014, Petrovac, Montenegro: Proceedings. – Moscow, Russia: ESC Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Russia, 2014. – P. 187–188.

33. Трофимчук А.Н. Линейные модели распределения целочисленных многопродуктовых потоков в коммуникационных сетях / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин // Materials of the International Scientific - Practical Conference «Information Control systems and Technologies» (ICST-ODESSA-2014), September 23-25, 2014, Odessa: Proceedings. – Odessa, Ukraine: ESC “ONMU”, 2014. – P. 207–210.

34. Васянин В.А. Структуры данных в задачах оптимизации упаковок мелкопартионных потоков в коммуникационных сетях / В.А. Васянин // Тези VII Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології 2014», 29-30 Травня 2014 р., Житомир: тези доповідей – Житомир, Україна: Житомирський державний технологічний університет, 2014. – С. 7–10.

35. Трофимчук А.Н. Об одном подходе к декомпозиции задачи распределения и маршрутизации мелкопартионных потоков в многопродуктовой сети / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин // 16-th International conference on System Analysis and Information Technologies (SAIT2014), May 26–30, 2014, Kyiv: Proceedings. – Kyiv, Ukraine: ESC “IASA” NTUU “KPI”, 2014. – P. 162.

36. Трофимчук А.Н. О перспективном развитии узлов и оперативном перераспределении потоков в многопродуктовой транспортной сети / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин // Modelare matematică, optimizare și tehnologii informaționale: Materialele Conferinței Internaționale, Chișinău, 25-28 martie 2014 / red. resp.: Dumitru Solomon; col. red.: Dumitru Gortolomei [et al.]. — Chișinău: Evrica, ATIC, 2014 (Tipogr. AȘM). — P. 472-484. — Antetit.: Academia de Transporturi, Informatică și Comunicații.

37. Васянин В.А. Редукция маршрутов и структуры данных в задачах распределения потоков / В.А. Васянин, Л.П. Ушакова // Modelare matematică, optimizare și tehnologii informaționale: Materialele Conferinței Internaționale, Chișinău, 25-28 martie 2014 / red. resp.: Dumitru Solomon; col. red.: Dumitru Gortolomei [et al.]. — Chișinău: Evrica, ATIC, 2014 (Tipogr. AȘM). — P. 82-91. — Antetit.: Academia de Transporturi, Informatică și Comunicații.

38. Васянин В.А. Алгоритм построения минимального остовного леса графа с e – ребрами за время $O(e)$ / В.А. Васянин, Л.П. Ушакова // Sisteme de transport și logistică: Materialele Conferinței Internaționale, Chișinău, 11-13 decembrie 2013 / red. resp.: Dumitru Solomon; col. red.: Dumitru Gortolomei [et al.]. — Chișinău: Evrica, ATIC, 2013 (Tipogr. AȘM). — P. 310-316. — Antetit.: Academia de Transporturi, Informatică și Comunicații.

39. Трофимчук А.Н. Оптимизация процессов обработки и распределения потоков мелкопартионных грузов в иерархической многопродуктовой транспортной сети / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин // Sisteme de transport și logistică: Materialele Conferinței Internaționale, Chișinău, 11-13 decembrie 2013 / red. resp.: Dumitru Solomon; col. red.: Dumitru Gortolomei [et al.]. — Chișinău: Evrica, ATIC, 2013 (Tipogr. AȘM). — P. 317–331. — Antetit.: Academia de Transporturi, Informatică și Comunicații.

40. Васянин В.А. Зональные модели распределения мелкопартионных потоков в иерархических многопродуктовых сетях / В.А. Васянин // XI міжнародна науково-практична конференція (MPZIS-2013), 20–22 Листопад 2013 р., Дніпропетровськ: те-

зи доповідей – Дніпропетровськ, Україна: Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, 2013. – С. 40-41.

41. Трофимчук А.Н. Организация управления и принятия решений в распределенных иерархических многопродуктовых сетях с мелкопартионными дискретными потоками / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин // XI міжнародна науково-практична конференція (MPZIS-2013), 20-22 Листопад 2013 р., Дніпропетровськ: тези доповідей – Дніпропетровськ, Україна: Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, 2013. – С. 248-249.

42. Васянин В.А. О вычислительной эффективности одного двухкритериального алгоритма построения кратчайших путей / В.А. Васянин // Materials of the International Scientific - Practical Conference «Information Control Systems and Technologies» (ICST – ODESSA – 2013), October 8 - 10, 2013, Odessa: Proceedings. – Odessa, Ukraine: ESC “ONMU”, 2013. – P. 307–310.

43. Трофимчук А.Н. Задача оптимизации упаковок мелкопартионных грузов в многопродуктовой транспортной сети с дискретными пропускными способностями дуг / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин // Materials of the International Scientific – Practical Conference «Information Control Systems and Technologies» (ICST – ODESSA – 2013), October 8–10, 2013, Odessa: Proceedings. – Odessa, Ukraine: ESC “ONMU”, 2013. – P. 269-272.

44. Трофимчук А.Н. Оптимизация схемы сортировки мелкопартионных потоков в узлах многопродуктовой сети [Электронный ресурс]: 7.14 / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин // Информационные технологии в управлении сложными системами – 2013 [Электронный ресурс]: научная конференция (19-20 июня 2013 г.): сборник докладов. Секция 7 / под редакцией академика НАН Украины В.В. Пилипенко. — Днепрпетровск: Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, 2013. – Режим доступа к сборнику <http://www.itm.dp.ua/>.

45. Трофимчук А.Н. Оптимизация структуры многопродуктовой сети с дискретными мелкопартионными потоками / А.Н. Трофимчук, В.А. Васянин // 15-th International conference on System Analysis and Information Technologies (SAIT2013), May 27–31, 2013, Kyiv: Proceedings. – Kyiv, Ukraine: ESC “IASA” NTUU “KPI”, 2013. – P. 205–206.

46. Васянин В.А. Пакет программ для решения задач оптимизации распределения дискретных потоков в многопродуктовых сетях большой размерности / В.А. Васянин, А.И. Савенков // Міжнародна наукова конференція «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту» (ISDMCI'2008), 19–23 Травень 2008 р., Євпаторія: тези доповідей – Євпаторія, Україна: ХНТУ, 2008. – Том 2 (частина 1). – С. 41-44.

47. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Пакет програм для рішення задач оптимізації розподілу дискретних потоків у багатопродуктових мережах» / заявник і власник В.О. Васянін; А. с. від 23.07.2002 № 5978, Україна, Міністерство освіти і науки України, Державний департамент інтелектуальної власності; заявка від 06.06.2002 № 5772 про реєстрацію авторського права на твір.

48. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Комп'ютерна програма оптимізації ієрархічної структури багатопродуктової комунікаційної мережі з дискретними потоками» / заявник і власник О.М. Трофимчук, В.О. Васянін, Л.П. Ушакова; А. с. від 20.07.2016 № 66791, Державна служба інтелектуальної власності.

сті України; заявка від 25.05.2016 № 67221 про реєстрацію авторського права на твір.

49. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Комп'ютерна програма оптимізації розподілу та маршрутизації дискретних потоків в багатопродуктовій комунікаційній мережі» / заявник і власник В.О. Васянін; А. с. від 20.07.2016 № 66794, Державна служба інтелектуальної власності України; заявка від 25.05.2016 № 67224 про реєстрацію авторського права на твір.

50. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Комп'ютерна програма знаходження остовного лісу графа з мінімальною (максимальною) вагою» / заявник і власник О.М. Трофимчук, В.О. Васянін, Л.П. Ушакова; А. с. від 20.07.2016 № 66792, Державна служба інтелектуальної власності України; заявка від 25.05.2016 № 67222 про реєстрацію авторського права на твір.

51. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Комп'ютерна програма побудови всіх найкоротших шляхів в мережі за двоохкритеріальним лексикографічним упорядкуванням» / заявник і власник В.О. Васянін; А. с. від 20.07.2016 № 66793, Державна служба інтелектуальної власності України; заявка від 25.05.2016 № 67223 про реєстрацію авторського права на твір.

АНОТАЦІЯ

Васянін В. О. Методологія проектування багатопродуктових комунікаційних мереж з дискретними потоками. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, 2017.

Дисертація присвячена розробці методології математичного моделювання та проектування ієрархічних багатопродуктових мереж з дискретними дрібнопартіонними потоками кореспонденцій в середовищі інформаційно-аналітичної системи підтримки прийняття рішень (ІАС ППР), яка функціонує в масштабі реального часу, що відкриває нові напрямки для створення інтелектуальних методів та інформаційних технологій в управлінні складними процесами обробки і транспортування дискретних потоків в багаторівневих комунікаційних мережах. Методологія заснована на комплексному розв'язанні задач перспективного розвитку, поточного планування і оперативного управління ресурсами мережі на магістральному, зональному і внутрішньому рівні ієрархії і націлена головним чином на підвищення ефективності функціонування транспортних мереж з дрібнопартіонними вантажами за рахунок зниження дефіцитних матеріальних, сировинних, енергетичних, фінансових і трудових ресурсів і підвищення конкурентоспроможності транспортної галузі на внутрішньому і зовнішньому ринках. Однак окремі результати, отримані в рамках розробленої методології, а саме математичні моделі, методи та алгоритми вирішення задач обробки та транспортування дрібнопартіонних дискретних потоків можуть бути використані і для проектування магістральних мереж передачі даних з технологією віртуальних контейнерів, мереж мобільного та поштового зв'язку та ін.

У теоретичному плані в дисертації розроблені нові методологічні підходи до побудови ієрархічної мережі з дрібнопартіонними дискретними потоками і відповідної структури ІАС ППР, що включають принципи, концепції, математичні моделі, методи, алгоритми, методики, схеми, сценарії і програмний інструментарій для вирішення завдань оптимізації розвитку і функціонування багатопродуктових мереж.

Ключові слова: ієрархічні комунікаційні мережі, багатопродуктові дискретні потоки, інформаційно-аналітична система підтримки прийняття рішень, NP- складні і NP- повні задачі, поліноміальні зведення, математичні моделі, оптимізація упаковки і розподілу потоків, евристичні алгоритми, збіжність і часова складність алгоритмів, абстрактні типи даних, комп'ютерні технології, числове моделювання.

АННОТАЦИЯ

Васянин В. А. Методология проектирования многопродуктовых коммуникационных сетей с дискретными потоками. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, Киев, 2017.

Диссертация посвящена разработке методологии математического моделирования и проектирования иерархических многопродуктовых сетей с дискретными мелкопартионными потоками корреспонденций в среде информационно-аналитической системы поддержки принятия решений (ИАС ППР), функционирующей в масштабе реального времени, что открывает новые направления для создания интеллектуальных методов и информационных технологий в управлении сложными процессами обработки и транспортировки дискретных потоков в многоуровневых коммуникационных сетях. Методология основана на комплексном решении задач перспективного развития, текущего планирования и оперативного управления ресурсами сети на магистральном, зональном и внутреннем уровне иерархии и нацелена главным образом на повышение эффективности функционирования транспортных сетей с мелкопартионными грузами за счет снижения дефицитных материальных, сырьевых, энергетических, финансовых и трудовых ресурсов и повышение конкурентоспособности транспортной отрасли на внутреннем и внешнем рынках. Однако отдельные результаты, полученные в рамках разработанной методологии, а именно математические модели, методы и алгоритмы решения задач обработки и транспортировки мелкопартионных дискретных потоков могут быть использованы и для проектирования магистральных сетей передачи данных с технологией виртуальных контейнеров, сетей сотовой и почтовой связи и др.

В теоретическом плане в диссертации разработаны новые методологические подходы к построению иерархической сети с мелкопартионными дискретными потоками и соответствующей структуры ИАС ППР, включающие принципы, концепции, математические модели, методы, алгоритмы, методики, схемы, сценарии и программный инструментарий для решения задач оптимизации развития и функционирования многопродуктовых сетей. В частности определены основные задачи перспективного развития, текущего планирования и оперативного управления и показана их взаимосвязь. Обосновано использование группы задач текущего планирования как методологической основы – ядра для решения задач оперативного управления процессами обработки и распределения потоков, а также для решения задач перспективного развития сети. На основании проведенного обзора и анализа известных математических моделей разработано несколько вариантов математических постановок задачи проектирования доставочных, сборочных и комбинированных

маршрутов транспортных средств для перевозки мелкопартионных грузов во внутренних зонах магистральных узлов. Доказана NP-полнота задачи оптимизации упаковки, которая используется при сортировке и упаковке мелкопартионных грузов в контейнеры в транспортных сетях или объединении сообщений в виртуальные контейнеры в сетях передачи данных. На основании ряда доказанных утверждений предложены полиномиальные алгоритмы нахождения приближенного решения задачи упаковки, доказана сходимость алгоритмов и получены оценки их временной сложности. Предложена математическая модель и эвристический метод решения задачи выбора иерархической структуры магистральной сети, основанный на применении алгоритмов упаковки и распределения потоков в зональных сетях. Для решения нелинейной многоэкстремальной дискретной задачи распределения и маршрутизации потоков транспортных блоков с упакованными в них мелкопартионными грузами или сообщениями предложен метод ее преобразования к некоторой совокупности линейных многомерных задач о ранце со связывающими ограничениями. Разработаны алгоритмы решения преобразованной задачи, основанные на эвристических подходах к решению многомерной задачи о ранце и эффективной технике представления абстрактных структур данных. Получены полиномиальные оценки временной сложности алгоритмов. Для решения подзадач в основных алгоритмах оптимизации разработаны новый лексикографический двухкритериальный алгоритм построения кратчайших путей и усовершенствованный алгоритм Краскала нахождения минимального остовного дерева. Показано, что предложенный алгоритм построения кратчайших путей в несколько раз работает быстрее алгоритма Флойда, модифицированного для нахождения кратчайших путей по двум упорядоченным критериям. Практическая временная сложность списочной реализации алгоритма Краскала доведена до $O(e)$, где e — число ребер графа. Экспериментально показано, что алгоритмы со списочными структурами на практике работают быстрее, чем алгоритмы с древовидными структурами как на связных, так и на несвязных графах, и предложенный алгоритм лучше алгоритма Прима при $e \leq 0,27v^2$, где v — число вершин графа.

Основные результаты работы доведены до программной реализации, о чем имеются соответствующие свидетельства на авторское право на программный продукт, и нашли практическое использование и внедрение в ряде коммерческих транспортных компаний и в учебных заведениях.

Ключевые слова: иерархические коммуникационные сети, многопродуктовые дискретные потоки, информационно-аналитическая система поддержки принятия решений, NP-трудные и NP-полные задачи, полиномиальная сводимость, математические модели, оптимизация упаковки и распределения потоков, эвристические алгоритмы, сходимость и временная сложность алгоритмов, абстрактные типы данных, компьютерные технологии, численное моделирование.

ABSTRACT

Vasyanin V. A. Methodology of the design of multicommodity communications networks with the discrete flows. – On rights of manuscript.

Dissertation for the degree of doctor of technical sciences, specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, 2017.

Dissertation is devoted to the development of the methodology of mathematical modeling and design of hierarchical multicommodity networks with discrete flows of correspondence in the environment of the information-analytical decision support system (DSS), operating in real time and opening new avenues for the development of intelligent methods and information technologies for management of difficult process of handling and transporting of discrete flows in multilevel communication networks. The methodology is based on an integrated solution to the problems of long-term development, tactical planning and operational management of network resources at the backbone, zonal and internal levels of the hierarchy and is aimed primarily at improving the efficiency of functioning of the transport networks with small-lot cargoes by decrease expense scarce material, raw materials, energy, financial and labor resources and increasing the competitiveness of the transport industry in the domestic and foreign markets. Separate results obtained within the framework of the developed methodology, namely mathematical models, methods and algorithms for solving problems of processing and transporting of discrete flows small-lot cargo can be used for designing backbone data transmission networks with virtual container technology, cellular and postal communication, etc.

Theoretically, in the thesis developed new methodological approaches to the construction of a hierarchical network with discrete flows of correspondence and the corresponding structure of DSS, including principles, concepts, mathematical models, methods, algorithms, schemes, scenarios and software for solving problems of optimization of development and functioning multicommodity networks.

Keywords: hierarchical communication networks, multicommodity discrete flows, information-analytical decision support system, NP-hard and NP-complete problem, polynomial reducibility, mathematical models, optimization of packing and distribution of flows, heuristic algorithms, convergence and time complexity of algorithms, abstract types of data, computer technology, numerical modeling.