

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора,
завідувача кафедри комп'ютерної інженерії

Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Журавської Ірини Миколаївни

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 галузі знань 12 Інформаційні технології

1 АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

Сучасний розвиток суспільства характеризується появою та широким застосуванням автономних мобільних платформ, які повинні виконувати завдання на основі вбудованих алгоритмів, із мінімальним втручанням оператора. Такі платформи будуються на основі принципів Індустрії 4.0, що ґрунтується на інтеграції кіберфізичних систем, мережевої взаємодії між пристроями, промислового Інтернету речей, хмарних і периферійних обчислень, аналізу великих даних та розвиненої робототехніки.

При розробці сучасних автономних мобільних платформ (наземних, підводних, БПЛА тощо) виникає задача побудови тракту обробки сигналів датчиків на частотно-залежних компонентах з можливістю перебудови власних характеристик в залежності від складних умов функціонування. Ця задача обумовлена необхідністю підвищення ефективності системи при невизначеності, які виникають при їх роботі без участі людини.

Розвиток технічних систем на сучасному рівні обумовлено концепцією Індустрія 4.0. Відповідно до цієї концепції системи та їх апаратні та програмні компоненти повинні відповідати новим вимогам по мобільності, гнучкості, адаптивності, пристосованості до умов функціонування. Для досягнення цього системи оснащуються багатофункціональними датчиками, виконуючими механізмами, контролерами, апаратними та програмними компонентами обчислювальної техніки, які повинні працювати у реальному часі.

Автономні мобільні системи обов'язково мають на борту спеціалізовані обчислювачі з набором датчиків для аналізу навколишнього середовища, розпізнавання об'єктів та цілей, передаварійних ситуацій впродовж руху та виконання необхідних операцій.

Таким чином, подібні системи повинні мати компоненти, які мають можливість перебудовувати власні характеристики програмними або апаратними засобами в залежності від умов функціонування для підвищення ефективності роботи у цілому.

Цифровий тракт обробки сигналів датчиків 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.

З наукової точки зору ця задача є нетривіальним випадком визначення необхідних характеристик для перебудови. Саме в цьому вимірі робота становить самостійний дослідницький інтерес для комп'ютерних наук – незалежно від прикладної мотивації.

Дисертаційна робота Ситнікова Тихона Валерійовича вирішує саме цю задачу – і робить це комплексно, охоплюючи не лише виявлення особливостей послідовного з'єднання, а й пошук методу визначення частот зрізу нового з'єднання. Такий підхід в існуючих дослідженнях надає роботі додаткової наукової та практичної цінності.

Вважаю, що дисертаційна робота Ситнікова Тихона Валерійовича є актуальною і своєчасною.

2 ЗВ'ЯЗОК РОБОТИ З НАУКОВИМИ ПРОГРАМАМИ, ПЛАНАМИ, ТЕМАМИ

Дисертація є складовою частиною НДР «Моделі, методи розробки та апаратні рішення високочастотних компонентів програмованих мобільних систем» (№ держреєстрації 0121U110245), яка виконувалася в Національному університеті «Одеська політехніка» у 2023–2025 рр.

3 ОЦІНКА ОБҐРУНТОВАНOSTІ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ

При розв'язанні поставлених у дисертації задач здобувач використав широкий спектр сучасного математичного та алгоритмічного апарату.

Під час розроблення математичних моделей частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент першого та другого порядків застосовувалися методи аналізу амплітудно- та фазочастотних характеристик. При формуванні підходів до їх створення й переналаштування зі зменшеним обсягом обчислень використовувалися методи цифрової обробки сигналів, зокрема z -перетворення та апарат комплексних передавальних функцій, а також алгоритмічні процедури керованої зміни параметрів частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент

Обґрунтованість наукових положень підтверджується:

- чіткою постановкою задач і описом розроблених моделей та методу;
- чітко проведених математичних викладок при одержанні особливостей послідовного з'єднання однотипних компонент та визначенням нових частот зрізу при новому їх з'єднанні;
- отриманими математичними співвідношеннями при формуванні нових частотно-залежних програмно-апаратних компонент з використанням як типових, так і внепропускних компонент;
- проведенням розрахунків за кількістю коефіцієнтів та їх динамічного діапазону в залежності від кількості з'єднань однотипних компонентів низького порядку;
- проведенням моделювання отриманих частотно-залежних компонент високого порядку на основі компонент низького порядку;
- порівнянням із основними та одержаними компонентами та підходами відповідно до загальноприйнятих кількісних метрик;
- реалізації отриманих рішень на реальних проєктах.

Висновки та рекомендації дисертації логічно випливають із проведеного теоретичного аналізу, постановки задач, запропонованих моделей і результатів моделювання та експериментальних досліджень, отже можуть вважатися достатньо обґрунтованими.

4 ДОСТОВІРНІСТЬ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, РЕКОМЕНДАЦІЙ ТА ВИСНОВКІВ

Підставою для позитивної оцінки достовірності результатів дисертації слугує насамперед методична коректність побудови дослідження та моделювання, проведення експериментального дослідження. Здобувач використовує реальні компоненти, що виключає вплив зовнішніх чинників на отримані показники та забезпечує принципову відтворюваність результатів.

Достовірність отриманих результатів додатково підкріплюється тим, що оцінювання якості проводилось відповідно до загальноприйнятих у науковій спільноті метрик для аналогічних задач, а порівняння здійснювалось з актуальними підходами, що представляють сучасний стан досліджень. Покращення показників спостерігається стабільно, а не є артефактом окремо взятого сприятливого випадку, що свідчить про узагальнену здатність запропонованих рішень.

5 НАУКОВА НОВИЗНА РЕЗУЛЬТАТІВ, ВИКЛАДЕНИХ У ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної наукової задачі створення математичних моделей частотно-залежних програмно-апаратних компонент цифрової обробки даних для обчислювальних систем, придатних до ресурсоекономної програмної реалізації та динамічного програмного налаштування залежно від умов функціонування. Результативність реалізації трактується як зменшення обсягу розрахунків обчислювального пристрою під час створення й перерахунку параметрів матмоделей, що є критичним для систем реального часу, які працюють в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

За результатами проведених досліджень здобувачем самостійно отримано нові науково обґрунтовані результати, що становлять самостійний внесок у розвиток моделей та методів підвищення ефективності частотно-залежних програмно-апаратних компонент високого порядку, а саме:

1) *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;

2) *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;

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

Отримані результати у сукупності є новими для галузі комп'ютерних наук та розширюють наявний науковий доробок у формуванні частотно-залежних програмно-апаратних компонент обробки даних високого порядку і доказового оцінювання їх ефективності в умовах реальних процесів на мобільних платформах.

6 ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Практичне значення роботи полягає у тому, що розроблені моделі та алгоритмічні методи доведенні методів до прикладного використання в задачах алгоритмічної обробки даних у обчислювальних системах реального часу. Запропоновані алгоритмічні підходи можуть застосовуватися при проектуванні архітектур складних програмних комплексів під час модернізації наявних та розробки нових частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент із керованими частотними характеристиками на рівні обчислювальних структур.

Результати дослідження впроваджені в навчальний процес кафедри комп'ютерних систем НУ «Одеська політехніка» в межах відповідних навчальних дисциплін, що підтверджує їхню актуальність для підготовки фахівців у галузі комп'ютерних систем.

Крім того, розроблений інструментальний засіб впроваджено у діяльність ТОВ «АВТО-АВАН І АВ» та Українсько-німецької лабораторії систем штучного інтелекту НУ «Одеська політехніка», що підтверджено відповідними Актами впровадження (додатки Б та В дисертації), а також використано в науково-дослідницькій діяльності НУ «Одеська політехніка» (Довідка у додатку Г дисертації).

У сукупності це є безумовним свідченням практичної обґрунтованості отриманих у дисертаційній роботі результатів.

7 ПОВНОТА ВИКЛАДУ РЕЗУЛЬТАТІВ У ПУБЛІКАЦІЯХ ТА ДОТРИМАННЯ АКАДЕМІЧНОЇ ДОБРОЧЕСНОСТІ

Основні результати дисертації опубліковано у 8 наукових працях, до яких зараховуються відповідно до п. 8 Постанови КМУ від 12 січня 2022 р. № 44:

- 4 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України;
- 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus (у т. ч. 1 стаття у виданні, віднесеному до третього квартиля Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank, що прирівнюється до двох наукових публікацій);
- 1 одноосібний розділ у колективній монографії, що рекомендована до друку вченою порадою Національного університету «Одеська політехніка» та пройшла рецензування.

8 АНАЛІЗ ФОРМИ ТА ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Логіка побудови роботи відображає послідовний перехід від теоретичного обґрунтування розроблення моделей та математичних викладок, до моделювання математичних співвідношень та їх практичної реалізації.

Сильною стороною роботи є комплексність підходу:

- автор органічно поєднує глибокий теоретичний аналіз з інженерною реалізацією та алгоритмічним апаратом;
- виконано інтеграцію розроблених моделей та методів у єдину програмну реалізацію формування частотно-залежних програмно-алгоритмічних компонент високого порядку на основі послідовного з'єднання однотипних компонент першого порядку;

— подаються результати комплексного моделювання та експериментальної перевірки на реальних проєктах. Проведені розрахунки ефективності прийнятого рішення і отримані дані переконливо демонструють ефективність запропонованих рішень порівняно з відомими підходами.

Загалом дисертація справляє враження цілісної та концептуально завершеної наукової праці, в якій кожен розділ органічно пов'язаний із загальною логікою дослідження.

9 ЗАУВАЖЕННЯ ДО ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Попри загальний високий рівень дисертаційної роботи, на думку опонента, заслуговують на увагу здобувача такі зауваження:

1) перший розділ дуже затягнутий через надлишковий розгляд аналогових частотно-залежних компонентів, у той час, як робота присвячена дослідженню цифрових частотно-залежних компонентів;

2) у другому розділі описано вперше запропонований метод розрахунку частот зрізу нового з'єднання. Однак для режекторного компоненту не наведено відповідних аналітичних співвідношень;

3) у другому розділі розглядаються питання використання всепропускних компонентів. Отримані результати є наочними у вигляді АЧХ нових компонентів, тому доцільно було б навести рекомендації щодо їх використання;

4) описана у другому розділі удосконалена модель послідовного з'єднання однотипних ЧЗПАК низького порядку дозволяє знизити обчислювальні витрати, проте кожне наступне з'єднання n ланок призводить до лінійного накопичення фазового зсуву сигналу. В роботі недостатньо висвітлено критерії вибору максимального числа n , при якому накопичення фазової затримки може призвести до нестабільності контуру керування;

5) у третьому розділі не наведено обґрунтування, чому для формування всепропускного компоненту автор використовує орієнтований граф;

6) у розділі 3 автор наводить дані про зміну динамічного діапазону коефіцієнтів фільтрів 5-го порядку, що обґрунтовує перевагу запропонованого методу послідовних ланок. Проте експериментальна оцінка тактів (O-нотація) проводиться за допомогою симулятора IDE MicrochipStudio переважно для 8-бітного мікроконтролера ATmega128. Було б доцільно також надати порівняльні дані реального часу для сучасніших 32-бітних архітектур (наприклад, ARM Cortex-M), які є стандартними для сучасних кіберфізичних систем в Industry 4.0;

7) у підрозділі 1.4 та розділі 3 під час аналізу цифрових смугових фільтрів згадується акустичний датчик із частотою випромінювання 40 кГц. Проте в роботі не обґрунтовано вибір конкретного значення частоти дискретизації f_d для цієї та інших прикладних задач, що ускладнює верифікацію наведених числових результатів і оцінку похибок.

Зазначені зауваження мають переважно дискусійний характер, не є визначальними та не впливають на позитивну оцінку наукової цінності дисертаційної роботи.

10 ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ОЦІНКА ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертаційна робота Ситнікова Тихона Валерійовича є завершеною кваліфікаційною науковою працею, в якій вирішено актуальну наукову задачу розробки та удосконалення математичних моделей та методів розрахунку частот зрізу частотно-залежних програмно-апаратних компонент цифрової обробки даних для обчислювальних систем, придатних до ресурсоекономної програмної реалізації та динамічного програмного налаштування залежно від умов функціонування.

Робота відзначається актуальністю тематики, науковою новизною отриманих результатів, достатнім рівнем теоретичної обґрунтованості та переконливою експериментальною базою, а практична цінність підтверджена реальним впровадженням розроблених рішень.

Зміст дисертаційної роботи відповідає спеціальності 122 Комп'ютерні науки галузі знань 12 Інформаційні технології згідно зі Стандартом вищої освіти зі спеціальності 122 Комп'ютерні науки для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, затвердженим Наказом МОНУ від 28.04.2022 № 394.

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 наказу МОН України «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» від 12 січня 2017 р. № 40 (у редакції від 12.07.2019) та пп. 6–9 «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 (у редакції від 08.05.2024). Автор дисертаційної роботи – Ситніков Тихон Валерійович – заслуговує на присвоєння наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки галузі знань 12 Інформаційні технології.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри комп'ютерної
інженерії Чорноморського
національного університету
імені Петра Могили

Ірина ЖУРАВСЬКА