ВІДГУК
офіційного опонента
доктора технічних наук, професора Данилова Валерія Яковича
на дисертаційну роботу Васяніна В.О.
«Методологія проектування багатопродуктових комунікаційних мереж з дискретними потоками» представлену на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – «математичне моделювання та обчислювальні методи»

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

У Національній програмі інформатизації України одними з пріоритетних галузей економіки визначені 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. Ефективність роботи комунікаційних мереж значною мірою визначає економічні і соціальні показники функціонування інфраструктури більшості господарюючих суб'єктів. Подальше вдосконалення мережевих структур вимагає значних інвестицій, які повинні бути використані на основі строгого техніко-економічного розрахунку, оцінки та відбору альтернативних варіантів розвитку і модернізації комунікаційних мереж на основі процедур оптимізації та системного аналізу. В даний час для існуючих мережевих інфраструктур в різних галузях господарства, характерно те, що на всіх рівнях управління вже введені різні автоматизовані та інформаційні системи. Передбачається подальший їх розвиток з використанням новітніх інформаційних технологій; сучасного методичного, технічного та математичного забезпечень; систем підтримки прийняття рішень, які раціонально поєднують формальні і неформальні методи прийняття рішень і інтерактивний режим аналізу і вибору оптимальних рішень. Склалася і структура інформаційних і обчислювальних мереж, що забезпечують функціонування комунікаційних систем та включають глобальні, корпоративні та відомчі мережі України в рамках наукових робот за відомчою тематикою, одним із виконавців яких був здобувач.

2. Наукова новизна одержаних результатів

Дисертаційна робота Васяніна В.О. є закінченим науковим дослідженням, присвяченим вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми створення методології математичного моделювання та проектування багатопродуктових комунікаційних мереж з дискретними потоками. Одержані наукові результати роботи у сукупності представляють нове системно викладене, науково обґрунтоване рішення важливій для України проблеми підвищення ефективності транспортних мереж за рахунок зниження приведених витрат на їх функціонування. Теоретичне значення дисертації полягає в розробці теоретико-методологічних основ математичного моделювання та проектування розподіленої ієрархічної багатопродуктової комунікаційної мережі з дрібнопартіонними дискретними потоками, що включають: понятійний базис; принципи, концепції і критерії обробки і розподілу дрібнопартіонних потоків, методологію синтезу та аналізу багаторівневої структури мережі і побудови відповідної ІАС ППР, що базується на вирішенні завдань поточного

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.

• 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 дрібнопартіонних 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.

• Отримала подальший розвиток 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 дрібнопартіонних 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.

• 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.

• Для окремих підзадач, що виникають при розв'язанні основних задач поточного планування, розроблений новий лексикографічній 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 порівнянності швидкодії запропонованого алгоритму з алгоритмом Прима, з якої випливає, що

для зв'язних графів запропонований алгоритм краще алгоритму Прима при $e \le 0{,}27n^2$, де n — кількість вершин графа.

3. Практична значущість дисертаційної роботи

Практична значущість одержаних у дисертації результатів полягає в розроблених комп'ютерних технологіях, що працюють у реальному часі в складі ІАС ППР і дозволяють ефективно управляти процесами обробки і транспортування дискретних потоків кореспонденцій у багатопродуктовій комунікаційній мережі, а саме: в інтерактивному режимі моделювати різні варіанти мережі, змінюючи топологію, ієрархічну структуру, маршрути транспортних засобів або передачі інформації, потоки, параметри і обмеження моделі, і з сімейства отриманих результатів вибирати найкращий варіант з урахуванням обраної функції мети і прийнятих обмежень; підвищити ефективність функціонування мережі на рівні поточного планування шляхом оптимізації використання її наявних ресурсів і зниження експлуатаційних витрат, що дає можливість зменшувати тарифи на перевезення вантажів або передачу інформації, привертати додаткову клієнтуру і забезпечувати постійний приріст прибутку; розраховувати попередні техніко-економічні показники функціонування мережі для заданих і прогнозних значеннях потоків, оцінювати вартість додаткових ресурсів і планувати величину потрібних інвестицій на модернізацію та розвиток її структурних елементів; оперативно перерозподіляти потоки при виникненні відмов обладнання в вузлах і на транспортних маршрутах, непередбачених ситуацій, стихійних лих та ін.

Розроблені комп'ютерні технології та інструментальні програмні засоби призначені для математичного моделювання функціонування комунікаційних мереж з дискретними дрібнопартіонними 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., та дозволяють підвищити розрахункову ефективність функціонування проектованих комунікаційних мереж. Зокрема, розроблений інструментарій може бути використаний для моделювання та оптимізації функціонування традиційних логістичних виробничих і транспортно-складських систем, що включають вузли постачальників сировини, виробництва товарів, склади і кінцевих споживачів.

Отримані результати роботи можуть бути корисні в навчальному процесі при підготовці фахівців у галузі розробки і проектування складних розподілених багатопродуктових мереж з дискретними потоками.

4. Ступінь обґрунтування наукових положень, висновків та їхня достовірність

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації, досягнута шляхом системного підходу до розгляду досліджуваної проблеми, досить повним обліком початкових даних, параметрів, обмежень і функціональних залежностей, що характерні для

функціонування реальних розподілених мереж, переконливим використанням сучасних методів аналізу і синтезу ієрархічних комунікаційних мереж, методів математичного моделювання, дослідження операцій та комбінаторного аналізу.

Достовірність отриманих в роботі положень і наукових результатів забезпечена несуперечністю відомих і запропонованих в роботі теоретичних і практичних положень, принципів, концепцій та закономірностей; математичної коректністю поставлених задач і збіжністю теоретичних припущень з результатами експериментальних досліджень; численними результатами цифрового моделювання розроблених в рамках дисертаційної роботи нових методів і алгоритмів.

Отримані автором наукові результати підтверджуються достатньою апробацією основних положень та висновків на міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференціях та семінарах.

5. Аналіз публікацій та повнота відображення результатів в авторефераті дисертації

Основні положення та висновки дисертаційної роботи опубліковано у 51 науковій праці, з яких 21 наукова стаття з переліку наукових фахових видань, затверджених МОН України (5 надруковані у виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз даних), 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. Додатково результати дисертаційної роботи доповідалися на наукових семінарах в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України та Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. Зазначені публікації повною мірою висвітлюють основні наукові положення дисертації. Зміст автореферату чітко відображає основні результати роботи, які приведені в дисертації. У дисертації та автореферату показано особистий внесок здобувача в працях, які опубліковані у співавторстві.

6. Огляд змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Васяніна В.О. 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.

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 використання та впровадження результатів дисертаційних досліджень 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 держав-

ного технологічного університету. Відповідні документи присутні у додатках до дисертації на стор. 483-487.

У першому розділі розглядаються методологічні підходи до побудови багатопродуктових ієрархічних комунікаційних мереж та визначено основні завдання обробки і розподілу дрібнопартіонних 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. Запропоновано ієрархічна зонально-вузлова структура багатопродуктової мережі, принципи і технологія організації сортування та транспортування дрібнопартіонних кореспонденцій і математична модель мережі. Виділено три рівні ієрархії — магістральний, зональний і внутрішній і чотири типи вузлів. (виникають питання, чому топологія мережі задана, та чому розглядається тільки чотири типу вузлів?). Для кожного рівня ієрархії визначені три групи задач: перспективного розвитку, поточного планування і оперативного управління. Виділено основні задачі поточного планування на магістральному рівні — упаковки дрібнопартіонних кореспонденцій у транспортні блоки, вибір структури мережі, розподіл і маршрутизація 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. Наведена загальна схема ІАС ППР, яка являє собою інформаційно-картографічну систему на базі ІПД, ГІС та розподіленої обчислювальної мережі. Дається обґрунтування використання ІАС для управління нестаціонарними процесами обробки і транспортування потоків на всіх рівнях мережі.

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. Основні наукові результати розділу — декілька варіантів удосконалених математичних постановок задач побудови VRP-маршрутів, які більш адекватні реальним транспортним процесам з застосуванням обмеженого та необмеженого гетерогенного робочого парку транспортних засобів для обслуговування вузлів четвертого типу у внутрішній зоні магістрального вузла.

Третій розділ присвячено розробці методів і алгоритмів розв'язання задачі упаковки дрібнопартіонних кореспонденцій у транспортні блоки і вибору ієрархічної структури магістральної мережі. При розв'язанні задачі упаковки з обмеженнями на час доставки та кількість об'єднань потоків треба визначати вузли об'єднання і об'єднані потоки для всіх адресних пар у мережі. Тому автором наводяться спосіб та ефективні алгоритми формування довідкової матриці об'єднання потоків кореспонденцій, яка у подальшому використовується всередині основних схем оптимізації для розрахунку часу доставки кореспонденцій одержувачу і перевірки відповідних обмежень. Алгоритми обґрунтовуються доведенням теорем 3.1, 3.2. Основні наукові результати розділу — доведено (теорема 3.3), що задача упаковки навіть без функцій

витрат на обробку і транспортування потоків є NP-повною (виникає питання про сильну NP-повноту даної задачі); 2) запропоновано метод та алгоритми для розв'язання практичних задач упаковки з функціями витрат на обробку і транспортування кореспонденцій, які засновані на дискретному аналогу методу локального спуску, доведено (теорема 3.4) збіжність алгоритмів до локального оптимуму, та отримано оцінки їх часової складності; 3) доведено (твердження 3.1), 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; 4) доведено (твердження 3.3), що задача вибору пропускних спроможностей дуг є NP-повною і може бути вирішена за псевдополіноміальний час; 5) запропоновано оригінальний евристичний метод розв'язання задачі вибору ієрархічної структури багатопродуктової мережі, заснований на упорядкуванні вузлів мережі по зростанню їх сумарних потоків і використанні алгоритмів розв'язування задач упаковки і розподілу потоків у зональних мережах. Експериментально доводиться працездатність алгоритмів і їх обчислювальна ефективність.

У четвертому розділі розроблено методи та алгоритми розв'язання нелінійної багатоекстремальної задачі розподілу і маршрутизації транспортних блоків. Основні наукові результати розділу — 1) ідея та метод перетворення математичної моделі нелінійної задачі у мережевої постановці до сукупності лінійних багатовимірних задач про ранець зі зв'язуючими обмеженнями. Новизна обох запропонованих постановок та математичних моделей визначається тим, що, на відмову від багатьох існуючих моделей, у них враховуються обмеження 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 упакованих в транспортні блоки, дрібнопартіонних кореспонденцій одержувачу. Новизна задач визначається також тим, що в них не тільки знаходяться шляхи розподілу потоків по дугах мережі, а ще і проектуються нові лінії зв'язку — маршрути транспортних засобів або комутовані магістральні канали мереж передачі даних і мінімізуються приведені витрати на транспортування і обробку потоків у всій мережі при заданих обмеженнях. Це дозволяє проектувальнику визначити собівартість транспортних послуг і встановити реальні тарифи на перевезення вантажів або передачу та обробку інформації; 2) сукупність нових методів і алгоритмів для розв'язання перетвореної задачі, яки на відміну від відомих підходів до розв'язання задач цілочислового лінійного програмування 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 задачі. Отримано асимптотичні оцінки часової складності алгоритмів; 3) новий лексикографічній двокритеріальний алгоритм побудови найкоротших шляхів та ефективна реалізація алгоритму Краскала для знаходження мінімального кістякового дерева (лісу) графа або мережі. Отримано оцінки часової складності алгоритмів.

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. Показано, яким чином можна використовувати задачі поточного планування для оперативного перерозподілу потоків у випадках виникнення відмов у вузлах і на лініях зв'язку, а також у випадках перевантажень у мережі і адміністративного обмеження доступних ресурсів мережі. Наведено загальна схема управління транспортною системою при збуреннях потоків, вихідних даних і параметрів мережі. Управління здійснюється проектувальником мережі на основі визначення критичного стану мережі за шкалою допустимих значень контрольованих параметрів. Головним критерієм для вибору границь в контрольованій шкалі параметрів визначено допустиме відхилення значення цільової функції від її «оптимального» значення при збуреннях вихідних даних і параметрів мережі і вирішуваних задач.

Шостий розділ присвячений практичній реалізації і дослідженню розв'язання задач поточного планування у магістральній мережі. 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. Наводиться опис комп'ютерних програм для моделювання ієрархічної структури, схеми сортування, розподілу і маршрутизації потоків. Розглядаються числові приклади розв'язання окремих задач, наведені результати моделювання автотранспортної мережі, що містить 120 магістральних вузлів. Експериментально доводиться висока обчислювальна ефективність запропонованих алгоритмів і програм. Зазначається, що на основні комп'ютерні програми отримано авторські свідоцтва, видані Державним департаментом інтелектуальної власності Міністерства освіти і науки України.

У висновках сформульовано основні результати роботи.

У додатках **А, Б, В, Г, Д і Е** відповідно наводяться: типові завдання по розробці інформаційного забезпечення та автоматизації процесів підтримки прийняття рішень; математична модель та алгоритми розв'язання задачі розподілу і упаковки дрібнопартіонних кореспонденцій в зональних мережах; математична модель і алгоритм розв'язання задачі розвезення порожніх контейнерів і для балансування матриці контейнерних потоків у транспортній мережі; огляд і аналіз методів та алгоритмів побудови найкоротших шляхів; абстрактні типи даних для розробки алгоритмів розподілу і маршрутизації потоків і процедури редукції ліній зв'язку, оцінки складності алгоритмів редукції і формування довідкової структури даних, приклад побудови структур даних та результати числового експерименту,що для перевірки працездатності і обчислювальної ефективності запропонованих алгоритмів; 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.

7. Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації й автореферату

Дисертація та автореферат написані грамотно, стиль викладення в них матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій відповідає вимогам стандарту ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки» та забезпечує доступність їх сприйняття.

8. Зауваження до дисертації та автореферату

1. Автор розглядає ієрархічні мережі із заданою топологічною структурою і розв'язує задачу вибору типів вузлів і зон їх обслуговування. У класичних задачах синтезу та аналізу комунікаційних мереж саме топологічна структура мереж є шуканою. У роботі не сказано, чому розглядаються тільки мережі із заданою топологією розташування вузлів і дуг. Не ясно також, чим обґрунтований вибір вузлів тільки чотирьох типів.

2. Автором не проведене числове моделювання запропонованих у другому розділі задач побудови внутрішньо вузлових маршрутів транспортних засобів з використанням згаданих відомих пакетів змішаного і цілочислового програмування. Експериментальне дослідження запропонованих моделей побудови VRP-маршрутів посилило б враження від отриманих результатів.

3. У розділі 3 автор доводить NP-повноту задачі упаковки (сформульованої у вигляді задачі розпізнавання). Однак, судячи з результатів проведених експериментів, складність цієї задачі сильно залежить від величини значень вихідних даних і параметрів. Виникає гіпотеза про сильну NP-повноту даної задачі і можливості її теоретичного доказу.

4. Під час обговорення алгоритмів розв'язання задачі упаковки дрібнопартіонних кореспонденцій (3.18)-(3.21), на стор. 154 автор говорить про можливість організації паралельних обчислень за значеннями розміру околу пошуку локального мінімуму (параметра $\nu = 1,2,...,\nu_{\max}$). Дослідження розроблених алгоритмів було б найбільш повним при реалізації їх на обчислювальних кластерах і мультипроцесорних системах, наприклад, в середовищі паралельного програмування Intel Parallel Studio XE 2017 Professional Edition for C ++ and Fortran.

5. У розділі 4 важко зрозуміти роботу основного алгоритму 4.14 (стор. 280) розподілу і маршрутизації потоків транспортних блоків, без попереднього прочитання опису методів і алгоритмів побудови довідкової структури H_S і редукції шаблонів маршрутів, які винесені в додаток Д.

6. На стор. 7 автореферату в кінці останнього речення пропущено посилання на додаток А, в якому наведено типові завдання по розробці інформаційного забезпечення та автоматизації процесів підтримки прийняття рішень і перелік основних задач по обробці і розподілу дрібнопартіонних потоків.

7. На стор. 27 автореферату на рис. 5 змазано зображення легенди графіків часу роботи алгоритмів побудови кістякових дерев LINK, TREE, PRIM і сортування ваг ребер SORT. Доводиться здогадуватися, де який графік. Фон графіків сильно затемнений.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку та не зменшують наукову цінність і практичну значимість дисертаційної роботи в цілому.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Васяніна В.О. – це завершена наукова праця, в якій отримано нові науково обґрунтовані й експериментально підтверджені результати, що склали основу розробленої методології математичного моделювання та проектування багатопродуктових комунікаційних мереж з дискретними дрібнопартіонними потоками кореспонденцій. За актуальністю розглянутих задач, обсягом досліджень, науковим рівнем і практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота повністю відповідає вимогам МОН України щодо докторських дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, а її автор Васянін Володимир Олександрович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук.

Офіційний опонент
доктор технічних наук, професор, професор
кафедри математичних методів
системного аналізу Інституту прикладного
системного аналізу Національного технічного
університету України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського» В.Я. Данилов

Підпис Данилова В.Я.
ЗАСВІДЧУЮ
відділ кадрів, діловодства,
аспірантури і докторантури
Підпис