

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Копчака Богдана Любомировича
«Аналіз і синтез електромеханічних систем,
які описуються дробовими інтегрально -
диференційними ланками »,
представлену на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук за спеціальністю
05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Актуальність теми. Постійне зростання вимог до якості продукції в сучасних умовах задовольняється шляхом впровадження передових технологій, машин, механізмів і приладів, до складу яких, як правило, входять електромеханічні системи (ЕМС). Це в свою чергу потребує забезпечення граничної точності, швидкодії та узгоджуваності обертання електроприводів (ЕП), які є силовими елементами замкнених ЕМС. По мірі зростання вимог до динамічних і статичних показників ЕМС, які забезпечують протікання складних технологічних процесів, все більше істотним виявляється вплив різного роду дестабілізуючих факторів, обумовлених нелінійними характеристиками та іншими неідеальностями керованих перетворювачів енергії та електричних машин, обмеженою точністю виготовлення та кінцевою жорсткістю елементів кінематичних ланцюгів, впливом оточуючого середовища та складної природи технологічних процесів на структуру і параметри електромеханічних об'єктів керування (ОК), фрактальністю технологічних процесів.

Неповна апріорна інформація про параметри і властивості ОК, умови його функціонування не дозволяють використовувати для побудови керуючих частин таких ЕМС класичні методи синтезу і потребують розробки спеціальних підходів до визначення структури і параметрів регуляторів замкнених систем автоматичного керування.

Саме тому дисертаційна робота Б.Л.Копчака, яка спрямована на вирішення науково-прикладної проблеми підвищення якісних показників процесів керування ЕМС, яким властива фрактальність, шляхом розробки методів синтезу та реалізації аналогових і цифрових П^λД^μ-регуляторів дробового порядку є актуальною і своєчасною.

Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри. Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Електропривод і комп'ютеризовані електромеханічні системи» (ЕПК) Національного університету «Львівська політехніка». Дисертаційні дослідження виконані згідно з основними науковими напрямами досліджень кафедр ЕПК і «Електричні машини та апарати» – «Створення засобів автоматизації, систем керування технологічними процесами і електроприводами

промислового обладнання» та «Математичне моделювання, автоматизоване проектування та розробка електромеханічних перетворювачів і систем керування ними». Дисертація виконана в межах науково-дослідних робіт, що виконувалися за кошти державного бюджету: «Теоретичні засади створення електромеханотронних перетворювачів та систем» (2008-2009 рр., держреєстрація №0108U000337); «Розроблення мехатронних та електромеханічних вузлів легкового транспортного засобу» (2010-2011 рр., держреєстрація №0110U001107), у яких автор дисертаційної роботи був виконавцем.

Наукова новизна роботи полягає в

- розвитку методів розв'язання задач апроксимації ЕМС високого порядку дробовими передавальними функціями (ПФ) з трьома членами характеристичного полінома, що забезпечує розширення спектру заданих динамічних характеристик таких систем;
- розробці бажаних форм характеристичного полінома дробового порядку для структурно-параметричного синтезу ЕМС, що дало змогу поширити кореневі методи з цими формами на системи, які описуються ПФ як цілого, так і дробового порядку;
- розвитку методу узагальненого характеристичного полінома для синтезу регуляторів ЕМС дробового порядку;
- удосконаленні методу обчислення та реалізації із заданою точністю інтегральної та диференціальної ланок дробового порядку, що дало можливість реалізувати ці регулятори в реальному часі функціонування динамічних ЕМС.

Практична цінність і ефективність дисертаційної роботи для електротехнічних комплексів та систем полягає в наступному:

- розроблено програмне забезпечення для аналізу і синтезу ЕМС дробового порядку, що забезпечує підвищення їх точності і швидкодії порівняно з існуючими аналогами;
- розроблена процедура самоналагодження дробових ЕМС за бажаною якістю динамічних процесів;
- розширено гамму можливих налаштувань дробових регуляторів за рахунок використання розроблених бажаних форм характеристичних поліномів дробового порядку;
- доведено перспективність моделей, побудованих на основі перетворення Оусталоупа з порядками апроксимації $N = 1; 2$;
- з умови стійкості синтезованих ЕМС дробового порядку розроблена процедура визначення можливого діапазону зміни параметрів ОК;
- реалізовано розроблений ПІД-регулятор як опцію в програмованому логічному контролері (ПЛК) перетворювача частоти ПЧ MFC710, що дозволяє керувати координатами електропривода або технологічними параметрами та здійснювати самоналагодження;
- показана можливість застосування дробових диференціаторів як фільтрів високочастотних завад.

Практична цінність роботи підтверджена актами про впровадження результатів дисертаційної роботи в науково-виробничій фірмі «Тверд», ЛМКП «Львівводоканал», ТЕЦ-1 ЛМКП «Львівтеплоенерго» та в навчальний процес кафедри «Електропривод та комп'ютеризовані електромеханічні системи» Національного університету «Львівська політехніка»

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації, їх достовірність. Основні наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи обґрунтовані коректним використанням узагальненої теорії електромеханічного перетворення енергії, методів теорії автоматичного керування (для аналізу стійкості та якості керування електромеханічними системами, вибору їх структури, оцінки похибок керування), інтелектуальних методів аналізу і синтезу електромеханічних систем, методів апроксимації дробових інтегральної і диференціальної ланок ланками цілого порядку для розробки спрощеного алгоритму розрахунків і реалізації регуляторів дробового порядку, методів математичного і фізичного моделювання для перевірки адекватності розроблених математичних моделей.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджена збігом результатів математичного і фізичного моделювання, актами впровадження та експлуатаційних випробувань результатів дисертаційної роботи, широким обсягом публікацій і апробацій матеріалів дисертації.

Повнота викладу результатів досліджень в опублікованих працях.

Результати досліджень за темою дисертації, наукові положення, результати і висновки дисертаційної роботи опубліковані у 35-ти друкованих наукових працях, з них 26 у наукових фахових виданнях України, з яких 6 статей у виданнях, що включені до наукометричних баз даних; 2 матеріали конференцій у виданнях, що включені до наукометричної бази даних Scopus, 1 стаття в науковому періодичному виданні іншої держави; 12 праць написано без співавторів.

Наведений перелік публікацій, їх зміст та обсяг відповідають темі дисертації, у повному обсязі відображають отримані положення, наукові результати та висновки, свідчать про їх новизну.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності. Дисертація акуратно оформлена і складається із вступу, п'яти розділів, висновків по роботі, списку використаних джерел із 171 найменування та 5 додатків на 54 сторінках. Повний обсяг дисертації – 418 сторінок, у тому числі 310 сторінок основної частини, 38 рисунків і 11 таблиць обсягом 34 сторінки.

У вступі наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми, визначено об'єкт та предмет дослідження, сформульовано мету і задачі дослідження, розкрито наукову та практичну цінність отриманих результатів, а також подані відомості про апробацію дисертаційної роботи.

У першому розділі розглянуто основні напрями досліджень ЕМС, у яких розкрився потенціал дробового числення, що дало змогу підвищити ефективність розв'язання задач аналізу і синтезу. Встановлено, що фрактальні властивості елементів ЕМС зумовлюють необхідність створення моделей таких елементів і систем у цілому, які базуються на іншому підході в математиці – диференціальних і інтегральних рівняннях дробового порядку, щоб забезпечити високу ступінь адекватності опису процесів у таких системах до реальних. Саме в такому розумінні надалі використовується термін “фрактальність”.

Здійснено аналіз літературних джерел, присвячених оцінюванню ступеня фрактальності природних явищ, які мають вплив на технологічні процеси і стосуються ЕМС, який виявив, що фрактальність природних явищ технологічних процесів здебільшого характеризується часовими рядами і фрактальним розміром. Перелічені типові технологічні процеси та елементи ЕМС, які мають фрактальний характер, можуть бути об'єктом керування в складі електромеханічних систем автоматизації та потребують опису диференціальними рівняннями дробового порядку.

З'ясовано, що одним із напрямів застосування інтегрально-диференціальних ланок дробового порядку в задачах аналізу і синтезу ЕМС є застосування чисельних методів моделювання, що забезпечить уточнення математичних моделей і процесів в ЕМС і призведе до нової постановки задач ідентифікації і технічної діагностики систем. Введення інтегро-диференціальних операторів дробового порядку дає змогу вирішувати проблеми ідентифікації на структурно-параметричному рівні, оскільки з'являються ще додаткові ступені свободи математичних моделей системи, пов'язані з інтегралами і похідними дробових порядків, які входять у рівняння. Представлення ж об'єктів керування ЕМС моделями дробового порядку без нулів, у свою чергу, спрощує розроблення методів їх синтезу.

Розв'язання задачі оперативного аналізу і синтезу ЕМС з використанням моделей і регуляторів дробового порядку є перспективним для реалізації режиму самоналагодження ЕМС.

У другому розділі наведені нові підходи до математичного опису ланок об'єктів керування і регуляторів ЕМС за допомогою ПФ дробового порядку. Запропоновано застосувати метод рою частинок (МРЧ) і генетичні алгоритми (ГА) для опису ЕМС дробовими ланками.

Представлення об'єкта керування ПФ дробового порядку забезпечує спрощення ПФ і може бути ефективним шляхом апроксимації об'єктів керування ЕМС. Для цього запропоновано використовувати моделі дробового порядку з трьома або з п'ятьма змінними параметрами

Шляхом застосування еволюційних методів апроксимовано стандартні ПФ біноміальної форми та форми Баттерворта першого-четвертого порядків дробовими моделями, розроблено алгоритм знаходження ПФ дробового порядку довільних ланок і об'єктів керування ЕМС, для яких відома перехідна функція. Апроксимацію стандартних ПФ цілого порядку ПФ дробового порядку здійснено з використанням МРЧ на основі розробленого та програмно

реалізованого алгоритму.

Проведено дослідження можливості застосування МРЧ для апроксимації дробовими моделями ЕМС, які описуються ПФ цілого порядку з нулями і моделей дробового порядку для апроксимації ПФ високого порядку, знайдених на основі ідентифікації реальних ЕМС. Результати такого аналізу дозволили виробити рекомендації щодо використання певної ланки дробового порядку для апроксимації ланок високого порядку, які характеризуються однаковими динамічними характеристиками.

Результати проведених досліджень можуть бути використані як рекомендації для реалізації процесу ідентифікації об'єктів керування.

Аналіз отриманих результатів показав, що для реалізації дробових регуляторів перспективними є моделі, побудовані на основі методу Оусталоупа.

У третьому розділі розглянуті різні варіанти синтезу дробових регуляторів для ЕМС з використанням бажаних дробових форм характеристичних поліномів як еталонних при оптимізації контурів САК.

За результатом синтезу різноманітних систем, які описуються ПФ дробового порядку, отримано відповідні регулятори дробового порядку.

Пропонується підхід до синтезу регуляторів з урахуванням особливостей об'єктів керування ЕМС з використанням запропонованих бажаних форм дробового порядку.

Розглянуті різні варіанти синтезу дробового регулятора для ЕМС запропонованим методом, які обумовлені: особливостями об'єкта керування; бажанням отримати заданий характер перехідного процесу.

Для параметричної оптимізації ЕМС у режимі реального часу запропоновано підхід на основі модифікації двох методів: адаптивного методу, який використовує перехідну функцію ЕМС, і методу технологічного переналагодження замкнених систем, який призначений для розпізнавання необхідного переналагодження і розрахунку параметрів налагодження регулятора за реакцією замкненої ЕМС на задане збурення.

У четвертому розділі проведено пошук інформативного параметра для аналізу стійкості ЕМС дробового порядку і розроблено підхід до її забезпечення шляхом створення «обмежувальної зони» в процесі вибору параметрів дробового регулятора при його робастному синтезі за бажаною якістю перехідного процесу.

Запропоновано оцінювати ступінь впливу на стійкість систем дробового порядку окремих параметрів у різних діапазонах їх зміни і, відповідно, коригувати допустимі межі цих діапазонів. Такий підхід може бути введено в алгоритм самоналагодження ЕМС за використання дробового регулятора. Розглянутий підхід до аналізу стійкості придатний для ЕМС, які описуються передавальними функціями як дробового, так і цілого порядку.

Запропонована процедура розрахунку стійкості для ЕМС, які описуються ПФ дробового порядку, дає змогу реалізувати алгоритм пошуку діапазону зміни її параметрів, при якому забезпечується режим стійкості.

Пропонується для розв'язання задач параметричного синтезу застосо-

увати методи рою частинок і генетичних алгоритмів.

У п'ятому розділі розроблено цифровий інтегрально-диференціальний регулятор дробового порядку, в тому числі у вигляді опції в програмованому логічному контролері (ПЛК) перетворювача частоти для керування координатами електропривода або технологічними параметрами.

Розвиток ідеї застосування дробових регуляторів в спеціалізованих ПЛК дасть змогу реалізувати складніші алгоритми керування і відкриває шлях до побудови самоналагоджувальних ЕМС без суттєвого їх подорожчання.

Запропонована реалізація інтегровальної і диференціальної ланок ПІ^λД^μ-регулятора на основі теореми про розкладання правильного раціонального дробу на елементарні.

З метою практичного програмування дробового ПІ^λД^μ-регулятора на мікроконтролері або сигнальному процесорі поставлені наступні вимоги: розв'язок повинен бути максимально простим; забезпечувати мінімум операцій обчислення, тобто максимальну швидкодію процесора; забезпечувати високу точність; передбачати можливість вибору кроку розрахунку в широкому діапазоні; не обмежувати часовий діапазон розрахунку.

Для оцінки точності реалізації інтегральної та диференціальної ланок регулятора дробового порядку запропоновано порівнювати миттєві значення перехідних функцій, отриманих з використанням перетворення Оусталоупа, з еталонними, отриманими згідно з перетвореннями Лапласа.

Проведені дослідження показали високу адекватність варіантів практичної реалізації інтегральної та диференціальної моделі дробового порядку з використанням перетворення Оусталоупа та побудови на її основі регуляторів дробового порядку.

Показано, що використання дробового характеристичного полінома дає змогу знаходити структуру і параметри дробового регулятора в результаті відносно простих розрахунків.

Матеріал дисертації викладено логічно та послідовно, стиль викладання доказовий, чіткий і лаконічний. Висновки до кожного розділу і дисертації в цілому тісно пов'язані з її змістом і відображають суть виконаних досліджень. Публікації автора повністю висвітлюють наукові положення і результати виконаних наукових досліджень.

В цілому дисертація є закінченою науковою роботою, яка відповідає паспорту спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації.

В дисертації на здобуття наукового ступеня доктора наук не виносяться на захист положення та наукові результати, які були захищені здобувачем у кандидатській дисертації.

Недоліки та зауваження по роботі.

1. Автор стверджує, що метод рою частинок є ефективним засобом апроксимації передавальних функцій ланок ЕМС дробовими моделями з трьома або п'ятьма змінними параметрами, які мають високу ступінь адекватно-

сті. Не зрозуміло чи забезпечить цей метод таку ж ступінь адекватності при іншій кількості змінних параметрів.

2. При ідентифікації динамічних систем, які функціонують у режимі реального часу, шляхом створення їх математичних моделей на основі інтегро-диференціальних операторів дробового порядку методом рою частинок рекомендується вибрати мінімум 100 точок апроксимації на 1 секунду перехідної функції.

Скільки машинного часу потребує така ідентифікація, якщо перехідний процес триватиме десятки секунд?

3. В роботі не проведені дослідження впливу меж частотного діапазону, за яким вираховуються передавальні функції методом апроксимації Оусталоупа, на параметри цієї передавальної функції.

4. В традиційних стандартних формах використовують передавальні функції з довільною кількістю членів стандартного характеристичного полінома. В дисертації запропоновано дві бажані форми дробового порядку тільки з двома членами характеристичного полінома, як аналог стандартних форм. Це звужує можливості забезпечення бажаних динамічних характеристик дробових систем.

5. Не проаналізовано умови заміни передавальної функції регулятора двомасової системи синтезованим $\text{PI}^\lambda \text{D}^\mu$ -регулятором, параметри якого визначаються еволюційними методами.

6. В дисертації записано вираз цільової функції, складові якої нечітко позначені в подальших поясненнях, а також не обґрунтовано нехтування деякими складовими цієї функції.

7. В роботі проведено дослідження можливості практичного застосування режиму самоналагоджування системи ПЧ-АД з дробовим $\text{PI}^\lambda \text{D}^\mu$ -регулятором. На основі цих досліджень бажано було б сформулювати практичні рекомендації щодо застосування таких режимів для найбільш характерних ЕМС.

8. Загально відомим є наявність шумів на виході традиційних ланок диференціювання. В дисертації для диференціатора дробового порядку експериментально показано зниження шумів на його виході, тобто має місце ефект фільтрування. Даний результат є вагомим для функціонування ЕМС дробового порядку і його дослідженню приділено недостатньо уваги.

9. Не ясно яким чином отримана перехідна функція на рис. 2.18 динамічної ланки з передавальною функцією дробового порядку (2.6).

10. Пункти 8,9,10 висновків до другого розділу (стор. 122) є повтором тексту на стор. 120.

11. В тексті дисертації відсутній доказ твердження висновку 10 до розділу 2: «Найперспективнішими для реалізації регуляторів є моделі, побудовані на основі перетворення Оусталоупа, які забезпечують значно вищу швидкодію порівняно з моделями Грюнвальда-Летнікова, лише незначно поступаються їм у точності, хоча це компенсується простотою обчислювальної процедури».

12. На рис. 3.7 зображені перехідні функції коливального об'єкта ке-

рування і оптимізованого контуру з регулятором дробового порядку (3.15). Чи варто використовувати відносно складний регулятор дробового порядку, коли таку ж перехідну функцію оптимізованого контуру може забезпечити цілочисельний регулятор, синтезований методом узагальненого характеристичного полінома?

13. Під рис. 3.7 передавальну функцію (3.15) регулятора дробового порядку названо передавальною функцією оптимізованого контура.

14. Не ясно як буде працювати алгоритм вибору параметрів П^λД^μ-регулятора після подачі одиничного збурення на вході нестійкої системи.

15. В тексті дисертації, автореферату та назві роботи одночасно використовуються терміни «диференційний» та «диференціальний».

Перелічені недоліки дещо погіршують загальне позитивне враження від дисертації, але не зачіпають суті виконаних досліджень.

Висновки. Дисертаційна робота Копчака Богдана Любомировича «Аналіз і синтез електромеханічних систем, які описуються дробовими інтегрально-диференційними ланками», є самостійною завершеною науковою роботою, яка містить нове розв'язання науково-прикладної проблеми підвищення показників процесу керування електромеханічними системами, елементи яких мають фрактальні властивості.

Для вирішення вказаної проблеми в дисертації удосконалено методи структурної і параметричної ідентифікації динамічних систем з фрактальними властивостями, які функціонують у режимі реального часу, шляхом створення їх математичних моделей на основі інтегро-диференціальних операторів дробового порядку; розвинуто метод узагальненого характеристичного полінома для структурно параметричного синтезу дробових регуляторів згідно з бажаними дробовими формами; сформовано функціонал якості динамічних систем, які описуються передавальними функціями дробового порядку; розроблені методи синтезу ЕМС з регуляторами дробового порядку, які функціонують у режимі реального часу, за заданими показниками якості перехідних процесів із врахуванням умов стійкості, робастності, нечутливості до високочастотних завад і низькочастотних збурень у каналі навантаження з використанням інтелектуальних методів; розроблено процедуру реалізації інтегральних і диференціальних регуляторів дробового порядку на базі сучасних мікропроцесорних систем керування.

Матеріал дисертації викладено послідовно, стиль викладання доказовий, чіткий і лаконічний. Висновки до кожного розділу і дисертації тісно пов'язані з її змістом і відображають суть виконаних досліджень. Публікації автора повністю висвітлюють наукові положення і результати наукових досліджень.

За темою і змістом дисертація відповідає спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. Текст автореферату відповідає змісту дисертації.

В дисертації на здобуття наукового ступеня доктора наук не виносяться на захист положення та наукові результати, які захищені здобувачем у

кандидатській дисертації.

Таким чином дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 9,10,12 “ Порядку присудження наукових ступенів ”, а її автор Копчак Богдан Любомирович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Офіційний опонент, доктор
технічних наук, професор
кафедри електротехніки та
електромеханіки Дніпровського
державного технічного
університету

О.В.Садовой

Підпис професора Садового О.В.
засвідчую,
перший проректор ДДТУ



В.М.Гуляев