

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора,
професора кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького

Мусієнко Максима Павловича

на дисертаційну роботу **Ситнікова Тихона Валерійовича**
на тему: "Моделі та методи підвищення ефективності частотно-залежних
програмно-алгоритмічних компонент обробки даних високого порядку",
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 122–Комп'ютерні науки,
галузь знань 12–Інформаційні технології

1. Актуальність теми дисертації

Розвиток технічних систем на сучасному рівні обумовлений концепцією Індустрія 4.0. Відповідно до цієї концепції системи та їх апаратно-програмні компоненти повинні відповідати новим вимогам за мобільністю, гнучкістю, адаптивністю, пристосованістю до умов функціонування. Для досягнення цього системи оснащуються багатофункціональними датчиками, апаратними та програмними компонентами обчислювальної техніки, які повинні працювати у реальному часі. Подальший розвиток подібних систем йде в напрямку гуманізації прийняття рішення та дружного контакту з людиною, відповідно до концепції Індустрія 5.0.

Таким чином, системи повинні мати компоненти, які мають можливість перебудовувати власні характеристики програмними, або апаратними засобами в залежності від умов функціонування, а у тракті обробки даних від перешкод для підвищення надійності на ефективності роботи у цілому.

Цифровий тракт обробки даних в основному включає різні частотно-залежні компоненти. Їх побудова у автономних мобільних системах виконується на основі компонентів низького порядку, оскільки це обумовлено

малими витратами на обчислення коефіцієнтів передавальної функції та кількості коефіцієнтів, простотою налагодження або перебудови, помірним енергоспоживанням та часу обробки. Слід відмітити, що при роботі у реальному часі є обмеження на обчислення, перебудову та перехідний процес роботи нової конфігурації тракту. Тому, в якості компонент низького порядку частіше використовують компоненти першого та другого порядку. Типовими задачами є зміна частоти зрізу або смуги пропускання компоненти, підвищення крутизни спаду амплітудно-частотної характеристики (АЧХ).

Актуальність дисертації визначається необхідністю розроблення теоретично обґрунтованих моделей і методів, що дозволяють розв'язати задачу побудови частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент обробки даних високого порядку на підставі використання програмно-алгоритмічних компонент низького порядку. Вирішення цієї задачі розширює методологічний апарат створення програмно-алгоритмічних компонент для обробки даних у мобільних платформах і сприяє розвитку досліджень у галузі інформаційних систем.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій

У роботі послідовно розглянуто взаємопов'язані задачі – аналіз і формування послідовного з'єднання однотипних програмно-алгоритмічних компонент низького порядку та визначення методу розрахунку точних значень частот зрізу частотних компонент високого порядку, а також оцінювання їх фактичної ефективності в умовах функціонування. Для вирішення цих задач здобувач застосовує:

- методи аналізу амплітудно- та фазочастотних характеристик при розроблення математичних моделей частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент першого та другого порядків;

- методи цифрової обробки сигналів, зокрема z -перетворення та апарат комплексних передавальних функцій при формуванні підходів до

створення й переналаштування частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент;

- алгоритмічні процедури керованої зміни параметрів частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент.

Здобувач здійснює постановку задач на формальному рівні, вводить необхідні позначення, описує алгоритмічні структури та обґрунтовує вибір архітектурних рішень.

Висновки підкріплені результатами моделювання та експериментів на реальних проєктах, що підтверджує належний ступінь обґрунтованості наукових положень і рекомендацій.

3. Достовірність отриманих результатів

Достовірність результатів забезпечується:

- використанням моделювання та реальних проєктів;
- оцінюванням ефективності нових компонент за відомими метриками;
- наявністю порівняння із відомими підходами, а також проведенням аналізу обчислювальних витрат при побудові частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент високого порядку, що свідчить про коректність запропонованих рішень;

- наявністю впроваджень та актів про використання результатів досліджень у практичній діяльності і в навчальному процесі.

У сукупності це дозволяє вважати отримані результати достовірними.

4. Наукова новизна

У результаті проведених досліджень здобувачем отримано та теоретично обґрунтовано ряд наукових результатів, що вирізняються новизною і виносяться на захист. Серед них особливої уваги заслуговують такі:

- *удосконалена* модель послідовного з'єднання однотипних частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент низького порядку, що

дозволило отримати частотно-залежні програмно-алгоритмічних компоненти високого порядку з мінімальним об'ємом обчислень та з більш лінійною фазо-частотною характеристикою;

– *вперше* запропоновано метод розрахунку частот зрізу послідовного з'єднання однотипних компонент низького порядку, що дозволило отримати аналогічну амплітудно-частотну характеристику до такого ж компонента високого порядку з мінімальним об'ємом обчислень;

– *удосконалено* метод створення частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент з урахуванням особливостей всепропускних компонент, що дозволило одержати нові амплітудно-частотні характеристики з покращеними характеристиками.

Перелічені результати є новими для спеціальності 122 - «Комп'ютерні науки» та вносять вагомий внесок у розвиток моделей та методів створення частотно-залежних програмно-апаратних компонент високого порядку, розширюючи наявний науковий доробок у відповідній предметній галузі.

5. Практичне значення

Практичне значення роботи полягає в можливості використання розроблених моделей і методів:

– у доведенні розроблених моделей і алгоритмічних методів до прикладного використання в задачах алгоритмічної обробки даних у обчислювальних системах реального часу.

– запропоновані алгоритмічні підходи можуть застосовуватися при проєктуванні архітектур складних програмних комплексів під час модернізації наявних та розробки нових частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент із керованими частотними характеристиками на рівні обчислювальних структур.

– запропоновані алгоритмічні методи забезпечили зменшення об'єму обчислень за рахунок зменшення кількості коефіцієнтів у порівнянні з реалізацією алгоритмів компонентів прямого розрахунку: для математичної

моделі фільтра нижніх частот 5-го порядку – у 4 рази; для смугового фільтра 5-го порядку – у 4,3 рази.

– визначається зміна динамічного діапазону значень параметрів машинного представлення чисел при збільшенні порядку алгоритму фільтра прямого розрахунку: для математичних моделей фільтрів нижніх частот 1-го та 2-го порядків цей діапазон становить 2,7 та 2,1 відповідно, тоді як для фільтрів 5-го 45; для смугових фільтрів 1-го порядку – 10, тоді як для 5-го порядку – 1030.

Це підтверджує, що розроблений підхід забезпечує обчислювальну стійкість та дозволяє використовувати типи даних із фіксованою точкою, накопичення похибки, що є критичним для покращення програмного забезпечення вбудованих систем.

Результати дослідження впроваджені в навчальний процес кафедри комп'ютерних систем Національного університету «Одеська політехніка» в межах відповідних навчальних дисциплін, що підтверджує їхню актуальність для підготовки фахівців у галузі комп'ютерних систем, а також використано при розробці підсистеми контролю детонації двигуна внутрішнього згоряння і у обчислювальних системах автономних мобільних платформ, крім того у складі архітектури інклінометричної системи контролю параметрів вертикального буріння свердловин.

Наявність актів впровадження та використання результатів у науково-освітньому середовищі підтверджує реальну прикладну цінність дисертаційної роботи.

6. Повнота викладу результатів у публікаціях та дотримання академічної доброчесності

Основні результати дисертаційної роботи висвітлені в 29 публікаціях, серед яких є 5 статті у фаховому виданні, 1 монографія у науковому фаховому виданні України, 15 міжнародних конференціях, 8 всеукраїнських конференціях. Із перерахованих публікацій 5 індексується наукометричною

базою SCOPUS.

Публікації відображають основні положення дисертаційної роботи; чітко простежується логічний зв'язок між опублікованими результатами та структурою дисертаційної роботи. Кожен пункт наукової новизни підкріплений щонайменше однією статтею у науковому виданні. Ознак порушення академічної доброчесності не виявлено.

7. Характеристика змісту дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Структура роботи є логічною та відповідає заявленій темі.

У *вступі* аргументовано актуальність, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення роботи, наведено відомості про апробацію та публікації.

Перший розділ містить системний аналітичний огляд проблематики виявлення та усунення питань необхідності та створення частотно-залежних програмно-апаратних компонент високого порядку. Розглянуто класичні підходи на основі практичних задач і сучасних вимог. Окреслено обмеження існуючих підходів і обґрунтовано потребу в нових моделях та методах, що слугує підґрунтям для постановки задач дослідження.

У *другому розділі* запропоновано удосконалення послідовного з'єднання однотипних програмно-алгоритмічних компонент низького порядку для створення компонентів високого порядку. Описано математичний апарат методу розрахунку частот зрізу нового з'єднання.

Третій розділ присвячено практичній програмній реалізації запропонованого в попередніх розділах методу формування частотно-залежних програмно апаратних компонент високого порядку на основі послідовного з'єднання однотипних компонент низького порядку, крім того наведено оцінювання об'єму обчислень при програмній реалізації та апаратно-програмній апробації алгоритмів.

У висновках узагальнено результати роботи, показано досягнення поставленої мети та виконання всіх задач дослідження.

Загалом, зміст дисертаційної роботи є послідовним, логічно побудованим і достатньо повно відображає проведені дослідження.

8. Зауваження та побажання

Наведені нижче зауваження мають характер зауважень і побажань та не знижують загальної позитивної оцінки роботи.

1. У першому розділі наявний певний дефіцит кількісних аналітичних даних. Так, постановка проблеми підвищення ефективності в п. 1.1 виконана переважно в якісному (узагальненому) вигляді, а теоретичний аналіз моделей у п. 1.3 має здебільшого описовий характер без наведення достатньої кількості числових даних та оцінок похибок. Для роботи було б корисним вже на етапі аналітичного огляду навести зведені порівняльні таблиці або графіки аналізу обчислювальної складності існуючих аналогів (часові витрати, об'єм пам'яті тощо), а також чітко формалізувати критерії «ефективності» у вигляді математичних функцій чи системи обмежень комп'ютерних систем реального часу.

2. У пп. 1.3 та 1.4 здобувач детально досліджує та використовує як базові елементи аналогові й цифрові моделі фільтрів Батерворта та Чебишева II типу. Проте доцільним б було чітко аргументувати, чому поза увагою автора залишилися інші класичні апроксимації: наприклад, фільтри Бесселя, що є критичними для систем реального часу тощо. Крім того, стверджуючи про доцільність використання компонент саме низького (першого та другого) порядку, дисертант теоретично не зазначив межі застосовності моделей, не вказав, починаючи саме з якого порядку сумарної системи пропонується каскадний підхід стає обчислювально вигіднішим за класичну пряму реалізацію фільтра високого порядку.

3. В назві п. 1.2 дисертант чітко вказав орієнтацію на обробку сигналів датчиків, проте у теоретичному описі фокусується переважно на класичних

абстрактних моделях сигналів. Робота набула б іншої якості, якби здобувач приділив більше уваги специфіці та математичним моделям сигналів реальних сенсорів: наприклад, інерційних датчиків БПЛА, автомобільних сенсорів тощо, які мають власні унікальні експлуатаційні особливості, такі як дрейф нуля чи специфічні спектри високочастотних завад.

4. В першому розділі наведено широкий огляд літератури, однак класифікація підходів подекуди виглядає змішаною. Було б доцільно жорсткіше структурувати огляд, що дозволило б чіткіше позиціонувати власні рішення автора на тлі наявного стану справ.

5. Усі математичні викладки 2-го розділу побудовані на припущенні, що послідовно з'єднуються виключно *однотипні* (ідентичні) базові ланки. Разом з тим, поза увагою автора залишився аналіз випадків з'єднання різнотипних ланок. Робота виграла б, якби автор приділив увагу теоретичному аналізу випадків комбінування гетерогенних (різнотипних) структур, що суттєво розширило б гнучкість та універсальність запропонованого методу обробки даних.

6. У 2-му розділі здобувач детально розписує математичний апарат підвищення ефективності цифрових частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент високого порядку для задач обробки даних. Однак автор не навів теоретичного аналізу чисельної стійкості запропонованих моделей до ефектів квантування та округлення коефіцієнтів у комп'ютерній пам'яті обмеженої розрядності, зокрема, при використанні арифметики з фіксованою точкою, яка є типовою для вбудованих систем.

7. У третьому розділі при описі практичної реалізації автор використовує різні порядки базових ланок та фільтрів, зокрема, 2-й, 3-й, 5-й порядки. Проте в роботі недостатньо обґрунтовано критерії вибору саме таких порядків для конкретних прикладних задач, наприклад, для розпізнавання режимів детонації ДВЗ. Залишається незрозумілим, чи є такий вибір результатом розв'язання оптимізаційної задачі за певним критерієм (наприклад,

точність/обчислювальні витрати), чи він зумовлений виключно емпіричними міркуваннями й специфікою тестових сигналів.

8. Хоча здобувач використовує існуючі нароби та проекти, у тексті лише стисло вказуються їхні параметри. Для повнішого розуміння умов і відтворюваності моделювання та експериментальних досліджень доцільно було б подати у вигляді зведеної таблиці ключові характеристики кожного проекту.

9. В описі застосування одержаних підходів розглядається їх автономна робота. Для практичних впроваджень важливо розуміти, як саме пропонується підхід працює при комплексному вирішенні задачі підвищення ефективності подібних систем, які технічні вимоги ставляться до виконання та як вирішуються питання масштабованості для інших систем.

Наведені зауваження не впливають на коректність наукових результатів і обґрунтованість висновків дисертаційної роботи.

9. Загальний висновок

Дисертаційна робота Ситнікова Тихона Валерійовича на тему «Моделі та методи підвищення ефективності частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент обробки даних високого порядку» є завершеною науково-кваліфікаційною працею, в якій вирішено актуальну наукову задачу підвищення ефективності частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент високого порядку у обчислювальних системах реального часу за рахунок удосконалення моделей і розроблення методів зменшення об'єму обчислень. Зміст дисертаційної роботи відповідає спеціальності 122 – «Комп'ютерні науки», галузі знань 12 – «Інформаційні технології», а сама робота – вимогам чинного Порядку присудження ступеня доктора філософії в Україні.

Враховуючи викладене, вважаю, що дисертаційна робота Ситнікова Тихона Валерійовича на тему «Моделі та методи підвищення ефективності частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент обробки даних високого порядку» відповідає вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої

освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у ЗВО (наукових установах), затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 року № 261 (зі змінами) та вимогам п.п. 5 – 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 12.01.2022 № 44 (зі змінами). Автор дисертаційної роботи – Ситніков Тихон Валерійович – заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп’ютерні науки, галузь знань 12 – Інформаційні технології.

Офіційний опонент:

професор кафедри автоматизації
та комп’ютерно-інтегрованих технологій
Черкаського національного університету
імені Богдана Хмельницького,
доктор технічних наук, професор

Максим МУСІЄНКО