

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Проректор з наукової роботи**

Дніпровського національного  
університету імені Олеся Гончара

Олег МАРЕНКОВ



2024 р.

### **ВИСНОВОК**

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації  
Караваєва Костянтина Дмитровича на тему «Методи і алгоритми розв'язання  
класичних та узагальнених задач упорядкування вершин орграфів», представленої  
на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика

### **ВИТЯГ**

з протоколу №3 засідання міжкафедрального семінару при постійнодіючому  
семінарі «Актуальні питання оптимізації та дискретної математики»  
при Науковій раді НАН України з проблеми «Кібернетика»  
факультету прикладної математики  
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара  
від «10» травня 2024 року

**ПРИСУТНІ: 36 з 36 членів наукового семінару.**

**ГОЛОВА НАУКОВОГО СЕМІНАРУ:** член-кореспондент НАН України,  
д-р фіз.-мат. наук, проф. Кісельова О. М. (01.05.01 – теоретичні основи інформатики  
та кібернетики), в.о. декана факультету прикладної математики, професорка кафедри  
обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського  
національного університету імені Олеся Гончара;

**СЕКРЕТАР ЗАСІДАННЯ:** канд. фіз.-мат. наук, доц. Кузенков О. О. (01.05.02 –  
математичне моделювання та обчислювальні методи) доцент кафедри  
обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського  
національного університету імені Олеся Гончара.

**ЧЛЕНИ НАУКОВОГО СЕМІНАРУ:** д-р фіз.-мат. наук, проф. Гук Н. А.  
(01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), в.о. проректора з науково-  
педагогічної роботи, професорка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського  
національного університету імені Олеся Гончара;

д-р фіз.-мат. наук, проф. Кузьменко В. І. (01.02.04 – механіка деформівного  
твердого тіла), професор кафедри обчислювальної математики та математичної  
кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;



д-р фіз.-мат. наук, проф. Шевельова А. Є. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), професорка кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р фіз.-мат. наук, проф. Гарт Л. Л. (01.05.01 – теоретичні основи інформатики та кібернетики), професорка кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р техн. наук, проф. Байбуз О. Г. (05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту), завідувач кафедри математичного забезпечення ЕОМ Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Турчина В. А. (01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи), завідувачка кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. техн. наук, доц. Зайцева Т. А. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), завідувачка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Волошко В. Л. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), доцент кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р фіз.-мат. наук, проф. Білозьоров В. Є. (01.05.04 – системний аналіз і теорія оптимальних рішень), професор кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р техн. наук, проф. Книш Л. І. (05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика), професорка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. техн. наук, доц. Золотько К. Є. (05.14.04 – промислова теплоенергетика), доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Зайцев В. Г. (01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи), доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. техн. наук Дзюба П. А. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Хижа О. Л. (01.01.01 – математичний аналіз), доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. техн. наук, доц. Мацуга О. М. (05.13.06 – автоматизовані системи управління та прогресивні інформаційні технології), доцентка кафедри



математичного забезпечення ЕОМ Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук Козакова Н. Л. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), доцентка кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. техн. наук, доц. Антоненко С. В. (05.13.06 – автоматизовані системи управління та прогресивні інформаційні технології), доцентка кафедри математичного забезпечення ЕОМ Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Міхальчук Г. Й. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), доцента кафедри математичного забезпечення ЕОМ Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Тонкошкур І. С. (01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми), доцент кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук Степанова Н. І. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), доцентка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Сафронова І. А. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), доцентка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. техн. наук, доц. Сидорова М. Г. (05.13.06 – інформаційні технології), доцентка кафедри математичного забезпечення ЕОМ Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Божуха Л. М. (01.01.01 – математичний аналіз), доцентка кафедри математичного забезпечення ЕОМ Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. техн. наук, доц. Білобородько О. І. (05.13.06 – автоматизовані системи управління та прогресивні інформаційні технології), доцентка кафедри математичного забезпечення ЕОМ Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. техн. наук, доц. Ємел'яненко Т. Г. (05.13.06 – автоматизовані системи управління та прогресивні інформаційні технології), доцентка кафедри математичного забезпечення ЕОМ Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Наконечна Т. В. (01.01.01 – математичний аналіз), доцентка кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;



канд. фіз.-мат. наук, доц. Трофімов О. В. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), доцент кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

Полонська А. Є., асистентка кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

Лисиця Н. М., асистентка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

Сірик С. Ф., асистентка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

Єгошкін Д. І., асистент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

Красношайка Д. В., старший викладач кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

Лапець О. В., асистент кафедри математичного забезпечення ЕОМ Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

Лирчиков В. О., асистент кафедри математичного забезпечення ЕОМ Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

#### **ЗАПРОШЕНІ ФАХІВЦІ (7 осіб, з правом голосу):**

д-р техн. наук, доц. Гакал П. Г. (05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика), завідувач кафедри аерокосмічної теплотехніки Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»;

канд. техн. наук, доц. Моїсеєнко С. В. (05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка), доцентка кафедри загальноосвітніх гуманітарних та природничих дисциплін, секція вищої математики і математичного моделювання Херсонського національного технічного університету;

д-р техн. наук, проф. Габрінець В. О. (05.05.03 – двигуни та енергетичні установки), професор кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р техн. наук, с.н.с. Накашидзе Л. В. (05.14.08 – перетворення відновлюваних видів енергії), провідний науковий співробітник науково-дослідного інституту енергоефективних технологій в матеріалознавстві Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

д-р фіз.-мат. наук, проф. Говоруха В. Б. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), завідувач кафедри вищої математики, фізики та загальноінженерних дисциплін Дніпровського державного аграрно-економічного університету,



д-р фіз.-мат. наук, проф. Кагадій Т. С. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), професорка кафедри прикладної математики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

канд. фіз.-мат. наук, доц. Ходанен Т. В. (01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла), доцентка кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

На засіданні присутні аспіранти: Борисенко А. В., Масаликін С. С., Юрков Р. С., Караваєв К. Д., Жушман В. В.

**Аспіранти участі в голосуванні не брали.**

**Порядок денний:** розгляд і обговорення дисертаційної роботи аспіранта кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики **Караваєва Костянтина Дмитровича** на тему **«Методи і алгоритми розв'язання класичних та узагальнених задач упорядкування вершин орграфів»**, поданої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика

Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, протокол № 4 від 19 листопада 2020 р. Науковим керівником призначено канд. фіз.-мат. наук, доц. Турчина В. А.

Підготовка здобувача третього рівня вищої освіти здійснюється за акредитованою освітньо-науковою програмою «Прикладна математика» зі спеціальності 113 Прикладна математика (сертифікат про акредитацію освітньої програми 2068, дійсний до 01.07.2027 р.).

#### **СЛУХАЛИ:**

Обговорення дисертації аспіранта 4 року навчання Караваєва Костянтина Дмитровича на тему: «Методи і алгоритми розв'язання класичних та узагальнених задач упорядкування вершин орграфів» на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика.

Перевірку на плагіат здійснювала комісія у складі: канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Кузенков О. О., канд. фіз.-мат. наук, доцентка кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Козакова Н. Л., провідний інженер науково-дослідної лабораторії Оптимізації складних систем Яцечко Н. Є.

За результатами перевірки дисертаційної роботи на плагіат програмою «Strikeplagiarism» зроблено висновок: дисертаційна робота Караваєва К. Д. має високий рівень унікальності (93,34 %) і може бути допущена до захисту.



Робота виконана на 178 сторінках і містить такі складові частини: анотація, зміст, вступ, основна частина, висновки, список використаної літератури, додатки.

Слово надається аспіранту Караваєву К. Д. Будь ласка, регламент виступу – 15 хвилин.

**Аспірант Караваєв К. Д.**

Шановна голово, шановні члени міжкафедрального семінару, шановні присутні!

**Тема моєї дисертації:** «Методи і алгоритми розв’язання класичних та узагальнених задач упорядкування вершин орграфів».

**Актуальність теми.**

Математична теорія паралельного упорядкування є одним з потужних інструментів розв’язання багатьох теоретичних та практичних задач, що можуть бути зведеними до оптимізаційних задач на графах. Її результати застосовуються при плануванні схем та розкладів виробництва, побудові мікросхем, багатопотоковій обробці даних, паралелізації та розподіленні обчислень та в інших сферах, де на порядок виконання задач накладається деяка множина несуперечливих технологічних обмежень. У загальному випадку більшість таких задач, навіть у найпростіших постановках, відносяться до класу NP-важких, тому важливим є як пошук підкласів задач, для яких існують точні поліноміальні алгоритми, так і побудова наближених алгоритмів з прийнятним рівнем похибки отриманих розв’язків.

Історично перші поліноміальні алгоритми розв’язання таких задач були засновані на рівневому принципі, використанні максимального паросполучення та лексикографічного помічення. Перший є точним для графів-лісів, інші – для класичної постановки задачі з двома виконавцями. Ці алгоритми легко модифікувати, що дозволяє значно розширити межі їх застосовності.

Точні поліноміальні алгоритми, отримані в подальших дослідженнях, найчастіше були засновані на переборі та мали експоненційну алгоритмічну складність. На практиці вони є малопродатними, що додатково підтверджує актуальність отримання наближених алгоритмів прийнятної точності з малою алгоритмічною складністю.

Класична постановка задачі передбачає, що всі виконавці є універсальними, їх кількість є сталою і час виконання кожної роботи є однаковим. Вона є далекою від реальних умов, що зумовило розробку її узагальнень, що детальніше враховують практичні аспекти процесів, які моделюються. До них належать: наявність затримок, різний час виконання робіт, можливість переривання виконання, зазначення проміжків часу, в які має бути завершена кожна або деякі з робіт (директивні строки); завдання, виконання яких потребує одночасної роботи декількох, можливо конкретних, виконавців; змінна кількість виконавців, різні варіанти цільових



функцій, тощо. Задачі, що враховують перелічені узагальнення, окрім того, що також найчастіше належать класу NP-важких, можуть й зовсім не мати розв'язків. Це та той факт, що для моделювання реальних процесів зазвичай необхідно враховувати якусь комбінацію з наведених обмежень, підкреслюють важливість побудови ефективних наближених підходів та алгоритмів як універсальних, так і специфічних для конкретних постановок.

**Мета і завдання дослідження.**

*Метою дисертаційної роботи* є подальша розробка теоретичного апарату, що лежить в основі методів і точних та наближених алгоритмів розв'язання задач паралельного упорядкування.

*Завданнями дослідження* для досягнення поставленої мети були:

- подальший розвиток теорії розв'язання задач дискретної оптимізації та її використання в задачах упорядкування;
- розробка нового апарату для отримання точних розв'язків задач у загальних постановках;
- розробка методів та алгоритмів поліноміальної складності для отримання точних та наближених розв'язків та їх обґрунтування;
- розробка комплексу програм, що реалізує запропоновані алгоритми;
- проведення обчислювальних експериментів для перевірки гіпотез та результатів для отриманих наближених алгоритмів.

*Об'єкт дослідження* – задачі оптимального упорядкування вершин орграфів.

*Предметом дослідження* є методи і алгоритми розв'язання класичних та узагальнених задач оптимального паралельного упорядкування вершин орграфів.

*Методи дослідження:* для вирішення поставлених завдань використані методи теорії оптимального упорядкування, теорії графів, дискретної та комбінаторної оптимізації, теорії розкладів.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

- *вперше* теоретично обґрунтовано можливість зведення будь-якої класичної задачі оптимального упорядкування до задачі із щільним упорядкуванням та шириною заданої парності;
- *дістав подальшого розвитку* класичний алгоритм розв'язання для двох виконавців для побудови щільних упорядкувань;
- удосконалено оцінки знизу довжини упорядкування для класичної задачі паралельного упорядкування;
- *вперше* запропоновано підхід для скорочення перебору у методі гілок та меж за рахунок виключення гілок, що відповідають ізоморфним підграфам: розглянуті точні та наближені варіанти його реалізації;
- *вперше* отримана необхідна умова існування щільних упорядкувань та запропоновані ефективні алгоритми її перевірки для загальної та спеціальної структур графів;



- *вперше* побудовано наближений алгоритм для задач з щільними упорядкуваннями, який заснований на методі гілок та меж з обмеженою глибиною пошуку;
- *вперше* побудовано послідовність оцінок знизу довжини упорядкування, в якому кожна наступна оцінка, теоретично, є точнішою за попередні;
- *дістав подальшого розвитку* спосіб визначення діапазону допустимих місць вершин, шляхом врахування ширини упорядкування;
- *вперше* теоретично обґрунтовано можливість зведення задачі зі змінним значенням ширини упорядкування до класичної задачі;
- *отримані нові наукові дані* про поліноміальні наближені алгоритми для розв'язання задачі зі змінною шириною для вхідних бінарних дерев: запропоновано та досліджено online-алгоритм, продемонстровано, що побудова точного online-алгоритму для такого класу задач в принципі неможлива;
- *вперше* розглянуто клас узагальнених задач оптимального упорядкування з неповним завантаженням: показана можливість зведення до інших відомих класів задач паралельного упорядкування, запропоновано наближений алгоритм до розв'язання задач з цього класу;
- створено програмний продукт, використовуючи засоби об'єктно-орієнтованої мови програмування C#;
- проведено обчислювальні експерименти для визначення ефективності запропонованих методів та алгоритмів.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Отримані в результаті дослідження методи й алгоритми можуть бути застосовані до розв'язання прикладних задач, що зводяться в математичній постановці до задач оптимального упорядкування вершин орієнтованих графів. Отримані результати можуть підвищити ефективність побудови розкладів виконання завдань у різних практично важливих сферах та галузях, зокрема у промисловому виробництві, питаннях логістики, пріоритетності використання та розподілу ресурсів, паралелізації та розподілення обчислень, обробки та моніторингу даних в режимі реального часу тощо. Також вони можуть мати важливе значення для подальшого розвитку сучасних технологій, зокрема автоматичного розпаралелення, та слугувати підґрунтям для нових напрямків наукових пошуків за цією тематикою.

**Перший розділ** є оглядовим: розглядаються практичні задачі, які зводяться до задач паралельного упорядкування вершин орграфів, наводяться класичні та узагальнені постановки задач упорядкування, описаний метод гілок та меж, а також відомі точні алгоритми поліноміальної складності для спеціальних випадків цих задач та оцінки точності у випадку застосування до довільних задач.

**Другий розділ** присвячено результатам здобувача, які стосуються класичних задач паралельного упорядкування.



Отримано ряд тверджень, пов'язаних з можливістю зведення задач упорядкування до певних підкласів цих задач. В основу їх доведення покладена ідея додання до вхідного графу підграфів спеціального вигляду, які за правильно обраної розмірності не вплинуть на довжину оптимального розв'язку. Виявилось, що шукану розмірність цих підграфів можна визначити за допомогою бінарного пошуку.

Особливу увагу в роботі приділено задачам, в яких шукане упорядкування є щільним. Доведено, що алгоритм, заснований на максимальному паросполученні, в принципі, може знайти оптимальний розв'язок таких задач, на відміну від алгоритмів, заснованих на рівневому принципі. Обчислювальний експеримент показав, що алгоритм у класичному вигляді має незадовільну точність, тому для нього розроблено ряд модифікацій, які дозволили значно покращити його показники ефективності.

Аналіз випадків перевищення максимально можливої кількості кроків в обчислювальних експериментах з методом гілок та меж показав, що найчастіше це відбувається, оскільки отримуємо велику кількість гілок, які відповідають ізоморфним підграфам. У такому випадку отримання більш точних оцінок не вплине на кількість розгалужень. В зв'язку з цим проведено дослідження можливості визначати та видаляти такі гілки в дереві варіантів у загальному випадку, а також для паралельно-послідовних графів. Додатково також розглянута можливість застосовувати потужні інваріанти для наближеного визначення ізоморфізму.

Були також досліджені необхідні умови існування щільних упорядкувань, пов'язаних з обмеженістю потужності місць та можливістю їх заповнення. Проведені міркування дозволили не тільки об'єднати розглянуті умови в одну, а й отримати нову уточнену оцінку знизу довжини та узагальнення спеціальних упорядкувань  $\underline{S}$  та  $\bar{S}$ , які враховують ширину упорядкування. Більш того, комбінація цих результатів дозволила отримати послідовність оцінок знизу довжини, кожна з яких є, теоретично, точнішою за попередні. Також було запропоновано наближений алгоритм для таких задач, ідея якого полягає в побудові дерева розгалужень у методі гілок та меж лише для найбільш перспективних гілок, відповідно до деякого обраного критерію.

**Третій розділ** висвітлює результати, які пов'язані з узагальненими задачами упорядкування.

Було доведено твердження, що дозволяє звести задачу зі змінною шириною упорядкування до класичної задачі, а також застосовувати усі отримані оцінки довжини упорядкування при використанні методу гілок та меж для цієї задачі.

Зроблено спробу отримати точний поліноміальний алгоритм для задачі зі змінною шириною, в якій граф є бінарним деревом. При розгляді випадків неоптимальності алгоритму, заснованого на рівневому принципі, для цієї задачі виділені бажані вимоги, яким має задовольняти алгоритм. Однією з них є



незалежність вибору вершин від місткостей наступних місць в упорядкуванні. Запропоновано алгоритм, що відповідає всім бажаним вимогам, та проведено обчислювальний експеримент для порівняння його з алгоритмом, заснованим на рівневному принципі. Подальший аналіз показав, що побудувати точний алгоритм, що має зазначену властивість неможливо.

Для врахування неповного завантаження виконавців запропоновано нову постановку задачі, в якій виконавці мають визначені «вихідні», під час яких вони не можуть виконувати завдання. Для розв'язання такої задачі запропоновано використати алгоритм, заснований на максимальному паросполученні, в якому з графу досяжності видалялися ребра між вершинами-завданнями одного виконавця. В загальному випадку такий алгоритм виявився лише наближеним, як і алгоритм, заснований на лексикографічному помічені.

**Четвертий розділ** містить опис програмного забезпечення, що було розроблено в рамках дослідження для проведення чисельних експериментів для оцінки ефективності запропонованих у роботі алгоритмів та методів порівняно з відомими класичними. Керівництво користувача містить інструкції, щодо можливостей використання програмного забезпечення для самостійного розв'язування задач упорядкування.

За результатами досліджень зроблені наступні **ВИСНОВКИ**:

1. Дістала подальшого розвитку теорія розв'язання задач дискретної оптимізації та її використання в задачах упорядкування, зокрема отримані результати, що дозволяють розглядати лише класичні задачі, в яких шукане упорядкування є щільним та ширина парною; розроблений підхід, що дозволяє перенести результати для класичних задач на задачі зі змінною шириною; отримані узагальнення відомих спеціальних упорядкувань  $\underline{S}$  та  $\bar{S}$ , які враховують ширину упорядкування, та запропонована необхідна умова існування щільних упорядкувань.

2. Розроблено новий апарат для отримання точних розв'язків задач у загальних постановках, який включає новий підхід до скорочення перебору у методі гілок та меж за рахунок видалення гілок, які відповідають ізоморфним підграфам; покращені оцінки знизу довжини упорядкування для класичної задачі та послідовність таких оцінок, кожна наступна з яких, теоретично, є точнішою за попередні.

3. Розроблені та обґрунтовані методи та алгоритми поліноміальної складності для отримання точних та наближених розв'язків, до яких відносяться використання алгоритму, заснованого на максимальному паросполученні, до задач із щільним упорядкуванням та парною шириною упорядкування, модифікації цього алгоритму, наближений підхід до скорочення перебору у методі гілок та меж на базі потужних інваріантів графів; алгоритм для пошуку щільних упорядкувань, заснований на методі гілок та меж з обмеженою глибиною пошуку та наближений поліноміальний online-алгоритм розв'язання задачі зі змінною шириною.



4. Вперше розглянуто клас задач упорядкування з вихідними, який враховує неповне завантаження працівників. Проведено його порівняння з іншими відомими класами, продемонстрована істотність введених обмежень та запропоновано наближений алгоритм їх розв'язання.

5. Засобами об'єктно-орієнтованої мови програмування C# розроблений програмний продукт з інтерфейсом користувача, що реалізує відомі та запропоновані алгоритми для проведення обчислювальних експериментів та розв'язання модельних прикладів.

6. На базі розробленого програмного продукту проведено обчислювальні експерименти для перевірки гіпотез та результатів для деяких отриманих наближених алгоритмів, зокрема для ітеративної модифікації алгоритму, заснованого на максимальному паросполученні, шляхом перевірки припущень та висування нових на основі аналізу отриманих результатів; для визначення ефективності наближених запропонованих алгоритмів для задачі з шуканим щільним упорядкуванням та задачі зі змінною шириною в порівнянні з іншими відомими поліноміальними алгоритмами, заснованими на рівневому принципі.

#### **ЗАПИТАННЯ ТА ВІДПОВІДІ**

**Член-кореспондент НАН України, д-р фіз.-мат. наук, проф. Кісельова О. М., в.о. декана факультету прикладної математики:**

Костянтин, зупиниться окремо на науковій новизні. Задача, яку Ви розглядаєте, достатньо складна і вона досліджувалася також й іншими науковцями. Які нові результати вдалося отримати Вам для розв'язання цієї задачі?

**Караваєв К. Д.:**

Насправді майже всі згадані результати є новими: зведення задач до інших підкласів, зокрема до задач із щільним упорядкуваннями; модифікація алгоритму, заснованого на максимальному паросполученні; удосконалення оцінок знизу довжини упорядкування, зокрема побудова послідовності оцінок; новий підхід до скорочення перебору методом гілок та меж шляхом видалення ізоморфних гілок, розглянуто новий клас задач з вихідними, тощо.

**Член-кореспондент НАН України, д-р фіз.-мат. наук, проф. Кісельова О. М., в.о. декана факультету прикладної математики:**

Тобто, одержано багато нових результатів. Отримання яких з них викликало найбільші складнощі?

**Караваєв К. Д.:**

Найбільші складнощі виникли при отриманні результатів для випадкової модифікації алгоритму, заснованого на максимальному паросполученні. Цікаво було



б встановити залежність кількості перенумерацій, які потрібно виконати, аби знайти оптимальний розв'язок з високою ймовірністю, від розмірності графу та ширини упорядкування. З проведених обчислювальних експериментів відомо лише, що 10 повторів дозволяють отримати точність 98,5% для графів до 100 вершин, а 100 повторів – майже 100%.

**Член-кореспондент НАН України, д-р фіз.-мат. наук, проф. Кісельова О. М., в.о. декана факультету прикладної математики:**

Як Ви вважаєте, які перспективні напрямки подальших дослідження даної тематики?

**Караваєв К. Д.:**

Один з можливих напрямків продовження досліджень, пов'язаний з тим, що теорема про можливість знаходження щільного упорядкування алгоритмом, заснованим на максимальному паросполученні, може бути узагальнена і на інші задачі. Так, якщо для деякої задачі вдасться розробити метод зведення її до задачі із щільним упорядкуванням, то до неї можна буде застосовувати згаданий алгоритм.

**Член-кореспондент НАН України, д-р фіз.-мат. наук, проф. Кісельова О. М., в.о. декана факультету прикладної математики:**

Чи можна отримані результати використовувати на практиці, та в яких напрямках?

**Караваєв К. Д.:**

Таких напрямків досить багато, тому зазначу, на мою думку, найцікавіші.

Зараз активно розвивається технологія туманних обчислень, при яких обчислення розподіляються не тільки між серверами, а й між іншими пристроями у мережі. В рамках цього напрямку ці задачі використовуються, аби одночасно мінімізувати витрати енергії, час комунікації та виконання запитів.

Відмічу також автоматичне розпаралелення програмного коду. Ефективна паралелізація вимагає від розробників значних часових витрат. Граф виконання можна побудувати, виходячи з машинного коду, але побудова схеми паралелізації цього коду має дуже велику алгоритмічну складність. Якщо вдасться розробити поліноміальні алгоритми з прийнятною точністю, то це значно спростить та пришвидшить роботу програмістів.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гук Н. А., в.о. проректора з науково-педагогічної роботи, професорка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**



Які потужності графів Ви розглядали, чи є обмеження на потужність графів в самих алгоритмах? Оскільки зараз особливий інтерес для дослідження викликають графи великої розмірності, зокрема графи веб-ресурсів.

**Каравасв К. Д.:**

Обмеження накладаються складністю алгоритмів. Алгоритми кубічної складності важко застосовувати для графів, які мають розмірність більше тисячі вершин. Проте алгоритмічно простіші алгоритми, на кшталт алгоритмів, заснованих на рівневому принципі та на лексикографічному розмінені, можуть бути застосовані і до великих графів. З іншого боку, при їх застосуванні не завжди можна отримати результати з незначною похибкою.

В обчислювальних експериментах розглядалися графи до 100 вершин.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гук Н. А., в.о. проректора з науково-педагогічної роботи, професорка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Які практичні рекомендації, щодо застосування алгоритмів експоненційної складності Ви б могли запропонувати?

**Каравасв К. Д.:**

Виправданим використання цих алгоритмів може бути у випадку, коли упорядкування потрібно побудувати один раз. Якщо ж потрібно розв'язувати багато таких задач в режимі реального часу, як при моніторингу показників та обчислень «на льоту», то в цьому випадку краще використовувати деякі наближені алгоритми чи метаевристики.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гук Н. А., в.о. проректора з науково-педагогічної роботи, професорка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Наступне питання стосується практичного застосування та безпосередньо організації освітнього процесу в закладі освіти. Чи можуть певні задачі, які розглядаються, бути застосовані для організації освітнього процесу або зводиться до моделей, які досліджувались?

**Каравасв К. Д.:**

Так, в мене, навіть, був досвід їх використання в цьому контексті.

В рамках предмету «Методика викладання фахових дисциплін в вищій школі», одним з практичних завдань була побудова структурно-логічної схеми вивчення дисциплін.



В контексті розглянутих задач, вершини – це дисципліни, зв'язки – в якому порядку маємо їх вивчати, процес навчання розділений на семестри, в кожному семестрі можемо вивчати не більше 8 предметів. Потрібно побудувати упорядкування, яке зберігає структурно-логічну схему вивчення та встигнути викласти весь запланований матеріал за відведену кількість семестрів.

Я застосовував це до програми спеціальності «Системний аналіз», отриманий результат майже повністю співпав із порядком дисциплін, за яким ми навчалися.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гарт Л. Л., професорка кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Які з результатів Ви вважаєте найбільш вагомими?

**Каравасєв К. Д.:**

Найвагомішими вважаю результат, пов'язаний з випадковим алгоритмом, заснованим на максимальному паросполученні. Оскільки фактично отримали алгоритм, який має необмежену можливість для покращення точності. Можемо застосовувати його знову і знову (він має порівняно невелику алгоритмічну складність), при цьому гарантуємо, що можемо отримати точний результат. Для інших алгоритмів існують класи задач, для яких цього не вдасться досягнути, незалежно від кількості повторів. Цей алгоритм, натомість, має ознаки універсальності.

Цікавою також є частина дослідження, пов'язана з послідовністю оцінок знизу довжини упорядкування. На жаль, результат був отриманий наприкінці терміну підготовки дисертації, тому він залишився не достатньо вивченим. Перспективою є те, що можливо вдасться побудувати розклад функціоналу, визначеного на комбінаторних об'єктах, у деякому більш-менш аналітичному вигляді, що є винятковим для задач дискретної оптимізації.

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гарт Л. Л., професорка кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Хотілося б почути про програмне забезпечення, яке довелося розробити, аби реалізувати досліджувані алгоритми.

**Каравасєв К. Д.:**

Програма застосовувалась переважно для проведення обчислювальних експериментів. Наприклад, для алгоритму, заснованого на максимальному паросполученні, теоретично все обґрунтовано, але важко було практично оцінити



точність. Тільки завдяки тому, що його було реалізовано та проведено обчислювальні експерименти і їх аналіз, вдалося отримати наведений результат.

Також був створений інтерфейс користувача, щоб була змога розв'язувати принаймні модельні приклади. Приклади ж великої розмірності потребують від користувача побудови графу, що саме по собі є достатньо важкою задачею.

**Д-р техн. наук, проф. Байбуз О. Г., завідувач кафедри математичного забезпечення електронних обчислювальних машин:**

Чи не є задача побудови графу залежності реального процесу складнішою за первину задачу побудови упорядкування?

**Караваєв К. Д.:**

Дуже гарне питання. Дійсно, для великих та складних процесів це потребує багато часу від людини-експерта, а часто також потребує задіяння декількох експертів. Проте зараз активно розвиваються великі мовні моделі, що засновані на нейронних мережах. Так, використовуючи, наприклад, ChatGPT, можна надати йому всі наявні данні про процес та поставити задачу побудувати граф для цього процесу. Думаю, що з допустимою точністю йому вдасться всі ці зв'язки виокремити. Тобто зараз вже маємо технології, які дозволять об'єднати та узагальнити частини знань у граф, який може бути використаний для розв'язання задачі упорядкування.

З іншого боку, штучний інтелект поки що далекий від розв'язання задач дискретної оптимізації, оскільки йому складно охопити обмеження, що визначаються дискретною структурою.

**Голова, член-кореспондент НАН України, д-р. фіз.-мат. наук, проф. Кісельова О. М., в.о. декана факультету прикладної математики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Запитань більше немає. Переходимо до обговорення дисертаційної роботи. Слово має науковий керівник.

**ВИСТУП НАУКОВОГО КЕРІВНИКА:**

Мій офіційний відгук з оцінкою роботи аспіранта 4 року навчання Караваєва Костянтина Дмитровича подано до відділу аспірантури та голові на засіданні сьогоднішнього міжкафедрального наукового семінару.

Караваєв Костянтин у 2020 році закінчив факультет прикладної математики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара за спеціальністю «Системний аналіз», отримав фундаментальну математичну та ІТ-підготовку. Після закінчення магістратури виявив бажання вступити до аспірантури на кафедру



обчислювальної математики та математичної кібернетики, де й навчається до теперішнього часу.

З цими задачами аспірант познайомився, будучи студентом. Особливо зацікавився ними під час занять, коли вони вивчалися у рамках дисципліни «Паралельні алгоритми і системи». Після закінчення магістратури, захотів продовжити ними займатися, навчаючись в аспірантурі. Я погодилась бути його керівником.

Як аспіранта з усіх сторін характеризую лише позитивно. Хочу особливо відзначити його дисциплінованість та підвищену відповідальність до всього процесу навчання в аспірантурі, що стосується і освітньої, і наукової складової. Він завжди намагався виконувати більше завдань, ніж я перед ним ставила. Це можна побачити по результатам, які він отримав. Можна було б зупинитися раніше в дослідженнях і я вважаю, що тут зроблено більше, ніж потребує робота даного кваліфікаційного рівня.

Вважаю, що освітня і наукова складова виконана в повному обсязі. Результати гідно представлені. Вони достатньо апробовані на відповідних міжнародних наукових конференціях та школах-семінарах, підсумкових наукових конференціях Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара протягом 2021-2024 років.

Як науковий керівник я вважаю, що як науковець Караваєв К. є зрілим, володіє методологією проведення наукових досліджень і враховуючи отримані результати рекомендую його роботу до захисту на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 11 Математика та статистика зі спеціальності 113 Прикладна математика.

### **В ОБГОВОРЕННІ ДИСЕРТАЦІЇ КАРАВАЄВА К. Д. ВЗЯЛИ УЧАСТЬ:**

**Член-кореспондент НАН України, д-р фіз.-мат. наук, проф. Кісельова О. М., в.о. декана факультету прикладної математики:**

Шановні колеги, ми почули викладення змістовного дослідження. Хочу звернути увагу, що наукова дискусія відбувалась була дуже плідною. Ті навички, яких набув Костянтин Дмитрович під час навчання в аспірантурі, дозволили йому на високому науковому рівні відповідати зараз на запитання та на зауваження, які були поставлені до роботи. Також хочу звернути увагу на високий науковий рівень представленої роботи, на те, що здобувач виконав усі необхідні умови, а саме – освітню складову, наукову складову, достатню кількість публікацій, широку апробацію цієї роботи.

Тому вважаю, що маємо підтримати цю роботу і рекомендувати її для подальшого захисту.



**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гук Н. А., в.о. проректора з науково-педагогічної роботи, професорка кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Дисертаційна робота, що розглядається сьогодні, присвячена актуальній тематиці, вносить суттєвий вклад в фундаментальні дослідження. У роботі Караваєва К. Д. чітко сформульовані та виконані поставлені задачі, доповідь добре структурована. Формальності виконані в повному обсязі. Достатня кількість публікацій.

Результат застосування до структурно-логічної схеми вивчення дисциплін є цікавим. Можна спробувати апробувати його також на програмах інших спеціальностей, щоб додатково довести, що розроблене програмне забезпечення, алгоритми та моделі є практично застосовуваними.

Я підтримую цю роботу і пропоную винести позитивне рішення нашого семінару та рекомендувати її до захисту на разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 113 Прикладна математика.

**Д-р техн. наук, проф. Байбуз О. Г., завідувач кафедри математичного забезпечення електронних обчислювальних машин:**

Робота мені сподобалась. В ній зроблено значний внесок у розробку методів та алгоритмів для розв'язання задач паралельного упорядкування вершин орієнтовних графів. Тема, безумовно, актуальна, багато розрахунків, всі формальності з публікаціями виконані, і здобувач, на мій погляд, набув необхідних професійних компетентностей для захисту роботи і отримання ступеня доктора філософії.

Маю коментар щодо наукової новизни. Аспірант зазначив, що всі згадані результати є новими, проте не завжди нові результати дисертаційних досліджень співпадають з науковою новизною, яка виноситься. Можливо варто переглянути список та дещо узагальнити деякі пункти, аби представити його у більш компактному вигляді.

Я підтримую колег, які позитивно оцінили роботу Костянтина Дмитровича. Робота актуальна, новизна, достовірність, практична цінність присутні. Вважаю, що дисертація готова, і рекомендую її до захисту на разовій раді за спеціальністю «Прикладна математика».

**Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гарт Л. Л., професорка кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Хочу подякувати здобувачу за цікаву доповідь, видно, що він гарно володіє матеріалом і багато з цих результатів були отримані особисто ним. Дуже цікаві були продемонстровані результати та задачі. Дуже добре, що вже є ідеї, які закладають підґрунтя для подальших досліджень.



Заслуговує на увагу представлення дисертаційної роботи. Нікому не вдалось поставити Костянтина Дмитровича в складне становище.

У цілому підтримую усіх попередніх доповідачів, що в роботі на достатньому рівні представлена і актуальність, і новизна, і достовірність, тому я також рекомендую її до захисту на разовій раді. Вважаю, що у нас немає підстав не проголосувати за те, щоб подати цю дисертацію до захисту, і побажати в цьому напрямі успіхів.

**Голова, член-кореспондент НАН України д-р. фіз.-мат. наук, проф. Кісельова О. М., в.о. декана факультету прикладної математики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:**

Чи є ще бажані виступити? Якщо бажаних немає, то давайте перейдемо до обговорення висновку.

## **ВИСНОВОК**

### **Актуальність теми дисертації**

Математична теорія паралельного упорядкування є одним з потужних інструментів розв'язання багатьох теоретичних та практичних задач, що можуть бути зведеними до оптимізаційних задач на графах. Її результати застосовуються при плануванні схем та розкладів виробництва, побудові мікросхем, багатопотоковій обробці даних, паралелізації та розподіленні обчислень та в інших сферах, де на порядок виконання задач накладається деяка множина несуперечливих технологічних обмежень. У загальному випадку більшість таких задач, навіть у найпростіших постановках, відносяться до класу NP-важких, тому важливим є як пошук підкласів задач, для яких існують точні поліноміальні алгоритми, так і побудова наближених алгоритмів з прийнятним рівнем похибки отриманих розв'язків.

Історично перші поліноміальні алгоритми розв'язання таких задач були засновані на рівневому принципі, використанні максимального паросполучення та лексикографічного помічення. Перший є точним для графів-лісів, інші – для класичної постановки задачі з двома виконавцями. Ці алгоритми легко модифікувати, що дозволяє значно розширити межі їх застосовності.

Точні поліноміальні алгоритми, отримані в подальших дослідженнях, найчастіше були засновані на переборі та мали експоненційну алгоритмічну складність. На практиці вони є малоприматними, що додатково підтверджує актуальність отримання наближених алгоритмів прийнятної точності з малою алгоритмічною складністю.

Класична постановка задачі передбачає, що всі виконавці є універсальними, їх кількість є сталою і час виконання кожної роботи є однаковим. Вона є далекою від



реальних умов, що зумовило розробку її узагальнень, що детальніше враховують практичні аспекти процесів, які моделюються. До них належать: наявність затримок, різний час виконання робіт, можливість переривання виконання, зазначення проміжків часу, в які має бути завершена кожна або деякі з робіт (директивні строки); завдання, виконання яких потребує одночасної роботи декількох, можливо конкретних, виконавців; змінна кількість виконавців, різні варіанти цільових функцій, тощо. Задачі, що враховують перелічені узагальнення, окрім того, що також найчастіше належать класу NP-важких, можуть й зовсім не мати розв'язків. Це та той факт, що для моделювання реальних процесів зазвичай необхідно враховувати якусь комбінацію з наведених обмежень, підкреслюють важливість побудови ефективних наближених підходів та алгоритмів як універсальних, так і специфічних для конкретних постановок.

**Затвердження теми та плану дисертації.** Тема дисертації затверджена вченою радою Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара 19 листопада 2020 р., протокол № 4. Науковим керівником призначено канд. фіз.-мат. наук, доц. Турчину В. А.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційне дослідження проводилося в рамках тем науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України «Математичні моделі, методи та алгоритми розв'язання задач аналізу складних систем» (№ держреєстрації 0119U101302, 2019–2021 рр.), «Розробка та реалізація методів оптимального функціонування складних систем» (№ держреєстрації 0122U001466, 2022–2024 рр.) при кафедрі обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

**Публікації та особистий внесок здобувача.** За темою дисертації опубліковано 5 статей. Одна стаття опублікована у виданні, що індексується наукометричною базою Scopus; три статті у наукових фахових виданнях України категорії Б, 1 стаття в науковому фаховому виданні України з фізико-математичних наук. Усі результати дисертації, що виносяться на захист, отримані автором особисто. Визначення загального плану досліджень належить науковому керівнику В. А. Турчиній. У працях, що опубліковані у співавторстві, здобувачеві належить: постановка задачі з вихідними, порівняння з іншими відомими постановками, наближений алгоритм її розв'язання та аналіз його властивостей; новий підхід до скорочення перебору за рахунок видалення гілок, які відповідають ізоморфним підграфам, дослідження взаємозв'язку між вершинами, які видаляються, та відповідними підграфами, алгоритм розгалуження без ізоморфізму та дослідження його властивостей; твердження, що дозволяють звести класичні задачі упорядкування до задач з щільними упорядкуваннями, твердження про існування максимального паросполучення, за яким можна побудувати оптимальний розв'язок, модифікації алгоритму, заснованого на максимальному паросполученні, порівняльний аналіз цих



модифікацій на основі обчислювальних експериментів; уточнена оцінка знизу довжини упорядкування та порівняльний аналіз з іншими відомими оцінками. Публікації Караваєва К. Д. відповідають вимогам пп. 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами).

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Обґрунтованість і достовірність одержаних результатів забезпечується коректним застосуванням математичного апарату й апробованих методів теорії оптимального упорядкування, теорії графів, дискретної та комбінаторної оптимізації, теорії розкладів; а в часткових випадках їхньою перевіркою шляхом проведення обчислювальних експериментів.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

- *вперше* теоретично обґрунтовано можливість зведення будь-якої класичної задачі оптимального упорядкування до задачі із щільним упорядкуванням та шириною заданої парності;

- *дістав подальшого розвитку* класичний алгоритм розв'язання для двох виконавців для побудови щільних упорядкувань;

- удосконалено оцінки знизу довжини упорядкування для класичної задачі паралельного упорядкування;

- *вперше* запропоновано підхід для скорочення перебору у методі гілок та меж за рахунок виключення гілок, що відповідають ізоморфним підграфам: розглянуті точні та наближені варіанти його реалізації;

- *вперше* отримана необхідна умова існування щільних упорядкувань та запропоновані ефективні алгоритми її перевірки для загальної та спеціальної структур графів;

- *вперше* побудовано наближений алгоритм для задач з щільними упорядкуваннями, який заснований на методі гілок та меж з обмеженою глибиною пошуку;

- *вперше* побудовано послідовність оцінок знизу довжини упорядкування, в якому кожна наступна оцінка, теоретично, є точнішою за попередні;

- *дістав подальшого розвитку* спосіб визначення діапазону допустимих місць вершин, шляхом врахування ширини упорядкування;

- *вперше* теоретично обґрунтовано можливість зведення задачі зі змінним значенням ширини упорядкування до класичної задачі;

- *отримані нові наукові дані* про поліноміальні наближені алгоритми для розв'язання задачі зі змінною шириною для вхідних бінарних дерев: запропоновано та досліджено online-алгоритм, продемонстровано, що побудова точного online-алгоритму для такого класу задач в принципі неможлива;



– *вперше* розглянуто клас узагальнених задач оптимального упорядкування з неповним завантаженням: показана можливість зведення до інших відомих класів задач паралельного упорядкування, запропоновано наближений алгоритм до розв’язання задач з цього класу;

– створено програмний продукт, використовуючи засоби об’єктно-орієнтованої мови програмування C#;

– проведено обчислювальні експерименти для визначення ефективності запропонованих методів та алгоритмів.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Отримані в результаті дослідження методи й алгоритми можуть бути застосовані до розв’язання прикладних задач, що зводяться в математичній постановці до задач оптимального упорядкування вершин орієнтованих графів. Отримані результати можуть підвищити ефективність побудови розкладів виконання завдань у різних практично важливих сферах та галузях, зокрема у промисловому виробництві, питаннях логістики, пріоритетності використання та розподілу ресурсів, паралелізації та розподілення обчислень, обробки та моніторингу даних в режимі реального часу тощо. Також вони можуть мати важливе значення для подальшого розвитку сучасних технологій, зокрема автоматичного розпаралелення, та слугувати підґрунтям для нових напрямків наукових пошуків за цією тематикою.

### **Список опублікованих праць за темою дисертації**

*Статті у наукових фахових виданнях України:*

1. Караваєв К. Д. Про необхідні умови існування щільних упорядкувань в класичній задачі паралельного упорядкування. *Збірник наукових праць «Системні технології»*, м. Дніпро, 2024. Вип. 151. С. 76–91. doi: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-151-2024-07>. Режим доступу до ресурсу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/1711>.

2. Караваєв К. Д., Турчина В. А. Узагальнення задач упорядкування з урахуванням неповного завантаження. *Збірник наукових праць «Питання прикладної математики і математичного моделювання»*, м. Дніпро, 2022. Вип. 22. С. 67–79. doi: <https://doi.org/10.15421/322207>. Режим доступу до ресурсу: <https://pmm.dp.ua/index.php/pmmm/article/view/341>.

3. Караваєв К. Д., Турчина В. А. Аналіз впливу автоморфізму графу на схеми направленої перебору. *Збірник наукових праць «Питання прикладної математики і математичного моделювання»*, м. Дніпро, 2021. Вип. 21. С. 94–104. doi: <https://doi.org/10.15421/322110>. Режим доступу до ресурсу: <https://pmm.dp.ua/index.php/pmmm/article/view/313>.

4. Турчина В. А., Караваєв К. Д. Дослідження оцінок довжини паралельного упорядкування вершин графу. *Збірник наукових праць «Питання прикладної*



математики і математичного моделювання», м. Дніпро, 2018. Вип. 18. С. 186–195. doi: <https://doi.org/10.15421/321819>. Режим доступу до ресурсу: <https://pmm.dp.ua/index.php/pmmm/article/view/236>.

*Стаття у науковому фаховому виданні України, яке входить до міжнародної наукометричної бази даних Scopus*

5. Turchyna V., Karavaiev K. Analysis of algorithms for constructing dense sequencing of digraphs vertices. *Proceedings of The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020)*, Zaporizhzhia, 2020. P. 690–703. doi: <https://doi.org/10.32782/cmisis/2608-53>. Режим доступу до ресурсу: <https://ceur-ws.org/Vol-2608/paper53.pdf> (Scopus).

*Додаткові праці апробаційного характеру*

1. Турчина В. А., Караваєв К. Д. Контрприклад до алгоритму перерахування паралельно-послідовних графів без ізоморфізму. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MSSIS-2023): Матеріали XXI міжнародної науково-практичної конференції, 22-24 листопада 2023 р., м. Дніпро, 2023. С. 291–292. Режим доступу до ресурсу: <http://mpzis.dnu.dp.ua/wp-content/uploads/2023/11/mpzis-2023.pdf>.*

2. Караваєв К. Д., Турчина В. А. Про необхідні та достатні умови наявності автоморфізму у паралельно-послідовних графах. *Комбінаторні конфігурації та їхні застосування: Матеріали XXV Міжнародного науково-практичного семінару імені А. Я. Петренюка, (Запоріжжя – Кропивницький, 14-16 червня 2023 року) / за ред. Г.П. Донця, м. Запоріжжя - Кропивницький, 2023. С. 122–129. Режим доступу до ресурсу: [https://zp.edu.ua/uploads/dept\\_s&r/2023/conf/1.4/Petrenyuk\\_ISPS-25-proc.pdf](https://zp.edu.ua/uploads/dept_s&r/2023/conf/1.4/Petrenyuk_ISPS-25-proc.pdf).*

3. Караваєв К. Д. Використання інваріантів графів для скорочення напрямленого перебору у задачах упорядкування. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MSSIS-2022): Матеріали XX ювілейної міжнародної науково-практичної конференції, 23-25 листопада 2022 р., м. Дніпро, 2022. С. 96–97. Режим доступу до ресурсу: <http://mpzis.dnu.dp.ua/wp-content/uploads/2022/12/MPZIS-2022-1.pdf>.*

4. Караваєв К. Д., Турчина В. А. Про зв'язок задач ізоморфізму графів та упорядкування їх вершин. *Комбінаторні конфігурації та їхні застосування: Матеріали XXIV Міжнародного науково-практичного семінару імені А. Я. Петренюка, (Запоріжжя – Кропивницький, 13-14 травня 2022 року) / за ред. Г.П. Донця, м. Запоріжжя - Кропивницький, 2022. С. 30–33. Режим доступу до ресурсу: [https://zp.edu.ua/uploads/dept\\_s&r/2023/conf/1.4/Petrenyuk\\_ISPS-25-proc.pdf](https://zp.edu.ua/uploads/dept_s&r/2023/conf/1.4/Petrenyuk_ISPS-25-proc.pdf).*

5. Караваєв К. Д., Турчина В. А. Деякі узагальнення задачі паралельного упорядкування. *Комбінаторні конфігурації та їхні застосування: Матеріали XXIII Міжнародного науково-практичного семінару імені А. Я. Петренюка, присвяченого 70-річчю Льотної академії Національного авіаційного університету, (Запоріжжя –*



*Кропивницький, 13-15 травня 2021 року*) / за ред. Г.П. Донця, м. Запоріжжя - Кропивницький, 2021. С. 93–97. Режим доступу до ресурсу: [https://www.glau.kr.ua/images/docs/sbornik/materiali\\_23\\_mnp\\_seminaru.pdf](https://www.glau.kr.ua/images/docs/sbornik/materiali_23_mnp_seminaru.pdf).

6. Karavaiev K., Turchyna V., Hurko O. The problem of consistencing the architecture of computational systems and algorithms. *Сучасні науково-технічні дослідження у контексті мовного простору (іноземними мовами) 13 травня 2021 року: матеріали X Регіональної науково-практичної конференції молодих учених та студентів*, м. Дніпро, 2021. С. 142–145. Режим доступу до ресурсу: [https://www.dnu.dp.ua/docs/ndc/2021/19\\_Сучасні%20науково-технічні%20дослідження%20у%20контексті%20мовного%20простору.pdf](https://www.dnu.dp.ua/docs/ndc/2021/19_Сучасні%20науково-технічні%20дослідження%20у%20контексті%20мовного%20простору.pdf).

7. Турчина В. А., Караваєв К. Д. Дослідження оцінки точності алгоритму, заснованого на лексикографічному порядку. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MSSIS-2019): Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції, 20-22 листопада 2019 р., м. Дніпро, 2019. С. 258–259.* Режим доступу до ресурсу: [http://mpzis.dnu.dp.ua/wp-content/uploads/2019/12/MPZIS\\_2019.pdf](http://mpzis.dnu.dp.ua/wp-content/uploads/2019/12/MPZIS_2019.pdf).

8. Турчина В. А., Караваєв К. Д. Застосування рівневого принципу до аналізу задач паралельного упорядкування та їх узагальнення. *Міжнародний науковий симпозиум «Інтелектуальні рішення». Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): праці міжнар. наук.-практ. конф., 15-20 квітня 2019 р., м. Ужгород, 2019. С. 56–57.* Режим доступу до ресурсу: <https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/3192/1/OI-2019.pdf>.

**На підставі заслуховування та обговорення доповіді Караваєва К. Д. про основні положення дисертаційної роботи, питань та відповідей на них УХВАЛИЛИ:**

1. Вважати, що за актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованості, наукової та практичної цінності здобутих результатів дисертація Караваєва Костянтина Дмитровича на тему «Методи і алгоритми розв'язання класичних та узагальнених задач упорядкування вершин орграфів» відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами).

2. Рекомендувати дисертаційну роботу Караваєва Костянтина Дмитровича на тему «Методи і алгоритми розв'язання класичних та узагальнених задач упорядкування вершин орграфів» до захисту в разовій спеціалізованій вченій раді на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

3. Клопотати перед вченою радою університету розглянути питання про створення спеціалізованої вченої ради для проведення разового захисту дисертації



на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика  
 Караваєва Костянтина Дмитровича у такому складі:

№ з/п	Прізвище, ім'я, по батькові	Місце основної роботи, підпорядкування, посада	Науковий ступінь, шифр, назва спеціальності, за якою захищена дисертація, рік присудження	Вчене звання (за спеціальністю, кафедрою), рік присвоєння	Наукові публікації, опубліковані за останні п'ять років, за науковим напрямом, за яким підготовлено дисертацію здобувача
1	2	3	4	5	6
	Кісельова Олена Михайлівна (голова)	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України, в.о. декана факультету прикладної математики	доктор фізико-математичних наук, 01.05.01 – теоретичні основи інформатики та кібернетики 1992 р., Україна	професор кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики, 1994 р., Україна	<p>1. Кісельова О. М., Притоманова О. М. Нечітка задача оптимального розбиття множин з обмеженнями на розміщення центрів підмножин. <i>Системні дослідження та інформаційні технології</i>. 2020. Вип. 2020, № 1. С. 78–89. doi: <a href="https://www.doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2020.1.07">https://www.doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2020.1.07</a>. Режим доступу до ресурсу: <a href="http://journal.iasa.kpi.ua/article/view/209136">http://journal.iasa.kpi.ua/article/view/209136</a>. (Scopus)</p> <p>2. Кісельова О. М., Притоманова О. М., Гарт Л. Л. Застосування теорії оптимального розбиття множин до розв'язання задач штучного інтелекту та розпізнавання образів. <i>Системні дослідження та інформаційні технології</i>. 2021. Вип. 2021, № 4. С. 91–101. doi: <a href="https://www.doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2021.4.07">https://www.doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2021.4.07</a>. Режим доступу до ресурсу: <a href="http://journal.iasa.kpi.ua/article/view/252300">http://journal.iasa.kpi.ua/article/view/252300</a>. (Scopus)</p> <p>3. Bulat A., Kiseleva E., Hart L., Prytomanova O. Generalized Models of Logistics Problems and Approaches to Their Solution Based on the Synthesis of the Theory of Optimal Partitioning and Neuro-Fuzzy Technologies. <i>Studies in Computational Intelligence</i>. 2023. Vol. 1107. P. 355–376. doi: <a href="https://www.doi.org/10.1007/978-3-031-37450-0_21">https://www.doi.org/10.1007/978-3-031-37450-0_21</a>. Режим доступу до ресурсу:</p>



1	2	3	4	5	6
					<a href="https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-37450-0_21">https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-37450-0_21</a> . (Scopus)
2.	Пічугіна Оксана Сергіївна (опонент)	Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України, професор кафедри математичного моделювання та штучного інтелекту	доктор фізико-математичних наук, 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, 2019 р., Україна	професор кафедри математично-го моделювання та штучного інтелекту, 2024 р., Україна	<p>1. Koliechkina L., Pichugina O. A horizontal method of localizing values of a linear function in permutation-based optimization. <i>H. A. Le Thi, H. M. Le, and T. Pham Dinh (eds.), Optimization of Complex Systems: Theory, Models, Algorithms and Applications, Springer Intern. Publ., Cham, 2020. P. 355–364. doi: <a href="https://doi.org/10.1007/978-3-030-21803-4_36">https://doi.org/10.1007/978-3-030-21803-4_36</a></i>. Режим доступу до ресурсу: <a href="https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-21803-4_36">https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-21803-4_36</a>. (Scopus)</p> <p>2. Koliechkina L., Pichugina O., Dvirna O. Horizontal method application to multiobjective combinatorial optimization over permutations. <i>2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis &amp; Intelligent Computing (SAIC). Kyiv, Ukraine, 2022. P. 1–5. doi: <a href="https://doi.org/10.1109/SAIC57818.2022.9923018">https://doi.org/10.1109/SAIC57818.2022.9923018</a></i>. Режим доступу до ресурсу: <a href="https://ieeexplore.ieee.org/document/9923018">https://ieeexplore.ieee.org/document/9923018</a>. (Scopus)</p> <p>3. Pichugina O., Yakovlev S. Continuous extensions on Euclidean combinatorial configurations. <i>Buletinul Academiei de Ştiinţe a Moldovei. Matematica. 2022. Vol. 98. P. 3–21. doi: <a href="https://doi.org/10.56415/basm.y2022.i1.p3">https://doi.org/10.56415/basm.y2022.i1.p3</a></i>. Режим доступу до ресурсу: <a href="https://www.math.md/publications/basm/issues/y2022-n1/13579/">https://www.math.md/publications/basm/issues/y2022-n1/13579/</a>. (Scopus)</p>
3.	Козін Ігор Вікторович (опонент)	Запорізький національний університет Міністерства освіти і науки України, професор	доктор фізико-математичних наук, 01.05.02 – математичне моделювання та	професор кафедри економічної кібернетики, 2015 р., Україна	<p>1. Kozin I. V., Maksyshko N. K., Perepelitsa V. A. A Fragmented Model for the Problem of Land Use on Hypergraphs. <i>Cybern Syst Anal. 2020. Vol. 56, no. 5. P. 753–757. doi: <a href="https://doi.org/10.1007/s10559-020-">https://doi.org/10.1007/s10559-020-</a></i></p>



1	2	3	4	5	6
		кафедри економічної кібернетики	обчислювальні методи, 2010 р., Україна		<p>00295-w. Режим доступу до ресурсу: <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s10559-020-00295-w">https://link.springer.com/article/10.1007/s10559-020-00295-w</a>. (Scopus)</p> <p>2. Козін І., Максишко Н., Терешко Я. Метод імітації відпалу для задачі рівноважного розміщення. <i>Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології</i>. 2021. Вип. 32. С. 152–158. doi: <a href="https://doi.org/10.15407/fmmit2021.32.152">https://doi.org/10.15407/fmmit2021.32.152</a>. Режим доступу до ресурсу: <a href="http://www.fmmit.lviv.ua/index.php/fmmit/article/view/178">http://www.fmmit.lviv.ua/index.php/fmmit/article/view/178</a>. (фахове видання, категорія «Б»)</p> <p>3. Козін І. В., Нарзуллаєв У. Х., Алломов З. К. Алгоритм перемішаних стрибаючих жаб у задачі розміщення виробництва. <i>Computer Science and Applied Mathematics</i>. 2023. Вип. 1. С. 11–18. doi: <a href="https://doi.org/10.26661/2786-6254-2023-1-02">https://doi.org/10.26661/2786-6254-2023-1-02</a>. Режим доступу до ресурсу: <a href="https://journalsofznu.zp.ua/index.php/comp-science/article/view/3217">https://journalsofznu.zp.ua/index.php/comp-science/article/view/3217</a>. (фахове видання, категорія «Б»)</p>
4.	Семенюта Марина Фролівна (опонент)	Центрально-український національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри вищої математики та фізики	кандидат фізико-математичних наук, 01.01.08 - математична логіка, теорія алгоритмів і дискретна математика, 2008 р., Україна	доцент кафедри фізико-математичних дисциплін, 2013 р., Україна	<p>1. Semeniuta M. F. Super Fibonacci graceful graphs and Fibonacci cubes. <i>Control Systems and Computers</i>. 2020. Vol. 2020, no. 5. P. 34–41. doi: <a href="https://doi.org/10.15407/csc.2020.05.034">https://doi.org/10.15407/csc.2020.05.034</a>. Режим доступу до ресурсу: <a href="http://usim.org.ua/arch/2020/5/5.pdf">http://usim.org.ua/arch/2020/5/5.pdf</a>. (фахове видання, категорія «Б»)</p> <p>2. Semeniuta M. F., Donets G. A. Group Labeling of some Graphs. <i>Cybern Syst Anal</i>. 2020. Vol. 56, no. 5. P. 701–709. doi: <a href="https://doi.org/10.1007/s10559-020-00287-w">https://doi.org/10.1007/s10559-020-00287-w</a>. Режим доступу до ресурсу: <a href="https://dSPACE.sfa.org.ua/bitstream/123456789/704/1/Semeniuta_labeling.pdf">https://dSPACE.sfa.org.ua/bitstream/123456789/704/1/Semeniuta_labeling.pdf</a>. (Scopus)</p> <p>3. Semeniuta M. F. Combinatorial</p>



1	2	3	4	5	6
					<p>Configurations in the Definition of Antimagic Labelings of Graphs. <i>Cybern Syst Anal.</i> 2021. Vol. 57, no. 2. P. 196–204. doi: <a href="https://doi.org/10.1007/s10559-021-00344-y">https://doi.org/10.1007/s10559-021-00344-y</a>. Режим доступу до ресурсу: <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s10559-021-00344-y">https://link.springer.com/article/10.1007/s10559-021-00344-y</a>. (Scopus)</p>
5.	Гук Наталія Анатоліївна (рецензент)	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України, в.о. проректора з науково-педагогічної роботи	доктор фізико-математичних наук, 01.02.04-механіка деформівного твердого тіла 2011 р., Україна	професор кафедри комп'ютерних технологій, 2016 р., Україна	<p>1. Гук Н. А., Диханов С. В., Долотов І. О. Аналіз структури сайту з використанням поняття модулярності. <i>Математичне та комп'ютерне моделювання</i>. Серія: фіз.-мат. наук., 2020. Вип. 21. С. 99–114. doi: <a href="https://doi.org/10.32626/2308-5878.2020-21.99-114">https://doi.org/10.32626/2308-5878.2020-21.99-114</a>. Режим доступу до ресурсу: <a href="http://mcm-math.kpnu.edu.ua/article/view/22494">http://mcm-math.kpnu.edu.ua/article/view/22494</a></p> <p>3. (фахове видання, категорія «Б»)</p> <p>2. Guk N., Verba O., Yevlakov V. Design of a Recommendation System Based on the Transition Graph. <i>Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.</i> 2021. Vol. 3, no. 4. P. 24–31. doi: <a href="https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233501">https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233501</a>. Режим доступу до ресурсу: <a href="http://journals.uran.ua/eejet/article/view/233501">http://journals.uran.ua/eejet/article/view/233501</a>. (фахове видання, категорія «А»)</p> <p>3. Долотов І. О., Гук Н. А. Кластеризація зваженого вебграфу із використанням модулярності. <i>Збірник наукових праць «Питання прикладної математики і математичного моделювання»</i>. Дніпро, 2023. Вип. 23. С. 45–52. doi: <a href="https://doi.org/10.15421/322305">https://doi.org/10.15421/322305</a>. Режим доступу до ресурсу: <a href="https://pm-mm.dp.ua/index.php/pmmm/article/view/374">https://pm-mm.dp.ua/index.php/pmmm/article/view/374</a>. (фахове видання, категорія «Б»)</p>



**Результати голосування:**

«За» – 43 особи,

«Проти» – немає,

«Утримались» – немає.

**Голова  
наукового семінару**

**Секретар**



**Олена КІСЕЛЬОВА**

**Олександр КУЗЕНКОВ**