

ВІДГУК

офіційного опонента, Заслуженого працівника освіти України, доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри електромеханіки та електроніки Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного **Шабатури Юрія Васильовича** на дисертаційну роботу **Вакарчук Анастасії Борисівни** на тему «**Аналіз впливу динаміки числових методів на характеристики електромеханічних систем з цифровим керуванням**», подану до захисту в разову спеціалізовану вчену раду Національного університету “Львівська політехніка” на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Актуальність теми дисертації та зв'язок із науковими програмами, темами

Стрімкий розвиток цифрових систем обробки інформації сприяв їх масовому впровадженню в системах керування електромеханічними вузлами, пристроями та комплексами. Поряд з апаратним забезпеченням невід'ємною частиною будь-якої вбудованої цифрової системи є її програмне забезпечення, яке власне і забезпечує реалізацію функціонування електромеханічної системи в цілому. При вирішенні задач керування електромеханічною системою за допомогою цифрових засобів надзвичайно важливим є оптимальний вибір числових методів інтегрування та диференціювання, які програмно реалізуються у відповідних алгоритмах керування.

Широко відомі в інженерному середовищі прикладні програмні системи MathCAD і MATLAB є добре апробованими засобами аналізу і синтезу алгоритмічного програмного забезпечення для цифрових систем керування. Наявність в MATLAB додатка Simulink та бібліотеки Control System Toolbox спрощують процес синтезу математичного забезпечення алгоритмів керування та їх програмної реалізації. Водночас варто зауважити, що поряд з зручним сервісом, який забезпечують вище зазначені програмні пакети у вигляді використання готових реалізацій типових методів дискретизації для неперервних систем, що дозволяє певною мірою автоматизувати весь процес синтезу математичної складової для програмного забезпечення цифрової системи керування, в такому підході відсутній аналіз переваг та недоліків того чи іншого методу виконання математичних операцій з дискретними моделями, розуміння математичних основ процесів дискретизації, а наявність готових

автоматизованих рішень не стимулює розробників цифрових систем до пошуку оптимальних і як правило нестандартних рішень.

Використання числових методів інтегрування є однією з основних процедур під час дискретизації неперервних систем з подальшим використанням отриманих залежностей в програмному забезпеченні цифрових систем. Вибір числового методу інтегрування за таких умов впливатиме на поведінку отриманої дискретизованої системи керування. Саме тому, для підвищення ефективності роботи цифрових систем керування, необхідно провести дослідження такого впливу. Таким чином, дисертаційна робота Вакарчук А.Б., яка присвячена вирішенню актуальних задач розвитку теорії та методів аналізу динамічних режимів керованих електромеханічних систем на основі застосування числових методів розрахунку їх дискретизованих моделей та аналізу впливу цих методів на динамічні характеристики даних систем є важливою та актуальною в науковому відношенні і цінною для практичного застосування.

Робота виконана у відповідності до пріоритетних напрямів науково-дослідних робіт Національного університету «Львівська політехніка» згідно з координаційними планами Міністерства освіти і науки України. Тематика виконаних досліджень відповідає Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», а саме п. 6 статті 7 «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі».

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується аргументованою постановкою мети й задач дослідження, повнотою та ґрунтовністю проведеного аналізу публікацій за тематикою дисертаційного дослідження, використанням апробованого математичного апарату та сучасного програмного забезпечення. Теоретичні дослідження виконано з використанням методів теорії динамічних аналогових та цифрових систем, числових методів аналізу перехідних процесів лінійних і нелінійних електричних кіл.

Достовірність отриманих теоретичних результатів підтверджується їх узгодженням із даними отриманими в ході експерименту з використанням відлагоджувальної плати STM Nucleo G474 на основі мікроконтролера STM32G474RE та числовими розрахунками з використанням розроблених моделей і методів у середовищі MATLAB/Simulink,

Наукова новизна одержаних результатів в широкому сенсі полягає в розвитку та поглибленні теорії та методики дослідження дискретних систем на основі застосування числових методів, які розглядаються як складові елементи цифрових систем керування та комп'ютерних моделей реального часу.

Серед найбільш вагомих конкретних наукових результатів на мою думку можна виділити наступні:

- вперше встановлено недоцільність використання цифрових інтеграторів високого порядку в електромеханічних системах з цифровим керуванням, оскільки це призводить до втрати стійкості та накопичення похибок;
- доказана неефективність використання числових методів високих порядків для цифрових моделей реального часу, оскільки вони проявляють себе як своєрідні цифрові фільтри з відповідним впливом на частотні характеристики цифрових систем керування;
- вперше запропоновано для аналізу впливу числових інтеграторів на електромеханічні системи реального часу використовувати метод відображення нулів/полосів. Це дозволило застосовувати зручні для обчислень рекурентні рівняння, та досліджувати їх при різних значеннях кроків дискретизації.

Склад і структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота А.Вакарчук представлена в обсязі 148 сторінок з основною частиною в 116 сторінок. Робота складається з анотацій, представлених українською та англійською мовами, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновків, та списку використаних джерел з 83 посиланнями, а також 5 додатків на 24 сторінках. Дисертація містить 59 рисунків і 3 таблиці.

У **першому** розділі дисертації виконано надзвичайно деталізований огляд класичних методів аналізу динамічних режимів електротехнічних систем, аналіз літературних джерел за тематикою роботи, розглянуто теоретичні засади числових методів їх застосування та приклади конкретного використання.

Другий розділ присвячено дослідженню числових методів інтегрування як елементів цифрових систем. Детально проаналізовано числові методи для здійснення процедури інтегрування, наведено їх переваги, недоліки та можливості практичного використання. Показано, що мінімізація амплітудних і фазових похибок, які виникають в процесі дискретизації досягається при використанні інтеграторів невисокого порядку, не вище другого. Числові методи розглянуто як цифрові фільтри, які є складовою частиною цифрової системи. Проведено їх дослідження за допомогою z-перетворень.

У **третьому** розділі досліджено ефективність застосування z-перетворення, а саме – методу відображення нулів/полосів для створення цифрових моделей реального часу. Здійснено ретроспективний аналіз засад

виникнення методу та описано основні принципи його реалізації і застосування. Вивчено ефективність реалізації методу відображення нулів і полюсів для аналізу електромеханічних систем. Виконано формування методом нулів і полюсів цифрових моделей елементарних динамічних ланок першого та другого порядку. Розглянуто особливості декомпозиції електротехнічних систем, на основі чого зроблено висновок про те, що паралельна декомпозиція дозволяє виконувати паралельні обчислення значень параметрів моделей цифрових систем.

У **четвертому** розділі виконано опис експериментальних досліджень. Наведені дані про експериментальну установку на основі плати STM Nucleo G474 з мікроконтролером STM32G474RE корпорації STMicroelectronics, який був запрограмований для експериментальних досліджень цифрових моделей керування. На їх основі було проведено експерименти та наведено їх результати.

У **висновках** авторка роботи узагальнила отримані в дисертації наукові та практичні результати.

Практична цінність

Практична цінність роботи підтверджена позитивними висновками наведеними в акті про використання результатів дисертаційних досліджень, а також засвідчується результатами та активною участю здобувачки в науково-дослідних роботах та освітньому процесі кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем, та кафедри теоретичної та загальної електротехніки Національного університету "Львівська політехніка". Розроблена методика аналізу впливу числових методів розв'язування звичайних диференціальних рівнянь дозволить підвищити ефективність моделювання цифрових електромеханічних систем. Експериментальні дослідження поведінки цифрової моделі з коригуванням шляхом вибору відповідного кроку інтегрування надають можливість прогнозувати поведінку цифрових систем реального часу, що дозволить на практиці підвищити ефективність відповідних систем керування.

Ідентичність змісту анотацій та основних положень дисертації. Зміст анотацій українською та англійською мовами відображає зміст дисертації та в цілому адекватно відображає її основні результати і висновки.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

Під час вивчення та аналізу дисертаційної роботи фактів порушення академічної доброчесності в дисертації здобувачки не виявлено.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Основні наукові положення і рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі, у повній мірі відображені в публікаціях здобувачки і пройшли апробацію на Всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях.

Основні результати дисертаційної роботи викладено у одній колективній монографії, яка опублікована в закордонному виданні, а також у 9-ти друкованих працях, з них - 3 у наукових фахових виданнях України, в тому числі 1 стаття у виданні, що включено до наукометричної бази Scopus; 6 матеріалів конференцій, з яких 2 - у виданнях, що цитуються наукометричною базою Scopus. Зміст особистого внеску здобувачки у друкованих працях, опублікованих у співавторстві, не має повторювань та дублювань.

Зауваження щодо змісту дисертації

В якості зауважень до дисертаційної роботи можна вказати наступне:

1. У дисертаційній роботі є чимало термінологічних, стилістичних та граматичних погрешностей. Зокрема на ст.:5; 39; 40; 41; 50; 51; 72; 83; 86 та ін.;
2. Згідно класичних вимог до дисертаційних досліджень в якості об'єкта дослідження завжди повинно визначатися достатньо широке поняття в межах якого розглядається предмет дослідження, тому, як правило, об'єктом дослідження є процес або явище, але аж ніяк не система;
3. На ст. 38 автор явно помилково визначає електротехнічні системи «суб'єктом дослідження»;
4. Потребує додаткового пояснення твердження автора на ст. 44 «Використання лише одного типу реалізації динамічних ланок, в даному випадку, ланки першого порядку, дозволяє отримати динамічні ланки будь-якого типу.»;
5. Назва п.2.2 має внутрішнє протиріччя;
6. Перший розділ роботи має завищений об'єм через наведення у ньому прикладів аналізу простих електричних ланцюгів, які детально розглянуті практично в кожному підручнику;
7. Помилка в запису рівняння 3.14;
8. В дисертації не наведені обмеження, які властиві для запропонованих підходів, крім того відсутній аналіз можливостей їх застосування до нелінійних систем.

Разом з тим зауважу, що висловлені зауваження стосуються другорядних

аспектів дисертаційної роботи, а тому суттєво не впливають на її загальну позитивну оцінку.

Загальний висновок про відповідність роботи встановленим вимогам

Вважаю, що зазначені зауваження не є принциповими і не знижують цінності проведеного здобувачкою дослідження, отриманої наукової новизни та практичної значущості дисертаційної роботи.

Аналіз дисертації дає підстави для висновку про те, що дисертація Вакарчук Анастасії Борисівни є завершеним, самостійним науковим дослідженням, яке має наукову новизну, теоретичне, наукове та практичне значення. За актуальністю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація «Аналіз впливу динаміки числових методів на характеристики електромеханічних систем з цифровим керуванням» відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженому Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 № 44, а її авторка – Вакарчук Анастасія Борисівна – заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Офіційний опонент:

завідувач кафедри електромеханіки та електроніки

Національної академії сухопутних військ

імені гетьмана Петра Сагайдачного,

доктор технічних наук, професор

 Ю. ШАБАТУРА

Підпис д.т.н., проф. Ю. Шабатури засвідчую

Заступник начальника Національної академії

сухопутних військ з наукової роботи

д.т.н., проф. Подковник





В. ГРАБЧАК