

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Іванова Сергія Сергійовича
«Математичне моделювання задач цифрової обробки зображень на основі
чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань
11 – Математика та статистика за спеціальністю 113 – Прикладна математика

Детальний аналіз дисертаційної роботи Іванова Сергія Сергійовича на тему «Математичне моделювання задач цифрової обробки зображень на основі чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій», що представлена для захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії у Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, дає змогу зробити комплексний висновок щодо її актуальності, ступеня обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, достовірності та значущості отриманих результатів, наукової новизни, теоретичної та практичної цінності, надати загальну оцінку дисертації.

1. Обґрунтування вибору теми дослідження. На сучасному етапі розвитку інформаційних технологій та комп'ютерної техніки задачі цифрової обробки зображень набувають особливого значення в широкому спектрі прикладних галузей – від медичної діагностики, дистанційного зондування Землі, систем комп'ютерного зору. Однією з актуальних проблем математичного моделювання в цій галузі є побудова точних і обчислювально ефективних методів чисельного інтегрування багатовимірних швидко осцилюючих функцій. Особливо складними є задачі, у яких інформація про функції доступна лише на окремих площинах, лініях чи сітках спеціального вигляду. У таких випадках класичні методи чисельного інтегрування не забезпечують необхідної точності або є надмірно ресурсоемними. Це обумовлює потребу в розробці нових чисельних методів, які враховують специфіку вихідних даних.

Таким чином, тема дисертації є актуальною як з теоретичної, так і з практичної точки зору. Вона спрямована на побудову кубатурних формул для обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій двох та трьох змінних з

використанням спеціальних інформаційних операторів. Запропоновані в роботі алгоритми відкривають перспективи для підвищення ефективності та точності чисельного аналізу в задачах прикладної математики, зокрема обробки цифрових зображень.

2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення.

Дисертація Іванова Сергія Сергійовича є завершеною науковою роботою, містить дві анотації – українською та англійською мовами, вступ, чотири розділи, висновки, список літератури і додатки. У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету, об'єкт, предмет, основні задачі дисертаційного дослідження, визначено наукову новизну роботи і практичне значення отриманих результатів. У першому розділі проаналізовано основні методи чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій, які використовуються при математичному моделюванні задач цифрової обробки зображень. У другому розділі розроблено оптимальні за порядком точності методи для математичного моделювання задач цифрової обробки зображень з використанням потрійних інтегралів від швидко осцилюючих функцій загального виду у випадку, коли інформація по функції задається слідами на взаємно перпендикулярних площинах, лініях. Третій розділ спрямовано на удосконалення математичного моделювання задач цифрової обробки зображень з використанням подвійних інтегралів від швидко осцилюючих функцій загального виду у випадку, коли інформація по функції задається слідами на взаємно перпендикулярних лініях. Особливу увагу приділено економним схемам інтерполяції, які в своїй побудові вимагають знано менше значень функцій порівняно з класичними методами. У четвертому розділі дисертаційної роботи висвітлено тестування кубатурних формул наближеного обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій багатьох змінних загального виду.

Текст дисертаційної роботи добре структурований, викладений науковим стилем мовлення, кожний розділ містить висновки. Загальні висновки роботи підкреслюють наукову новизну проведених досліджень та логічно виходять із викладеного матеріалу, достатньо повно його відображають, дають відповідь на поставлені в роботі мету та завдання дослідження. Перелік використаної

літератури включає 125 джерел, додатки містять список публікацій здобувача за темою дисертації, акт впровадження. Текст дисертації вдало доповнюється таблицями, рисунками, в додатках містяться тексти програм. Оформлення дисертації та кількість публікацій здобувача відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44 (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій».

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

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі інформаційних комп'ютерних технологій і математики навчально-наукового інституту «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Проведені дослідження отримані С.С. Івановим під час виконання науково-дослідної роботи ФН 23-01 «Математичне моделювання та нові обчислювальні методи» в частині розробки та дослідження нових обчислювальних методів для задач цифрової обробки зображень з використанням в якості вхідної інформації значення функції на лініях та площинах.

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків.

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечено коректним використанням теорії оптимальних алгоритмів, чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій багатьох змінних.

Достовірність отриманих результатів забезпечується:

- доведенням теорем, результатами виконаних автором низки експериментальних досліджень в системах комп'ютерної математики;
- публікаціями наукових результатів в провідних фахових виданнях України;
- апробацією отриманих результатів на наукових конференціях;

- впровадженням отриманих результатів у наукову роботу кафедри інформаційних комп'ютерних технологій і математики Навчально-наукового інституту «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна.

Вищезазначене свідчить про те, що здобувач Іванов С.С. під час навчання згідно освітньо-науковій програмі «Прикладна математика» третього рівня вищої освіти, набув теоретичні знання, уміння, навички та відповідні компетенції, серед яких слід зазначити: здатність використовувати й адаптувати математичні теорії, методи та прийоми для доведення математичних тверджень і теорем; здатність обирати та застосовувати математичні методи для розв'язання прикладних задач, моделювання, аналізу, прогнозування; здатність аналізувати та оцінювати сучасний стан і тенденції розвитку інформаційних технологій та систем комп'ютерної математики; здатність сформулювати математичну постановку задачі, спираючись на постановку мовою предметної галузі, та обирати метод її розв'язання, що забезпечує потрібні точність і надійність результату; здатність розробляти алгоритми, програмні засоби та програмну документацію в галузі прикладної математики; здатність до проведення математичного і комп'ютерного моделювання, аналізу та обробки даних, обчислювального експерименту, розв'язання формалізованих задач за допомогою спеціалізованих програмних засобів.

5. Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна.

Дисертація містить наукову новизну, з найбільш суттєвих доробок роботи можна назвати наступне:

- вперше запропоновано математичні моделі та методи розв'язання задач цифрової обробки зображень на основі чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій багатьох змінних загального виду з використанням спеціальних інформаційних операторів;

- вперше отримано оптимальну за порядком точності на класі диференційовних функцій кубатурну формулу наближеного обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій трьох змінних загального виду у випадку, коли інформація про функції задається їх значеннями на площинах;

– вперше розглянуто оптимальні за порядком точності на класі диференційовних функцій кубатурні формули наближеного обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій двох змінних загального виду у випадку, коли інформація про функції задається їх значеннями на лініях. Запропоновані кубатурні формули використовують спеціальні інформаційні оператори з кусково-сталими та кусково-лінійними сплайнами в якості допоміжних функцій;

– вперше для наближеного обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій загального виду використано економічні (з точки зору кількості використаних значень) схеми інтерполяції, побудовані на основі двовимірних інформаційних операторів.

Вважаю, що отримані в дисертаційній роботі результати розкривають нові перспективи у математичному моделюванні задач цифрової обробки зображень в залежності від типу задання вхідної інформації.

6. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання. Практична цінність досліджень Іванова С.С. полягає у розробці кубатурних формул для наближеного обчислення подвійних та потрійних інтегралів від швидко осцилюючих функцій загального вигляду у випадках, коли вихідні дані представлені значеннями функції на площинах та лініях. Запропоновані алгоритми та чисельні методи можуть бути ефективно застосовані не лише для математичного моделювання задач цифрової обробки зображень, а й інших напрямках прикладної математики, де виникає необхідність у швидкому та точному обчисленні багатовимірних осцилюючих інтегралів. Проведені дослідження забезпечують можливість використання в задачах цифрової обробки зображень оптимальних за порядком точності кубатурних формул наближеного обчислення інтегралів.

Практична значущість результатів дисертаційної роботи також зумовлена створенням нових чисельних методів, які забезпечать високу точність та обчислювальну ефективність при розв'язанні задач цифрової обробки зображень, в умовах обмеженості вихідних даних. Ефективні схеми інтерполяції, які використовувалися при побудові кубатурних формул

наближеного обчислення подвійних інтегралів від швидко осцилюючих функцій загального вигляду, можуть бути застосовані при побудові математичних моделей, розробці ефективних алгоритмів (з точки зору використання дискретних значень функції для досягнення заданої точності, порівняно з класичними методами) на основі чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій трьох змінних. Використання такого типу моделей для розв'язання задач цифрової обробки зображень буде сприяти підвищенню швидкодії обчислень.

7. Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які опубліковані автором. За результатами дослідження дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових праць, у тому числі: 5 статей в наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, 5 тез доповідей та матеріалів конференцій. Наведені публікації містять результати безпосередньої роботи дисертанта на окремих етапах дослідження, повною мірою відображають основні положення та висновки роботи. Авторська участь здобувача в опублікованих наукових працях погоджена зі співавторами.

8. Дотримання вимог академічної доброчесності. На підставі вивчення тексту дисертації Іванова С.С., наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності тексту дисертаційної роботи (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com) встановлено, що дисертаційна робота виконана з дотримання вимог академічної доброчесності, отримані результати дають підстави говорити про оригінальність роботи. У тексті містяться авторські ідеї, і не виявлено використання ідей інших науковців без посилання на їх роботи.

9. Зауваження до дисертаційної роботи. Незважаючи на високий рівень отриманих результатів, по дисертаційній роботі Іванова С.С. можна зробити такі зауваження:

1. Бажано було б детальніше охарактеризувати клас задач цифрової обробки зображень, для розв'язання яких можуть бути застосовані методи чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій багатьох змінних. Такий огляд дозволив би ширше висвітлити практичну значущість отриманих

результатів та окреслити можливості їх використання в конкретних прикладних напрямках.

2. При висвітлені в дисертації практичного значення наукових результатів дослідження увага зосереджена більше на теоретичних здобутках, зокрема на «розширенні класу математичних моделей та методів розв’язання задач цифрової обробки зображень з використанням чисельного інтегрування функцій багатьох змінних» або «розроблені математичних моделей, які ґрунтуються на використанні оптимальних за порядком точності кубатурних формул наближеного обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій загального виду». Потрібно було б на мою думку більше зосередити увагу на створені нових чисельних методів наближеного обчислення подвійних та потрійних інтегралів від швидко осцилюючих функцій загального виду при різних типах завдання вихідної інформації про функції, а також на обчислювально ефективних схемах чисельного інтегрування багатовимірних функцій, особливо таких, що характеризуються швидкими осциляціями в іррегулярному випадку.

3. У Розділі 4 бажано було б доповнити проведені чисельні експерименти ґрунтовним аналізом результатів стосовно кількості використаних значень функцій у запропонованих обчислювально ефективних схемах чисельного інтегрування. Це дозволило б наочно продемонструвати переваги запропонованих підходів і додатково обґрунтувати їх доцільність у практичному застосуванні.

4. Потребує більш чіткої формалізації оптимізаційна задача, яка покладена в основу побудови відповідних формул. Це дозволило б підкреслити математичну строгість підходу та полегшити сприйняття структури доведень.

Зазначені зауваження те стосуються основних положень дисертаційної роботи Іванова С.С. і мають характер побажань при подальших дослідженнях автора. Недоліки не знижують наукової цінності та практичної значущості отриманих результатів.

10. Висновки. Тема дослідження актуальна та відповідає галузі знань 11 – Математика та статистика спеціальності 113 – Прикладна математика.

Дисертаційна робота Іванова С.С. є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить науково-обґрунтовані результати, має наукову новизну, практичну значущість та перспективи подальших досліджень. Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій свідчить про те, що здобувач під час навчання згідно освітньо-науковій програмі «Прикладна математика» третього рівня вищої освіти, набув теоретичні знання, уміння, навички та відповідні компетенції. Враховуючи вищезазначене вважаю, що дисертаційна робота Іванова Сергія Сергійовича «Математичне моделювання задач цифрової обробки зображень на основі чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій», відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради Закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 р. № 44 (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024) та вимогам до оформлення дисертації МОН України від 12.01.2017 № 40, а сам здобувач, Іванов Сергій Сергійович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 – Прикладна математика.

РЕЦЕНЗЕНТ

член-кореспондент НАН України, доктор
фізико-математичних наук, професор,
заступник директора навчально- наукового
інституту комп'ютерних наук та штучного
інтелекту Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна

Сергій ЯКОВЛЕВ

« 11 » травня 2025 р.

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 20:21:14 11.05.2025

Назва файлу з підписом: Рецензія_рецензента_ЯКОВЛЕВА_для_phd_Іванова.doc.asice
Розмір файлу з підписом: 25.9 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Рецензія_рецензента_ЯКОВЛЕВА_для_phd_Іванова.doc
Розмір файлу без підпису: 72.5 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ЯКОВЛЕВ СЕРГІЙ ВСЕВОЛОДОВИЧ

П.І.Б.: ЯКОВЛЕВ СЕРГІЙ ВСЕВОЛОДОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 2077819937

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 20:21:12 11.05.2025

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F040000009CCA2601D7730006

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)

Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.02.05 13:00

Голові разової спеціалізованої ради
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна
професору Олегу ЛИТВИНУ
майдан Свободи 4, Харків, 61022

ВІДГУК

опонента, доктора технічних наук, професора,
професора кафедри комп'ютерних наук та прикладної математики
Національного університету водного господарства та природокористування

Бомби Андрія Ярославовича

на дисертаційну роботу Іванова Сергія Сергійовича

«Математичне моделювання задач цифрової обробки зображень на основі
чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань

11 – Математика та статистика за спеціальністю 113 – Прикладна математика

Аналіз дисертаційної роботи дає підстави оцінити актуальність теми, обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, достовірність та значущість отриманих результатів, рівень наукової новизни, теоретичну й практичну цінність роботи, а також сформулювати загальну характеристику та оцінку дисертації.

Актуальність теми. Сучасні задачі, зокрема задачі цифрової обробки зображень, нерозривно пов'язані з потребою у математичному моделюванні процесів, що включають обчислення складних багатовимірних інтегралів. Особливо це стосується випадків, коли підінтегральні функції мають швидко осцилюючий характер, а вихідна інформація про них обмежена значеннями на спеціальних множинах – площинах, лініях тощо. У таких умовах класичні методи чисельного інтегрування виявляються неефективними, що зумовлює потребу у розробці нових математичних моделей, здатних адекватно відтворювати природу задач. Запропонована тема дисертаційного дослідження, а також розроблений у роботі

підхід, заснований на побудові нових кубатурних формул з урахуванням специфіки доступної інформації, є актуальними як з погляду теорії чисельного інтегрування, так і в контексті практичних застосувань в прикладних задачах.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі. Дослідження базується на чіткому розумінні особливостей чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій. Автором ретельно проаналізовано існуючі методи наближеного обчислення подвійних та потрійних інтегралів від швидко осцилюючих функцій з використанням різних інформаційних операторів, виявлено недоліки, нереалізовані алгоритми та зроблені ґрунтовні висновки щодо можливості побудови нових кубатурних формул для чисельного знаходження багатовимірних інтегралів від швидко осцилюючих функцій.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження Сергія Сергійовича Іванова визначається такими положеннями:

1. Вперше запропоновано алгоритми чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій багатьох змінних загального виду з використанням інформаційних операторів, які можуть бути використано при математичному моделюванні прикладних задач.

2. Вперше представлено оптимальну за порядком точності на класі диференційовних функцій кубатурну формулу обчислення потрійних інтегралів від швидко осцилюючих функцій загального виду у випадку, коли інформація про функції задається їх значеннями на площинах.

3. Вперше розглянуто оптимальні за порядком точності на класі диференційовних функцій кубатурні формули наближеного обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій двох змінних загального виду у випадку, коли інформація про функції задається їх значеннями на лініях.

4. Вперше запропоновано кубатурну формули, яка забезпечує ефективне наближення інтегралів від швидко осцилюючих функцій загального виду з точки зору кількості використаних значень.

Запропоновані алгоритми є ефективними в математичному моделюванні задач цифрової обробки зображень при різних типах завдання вихідної інформації про

підінтегральні функції. Ефективність ґрунтується на високій точності обчислень, що доведено у вигляді теорем, та проведені чисельних експериментів, які лише підтвердили теоретичні результати досліджень. Дисертантом зроблені висновки та надані рекомендації щодо використання запропонованих нових обчислювальних методів. Отже, в дисертаційній роботі поставлене Івановим Сергієм Сергійовичем наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Значимість отриманих результатів для науки. Теоретичне значення одержаних результатів полягає в розширенні класу задач цифрової обробки зображень, які можуть бути розв'язані з використанням методів математичного моделювання та розроблених кубатурних формул наближеного обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій багатьох змінних, зокрема загального виду, на випадок, коли інформація про функції задається їх значеннями на лініях, площинах. Важливо, що серед розроблених методів є оптимальні за порядком точності. Запропоновані алгоритми чисельного інтегрування можуть бути ефективними і в інших галузях прикладної математики.

Практичне значення ґрунтується на тому, що на основі вищезазначених алгоритмів, будуються кубатурні формули наближеного обчислення подвійних та потрійних інтегралів від швидко осцилюючих функцій загального виду, які дозволяють досягати заданої точності обчислень з меншою кількістю даних, зокрема значень функцій в точках, порівняно з класичними методами, що робить їх перспективними для використання в процесі математичного моделювання задач цифрової обробки зображень. Використання такого типу кубатурних формул для розв'язання задач цифрової обробки зображень дозволить підвищити швидкодію обчислень.

Наукові результати отримані С.С. Івановим на кафедрі інформаційних комп'ютерних технологій і математики навчально-наукового інституту «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна в рамках виконання науково-дослідної роботи ФН 23-01 «Математичне моделювання та нові обчислювальні методи» про що свідчить акт про впровадження.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях. За результатами дослідження дисертаційної роботи С.С. Іванова опубліковано 10 наукових праць, у тому числі: 5 статей в наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, 5 тез доповідей та матеріалів конференцій. Участь здобувача у роботах, що опубліковані у співавторстві, зазначена у дисертаційній роботі. Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44 (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій». Таким чином, представлена дисертаційна робота С.С. Іванова є самостійним, завершеним науковим дослідженням.

Оцінка змісту дисертаційної роботи. Дисертаційна робота написана українською мовою, і характеризується чіткою послідовністю та доступністю викладення, науковим стилем мовлення та використанням загальноприйнятої термінології.

Дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури, додатків. Загальний обсяг дисертації 130 сторінок.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показана її наукова і практична цінність, сформульовані мета і задачі дослідження, які необхідно вирішити для її досягнення, описано зв'язок дисертації з науковими планами та темами, приведена апробація дисертаційної роботи і публікації.

У першому розділі дисертаційної роботи був зроблений огляд сучасного стану проблеми чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій декількох змінних. У цьому розділі детально розглянуто існуючі кубатурні формули наближеного обчислення подвійних та потрійних інтегралів від швидко осцилюючих функцій у випадку різного типу завдання інформації про підінтегральні функції.

У другому розділі міститься опис розробленої оптимальної за порядком точності кубатурної формули наближеного обчислення потрійного інтегралу від швидко осцилюючих функцій загального виду на класі диференційовних функцій. Інформація про функції буде задається слідами на системах взаємно перпендикулярних площин.

Третій розділ присвячено розробці кубатурних формул наближеного обчислення подвійних інтегралів від швидко осцилюючих функцій загального виду. Формули в своїй побудові використовують інформаційні оператори з допоміжними функціями у вигляді кусково-сталих та кусково-лінійних функцій. Інформація про функції задається слідами функції на лініях. Отримано оцінку чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій загального виду на класі диференційовних функцій. Доведено, що запропоновані кубатурні формули є оптимальними за порядком точності.

В розділі запропонована кубатурна формула наближеного обчислення подвійних інтегралів від швидко осцилюючих функцій загального виду, яка використовує економні схеми інтерполяції. Кубатурна формула має високу точність наближення та використовує на порядок менше значень функції в порівнянні з класичними формулами.

Четвертий розділ дисертації містить тестування кубатурних формул чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій загального виду в системах комп'ютерної математики. Результати чисельних експериментів підтверджують теоретичні здобутки даного дослідження. У цьому розділі детально описані результати тестування, які виявляють потенційну спроможність кубатурних формул та дозволяють сформулювати наступні кроки досліджень.

Висновки, що сформульовані у роботі, висвітлюють результати дослідження як вирішення висунутих в дисертації задач. В цілому висновки відповідають вимогам, які висуваються до результатів дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Список літератури складається із 125 найменувань, що достатньо широко охоплює предметне поле дослідження та відображає опрацювання автором значної кількості іноземних та вітчизняних джерел.

Додатки містить пакет відповідних програм, а також інформацію про практичне впровадження результатів дисертації.

Академічна доброчесність. Розглянувши звіт перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Іванова Сергія Сергійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить

елементів фальсифікації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Зауваження до дисертаційної роботи. Незважаючи на теоретичну та практичну значущість отриманих результатів, у дисертаційній роботі Іванова С.С. можна виділити такі недоліки:

1. У дисертації недостатньо уваги приділено аналізу кубатурних формул наближеного обчислення подвійних інтегралів від швидко осцилюючих функцій загального виду у випадку, коли функції $f(x, y)$, $g(x, y)$ замінюються класичними інтерполяційними многочленами з допоміжними функціями у вигляді кусково-сталих сплайнів. Отримані оцінки похибки наближення дозволили б провести більш ґрунтовний чисельний експеримент, щодо кількості використаних даних при порівнянні класичної кубатурної формули із запропонованою. Крім того, доцільно було б доповнити чисельний експеримент порівняльним аналізом кубатурних формул за швидкодією їх реалізації. Такий експеримент дозволив би не лише оцінити точність побудованих методів, а й проаналізувати їх обчислювальну ефективність порівняно з класичними підходами, що є важливим критерієм для практичного застосування в задачах цифрової обробки сигналів та зображень.

2. З огляду на те, що чисельне інтегрування швидко осцилюючих функцій є обчислювально складною задачею, а осциляції можуть підсилювати ефект накопичення похибок, доцільно було б включити в дисертаційні дослідження питання впливу на результат неусувної похибки та похибки заокруглення, які виникають при практичній реалізації кубатурних формул у числових обчисленнях.

3. У роботі основна увага приділяється чисельному інтегруванню диференційовних швидко осцилюючих функцій загального виду. Водночас у прикладних задачах цифрової обробки сигналів і зображень часто зустрічаються функції з розривами. Було б бажано доповнити дослідження аналізом поведінки побудованих кубатурних формул для наближеного обчислення подвійних та потрійних інтегралів від швидко осцилюючих функцій загального виду у випадку інтегрування функцій з розривами, а також обговорити можливі модифікації методів для таких випадків.

Вважаю, що висловлені зауваження не зменшують загальну наукову новизну,

практичну значимість результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок. Дисертаційна робота Іванова Сергія Сергійовича «Математичне моделювання задач цифрової обробки зображень на основі чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій» є завершеним науковим дослідженням, що вирішує важливу науково-практичну задачу, що пов'язана з чисельним інтегруванням швидко осцилюючих функцій загального виду при різному типі завдання вихідної інформації про функції. Вона відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44 (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій», а здобувач Іванов Сергій Сергійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – Прикладна математика.

Офіційний опонент – доктор технічних наук,
професор, професор кафедри комп'ютерних
наук та прикладної математики

Національного університету водного
господарства та природокористування

Андрій БОМБА

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 16:46:56 14.05.2025

Назва файлу з підписом: Відгук офіційного опонента (Бомба).pdf.p7s
Розмір файлу з підписом: 17.2 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Відгук офіційного опонента (Бомба).pdf
Розмір файлу без підпису: 5.0 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: БОМБА АНДРІЙ ЯРОСЛАВОВИЧ

П.І.Б.: БОМБА АНДРІЙ ЯРОСЛАВОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 1796104037

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 16:46:53 14.05.2025

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000C7791701E1E3A705

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в окремих файлах (CAAdES detached)

Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAAdES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.02.05 13:00

Голові разової спеціалізованої ради
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна
професору Олегу ЛИТВИНУ
майдан Свободи 4, Харків, 61022

ВІДГУК

офіційного опонента, кандидата фізико-математичних наук, доцента,
доцента кафедри вищої математики

Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Гадецької Світлани Вікторівни

на дисертаційну роботу Іванова Сергія Сергійовича

«Математичне моделювання задач цифрової обробки зображень на основі
чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій», подану на здобуття
наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 11 – Математика та
статистика за спеціальністю 113 – Прикладна математика

1. Актуальність теми дисертації роботи. У сучасних прикладних задачах цифрової обробки зображень особливу роль відіграють методи спектрального аналізу, зокрема обчислення перетворень Фур'є та числове обчислення сум Фур'є. Такі задачі широко застосовуються в автоматизованих системах технічного зору, медичній візуалізації, дистанційному зондуванні Землі та розпізнаванні образів. Обробка зображень у спектральній області дозволяє ефективно виділяти ознаки, фільтрувати шуми та виконувати стиснення даних. Разом із тим, чисельне обчислення інтегралів та спектральних сум від функцій багатьох змінних, особливо таких, що мають швидко осцилюючий характер, є складним завданням через значні коливання підінтегральних функцій та великий обсяг даних. У цьому контексті виникає потреба у розробці нових математичних моделей та алгоритмів, що забезпечують ефективне обчислення інтегралів та сум, пов'язаних з представленням і обробкою осцилюючих функцій, особливо коли вихідна інформація обмежена значеннями на множинах спеціальної структури – площинах, лініях, сітках. Дисертаційна робота, присвячена побудові кубатурних формул та чисельних методів обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій двох і трьох змінних із використанням інформаційних операторів, є актуальною як у теоретичному аспекті чисельного аналізу, так і з погляду

практичних потреб обробки цифрових зображень.

2. Зв'язок роботи з науковими темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі інформаційних комп'ютерних технологій і математики навчально-наукового інституту «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Іванов Сергій Сергійович проводив дослідження відповідно до технічного завдання науково-дослідної роботи ФН 23-01 «Математичне моделювання та нові обчислювальні методи», що підтверджується актом впровадження наукових результатів здобувача в наукову роботу кафедри.

3. Оцінка змісту дисертації, її довершення та оформлення. Дисертаційна робота Іванова Сергія Сергійовича логічно структурована, матеріал послідовно викладений.

Зміст дисертації відповідає заявленій темі та охоплює як теоретичні, так і прикладні аспекти чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій декількох змінних загального виду у задачах цифрової обробки зображень.

Робота складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, висновків до розділів та загальних висновків до роботи, списку літератури і додатків.

У вступі визначено об'єкт, предмет, мету та завдання дослідження, а також висвітлено наукову новизну викладених у дисертаційній роботі положень.

Перший розділ дисертації містить ґрунтовний огляд 125 літературних джерел, що дозволяє чітко окреслити місце отриманих результатів серед відомих робіт у цій галузі.

В другому розділі розглядається питання чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій трьох змінних загального вигляду, вихідна інформація про які представлена слідами функції на площинах. Отримано оптимальну за порядком точності кубатурну формулу.

Третій розділ присвячено наближеному обчисленню подвійних інтегралів від швидко осцилюючих функцій, коли вихідна інформація про функції задана їх значеннями на взаємно перпендикулярних прямих. На класі диференційовних функцій отримані оптимальні за порядком точності кубатурні формули. Окремо розглядається побудова кубатурної формули у випадку завдання вихідної інформації про підінтегральні функції значеннями у вузлах спеціально побудованої сітки. Такого виду формула є ефективною щодо кількості використаних в побудові вузлів інтерполяції.

В четвертому розділі наведено результати чисельних експериментів, які

підтверджують теоретичні положення дисертаційного дослідження.

Оформлення дисертації в цілому відповідає чинним вимогам до наукових робіт такого рівня. Матеріал подано чітко, з належним використанням формул, графіків, ілюстрацій та таблиць.

Усі основні теоретичні положення та твердження дисертаційної роботи Іванова Сергія Сергійовича мають математичне обґрунтування, а запропоновані методи й алгоритми перевірено шляхом проведення чисельних експериментів. До кожного розділу автором наведено обґрунтовані висновки, які узагальнено та систематизовано у загальних висновках, що підкреслює завершеність і цілісність виконаного дослідження.

4. Наукова новизна результатів дослідження. Дисертаційна робота Іванова Сергія Сергійовича містить низку суттєвих наукових результатів, що становлять вагомий внесок у розвиток методів математичного моделювання задач цифрової обробки зображень. Зокрема, до основних положень, що визначають наукову новизну роботи, належать такі:

- вперше запропоновано методи чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій трьох та двох змінних загального вигляду, в яких вихідна інформація про підінтегральні функції задана слідами на площинах, лініях, що дозволяє підвищити точність і ефективність обчислень у прикладних задачах обробки багатовимірних даних;

- вперше теоретично доведено, що запропоновані в роботі кубатурні формули є оптимальними за порядком точності на відповідних класах диференційовних функцій, що є суттєвим здобутком в теорії наближеного чисельного інтегрування;

- вперше запропоновано чисельні методи інтегрування швидко осцилюючих функцій двох змінних загального вигляду за умов, коли інформація про функцію задана на спеціально побудованих економних сітках інтерполяції, що дає змогу істотно підвищити точність та скоротити обсяг обчислень без помітної втрати точності.

5. Практичне значення отриманих результатів. Реалізація запропонованих методів дозволяє суттєво зменшити обчислювальні витрати у програмних комплексах для обробки цифрових зображень, одночасно підвищуючи продуктивність і якість виконання типових операцій, таких як спектральне згладжування, відновлення зображень за неповними даними, реконструкція за допомогою швидкого перетворення Фур'є та аналіз просторово-

частотних характеристик. Розроблені кубатурні алгоритми можуть бути ефективно адаптовані до широкого класу прикладних задач, включно з обробкою томографічних даних, даних дистанційного зондування та моделюванням фізичних процесів.

6. Повнота викладення наукових положень в публікаціях. Дисертаційні дослідження здобувача опубліковано у 10 наукових працях, у тому числі: у 5 статтях в наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, у 5 тезах доповідей та матеріалах конференцій. Участь С.С. Іванова у роботах, що опубліковані у співавторстві, зазначена у дисертаційній роботі. Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам чинного законодавства.

7. Зауваження до дисертаційної роботи. Дисертаційна робота Іванова Сергія Сергійовича містить вагомий теоретичний та практичний результати, однак до роботи є зауваження:

1. У першому розділі, де автор викладає загальні положення та огляд літератури, доцільно було б більш детально окреслити практичні постановки задач цифрової обробки зображень, для яких чисельне інтегрування швидко осцилюючих функцій має вирішальне значення. Це дозволило б краще відобразити прикладну значущість запропонованих методів.

2. Оскільки в дисертації розглядаються швидко осцилюючі функції, доречно було б хоча б у вигляді окремого підпункту обговорити можливості поєднання запропонованих кубатурних формул з методами швидкого перетворення Фур'є, особливо в контексті задач відновлення чи аналізу зображень.

3. У дисертаційній роботі автором розглядаються методи чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій двох та трьох змінних загального вигляду. Водночас варто було б в розділі 4 окремо приділити увагу особливому випадку, коли підінтегральна функція є добутком функцій, кожна з яких залежить лише від однієї змінної. Для таких функцій існує можливість суттєвого спрощення обчислювальних процедур за рахунок декомпозиції багатовимірного інтеграла на добутки одновимірних інтегралів.

Додавання відповідного аналізу та чисельних експериментів для цього класу функцій дозволило б більш повно охарактеризувати ефективність запропонованих методів та їхню адаптивність до різних типів підінтегральних функцій.

8. Висновки. Зауваження, зроблені у відгуку, не зменшують наукову новизну, практичну значущість отриманих результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи. Дисертаційна робота «Математичне моделювання задач цифрової обробки зображень на основі чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій» відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44 (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій», а здобувач Іванов Сергій Сергійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – Прикладна математика.

Офіційний опонент – кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри вищої математики
Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Світлана ГАДЕЦЬКА

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 19:01:03 14.05.2025

Назва файлу з підписом: Відгук_офіційного_опонента_phd_Гадецька.docx.asice
Розмір файлу з підписом: 32.9 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Відгук_офіційного_опонента_phd_Гадецька.docx
Розмір файлу без підпису: 29.6 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ГАДЕЦЬКА СВІТЛАНА ВІКТОРІВНА

П.І.Б.: ГАДЕЦЬКА СВІТЛАНА ВІКТОРІВНА

Країна: Україна

РНОКПП: 2359601009

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 19:01:02 14.05.2025

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F0400000060076A01D2422905

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)

Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.02.05 13:00

Голові разової спеціалізованої ради
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна
професору Олегу ЛИТВИНУ
майдан Свободи 4, Харків, 61022

ВІДГУК

опонента, кандидата фізико-математичних наук,
старшого наукового співробітника відділу оптимізації чисельних методів
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України
Луц Лілії Володимирівни
на дисертаційну роботу Іванова Сергія Сергійовича
«Математичне моделювання задач цифрової обробки зображень на основі
чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань
11 – Математика та статистика за спеціальністю 113 – Прикладна математика

1. Актуальність теми дисертації. На сучасному етапі розвитку прикладної математики, математичного моделювання та цифрових технологій особливого значення набувають задачі, пов'язані з побудовою адекватних математичних моделей для опису та обробки цифрових зображень і сигналів. Багато з таких задач формалізуються у вигляді обчислення багатовимірних інтегралів, підінтегральні функції яких мають складну структуру або швидкоосцилюваний характер. Складність чисельного обчислення подібних інтегралів значно зростає в ситуаціях, коли інформація про функцію доступна лише у вигляді її значень на спеціально заданих множинах — площинах, лініях, сітках або їхніх комбінаціях. У таких випадках класичні методи чисельного інтегрування демонструють низьку ефективність або взагалі не можуть бути застосовані без суттєвих втрат точності та зростання обчислювальних витрат. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні нових математичних моделей, які б дозволяли ефективно враховувати специфіку доступної інформації про функції та забезпечувати точне і стабільне чисельне інтегрування в умовах швидких осциляцій підінтегрального виразу. Одним із перспективних напрямів такого моделювання є розробка спеціалізованих інформаційних операторів та побудова на їх основі нових кубатурних формул, здатних наближати інтеграли з високим порядком точності. У дисертаційній роботі саме цей напрям розглянуто як

основний, що визначає її актуальність як з точки зору розвитку теорії чисельного інтегрування багатовимірних швидко осцилюючих функцій, так і з огляду на широкий спектр прикладних задач, насамперед у галузі цифрової обробки зображень, математичної фізики та суміжних дисциплін.

2. Зв'язок роботи з науковими темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі інформаційних комп'ютерних технологій і математики навчально-наукового інституту «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Проведені дослідження отримані С.С. Івановим під час виконання науково-дослідної роботи ФН 23-01 «Математичне моделювання та нові обчислювальні методи», підтвердженням чого є акт впровадження наукових результатів в наукову роботу кафедри.

3. Загальна оцінка змісту дисертації, її довершення та оформлення. Дисертаційна робота Іванова Сергія Сергійовича є цілісним завершеним науковим дослідженням, що вирізняється внутрішньою логічною структурою, системністю викладення матеріалу та методологічною обґрунтованістю отриманих результатів. Зміст роботи повною мірою відповідає заявленій темі, а викладені в ній теоретичні положення та прикладні рекомендації узгоджено поєднані в межах єдиної наукової концепції. Дисертаційна робота складається з двох анотацій – українською та англійською мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків до розділів та загальних висновків до роботи, списку літератури (125 джерел) і додатків з пакетом програм та актом впровадження. Загальний обсяг дисертації складається з 130 сторінок. У дисертації послідовно розкрито актуальність обраної тематики, проведено ретельний огляд сучасного стану досліджень у галузі чисельного інтегрування швидкоосцилюваних функцій, визначено об'єкт, предмет, мету та завдання дослідження. Виклад теоретичних основ та побудова нових математичних моделей здійснено на високому академічному рівні, із дотриманням вимог наукової строгості та повнотою обґрунтувань. Теоретичні результати підтверджено доказами та чисельними експериментами, що дозволяє оцінити їхню практичну придатність і ефективність. Графічні ілюстрації, таблиці з результатами чисельного моделювання доречно доповнюють основний текст, полегшуючи сприйняття складного матеріалу та демонструючи практичну цінність одержаних результатів.

4. Наукова новизна отриманих результатів. Дисертаційна робота Іванова Сергія Сергійовича містить наукові результати, які мають вагомий внесок в математичного моделювання задач цифрової обробки зображень. Наукова новизна результатів полягає в наступному:

- вперше розроблені методи чисельного інтегрування швидкоосцильованих функцій трьох змінних загального вигляду, у яких інформація про підінтегральні функції представлена слідами функції на площинах;
- вперше розроблені методи чисельного інтегрування швидкоосцильованих функцій двох змінних загального вигляду, у яких інформація про підінтегральні функції представлена слідами функції на лініях;
- вперше доведено, що запропоновані кубатурні формули є оптимальними за порядком точності на класі диференційовних функцій;
- вперше розроблені методи чисельного інтегрування швидкоосцильованих функцій двох змінних загального вигляду, у яких інформація про підінтегральні функції представлена на економних сітках інтерполяції.

5. Практичне значення результатів дослідження. Отримані результати мають безпосереднє прикладне застосування при розробці програмних засобів та обчислювальних модулів для інтегрування складних багатовимірних осциляційних функцій, зокрема у тих випадках, коли необхідно забезпечити високу точність обчислень за обмеженого обсягу вхідної інформації. Реалізація запропонованих алгоритмів дозволяє суттєво скоротити обчислювальні витрати у програмних комплексах цифрової обробки зображень, підвищуючи продуктивність і якість результатів при виконанні операцій згладжування, реконструкції зображень та аналізу їх просторових характеристик. Розроблені алгоритми можуть слугувати основою для побудови адаптивних чисельних методів, ефективних для широкого класу прикладних задач, а також можуть бути впроваджені у програмні продукти для наукових обчислень та інженерного аналізу.

6. Ступінь обґрунтованості основних положень та висновків. Особливої уваги заслуговує чітка побудова логіки дисертаційного викладу: кожен наступний розділ органічно продовжує попередній, демонструючи системний підхід до вирішення поставлених завдань. У роботі дотримано академічного стилю, термінологічної узгодженості та коректності формулювань. Всі теореми доведено та наукові результати підтверджено чисельними експериментами. Зроблені відповідні висновки до кожного розділу, які наприкінці дисертаційної роботи узагальнено в один.

7. Повнота викладення наукових положень та результатів в публікаціях. Дисертаційні дослідження С.С. Іванова опубліковано 10 наукових праць, у тому числі: 5 статей в наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, 5 тез доповідей та матеріалів конференцій. Участь

С.С. Іванова у роботах, що опубліковані у співавторстві, зазначена у дисертаційній роботі.

Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44 (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій». Таким чином, представлена дисертаційна робота С.С. Іванова є самостійним, завершеним науковим дослідженням.

8. Зауваження щодо змісту та оформлення дисертації. Незважаючи на теоретичну та практичну значущість отриманих наукових результатів, до дисертаційної роботи Іванова Сергія Сергійовича є декілька зауважень:

1. Зауваження носить дискусійний характер: згідно нового українського правопису рекомендують використовувати термін «швидкоосцильовані функції» замість «швидкоосцилюючі функції».

2. В роботі є декілька однакових позначень для допоміжних кусково-сталих функцій при побудові інформаційних операторів. Зокрема, на сторінці 50 маємо

$$h_{1k}^0(x) = \begin{cases} 1, x \in X_k, \\ 0, x \notin X_k, \end{cases} \quad h_{2j}^0(y) = \begin{cases} 1, y \in Y_j, \\ 0, y \notin Y_j, \end{cases} \quad h_{3s}^0(z) = \begin{cases} 1, z \in Z_s, \\ 0, z \notin Z_s, \end{cases}$$

$$X_k = [x_{k-1/2}, x_{k+1/2}], \quad Y_j = [y_{j-1/2}, y_{j+1/2}], \quad Z_s = [z_{s-1/2}, z_{s+1/2}],$$

$$x_k = k\Delta - \Delta/2, \quad y_j = j\Delta - \Delta/2, \quad z_s = s\Delta - \Delta/2, \quad k, j, s = \overline{1, \ell}, \quad \Delta = 1/\ell,$$

а вже на сторінці 59 інше позначення

$$h_{1k}(x) = \begin{cases} 1, x \in X_{1k}, \\ 0, x \notin X_{1k}, \end{cases} \quad h_{1j}(y) = \begin{cases} 1, y \in Y_{1j}, \\ 0, y \notin Y_{1j}, \end{cases} \quad h_{1s}(z) = \begin{cases} 1, z \in Z_{1s}, \\ 0, z \notin Z_{1s}, \end{cases}$$

$$X_{1k} = [x_{k-1/2}, x_{k+1/2}], \quad Y_{1j} = [y_{j-1/2}, y_{j+1/2}], \quad Z_{1s} = [z_{s-1/2}, z_{s+1/2}],$$

$$x_k = k\Delta_1 - \Delta_1/2, \quad y_j = j\Delta_1 - \Delta_1/2, \quad z_s = s\Delta_1 - \Delta_1/2, \quad k, j, s = \overline{1, \ell_1}, \quad \Delta_1 = 1/\ell_1.$$

3. На сторінці 78 в першому рядку у доведені теореми 3.2. помилково вписаний доданок $2M\ell_1\Delta_1\frac{\Delta_1^2}{4}\ell_1^2 +$.

4. Бажаним доповненням до проведеного дослідження було б виконання аналізу повної похибки алгоритму для принаймні однієї кубатурної формули.

5. В розділі 4 доцільно було б навести тестування кубатурних формул для наближеного обчислення потрійних та подвійних інтегралів від швидкоосцильованих функцій загального виду на «поганих» функціях з класу. Це б дало більш ґрунтовне розуміння потенційної спроможності запропонованих алгоритмів.

9. Висновки. Вважаю, що вищезазначені зауваження не зменшують загальну наукову новизну, практичну вагомість отриманих результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи. Дисертаційна робота Іванова Сергія Сергійовича «Математичне моделювання задач цифрової обробки зображень на основі чисельного інтегрування швидко осцилюючих функцій» є завершеним науковим дослідженням, відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44 (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій», а здобувач Іванов Сергій Сергійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – Прикладна математика.

Офіційний опонент – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу оптимізації чисельних методів Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України

Лілія ЛУЦ

ЛУЦ ЛІЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

Результат перевірки підпису	Підпис вірний
П.І.Б.	ЛУЦ ЛІЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА
РНОКПП	2639614740
Організація (установа)	ФІЗИЧНА ОСОБА
Код ЄДРПОУ	
Посада	
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для даних від Надавача)	15:20:50 15.05.2025
Сертифікат виданий	КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер	5E984D526F82F38F040000000BBACA017B104F06
Тип носія особистого ключа	Захищений
Алгоритм підпису	dstu4145
Тип підпису	Кваліфікований
Формат підпису	CAdES-T
Сертифікат	Кваліфікований