

Голові спеціалізованої
вченої ради Д 26.062.03

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

Член-кореспондента НАНУ, доктора технічних наук, професора Алпатова Анатолія Петровича на дисертаційну роботу Гусиніна Андрія Вячеславовича «Методи розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів на основі диференціальних перетворень», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – «Системи та процеси керування»

1. Актуальність теми

Створення перспективних зразків авіаційно-космічної техніки та широкий спектр завдань, що на них покладаються, потребують розв'язання низки задач щодо оптимізації траєкторного руху літальних апаратів (ЛА) під час їх виведення у задані термінальні умови. Як різновиди перспективних ЛА у дисертації розглядаються безпілотні літальні апарати (БЛА): авіаційно-космічна система (АКС), що реалізує повітряний старт ракети-носія, та безпілотний аеростатичний літальний апарат (БАЛА) типу класичного дирижаблю.

Особливістю виведення БЛА в задані термінальні умови є багатоетапний характер керування та траєкторії їх руху, який характеризується зміною параметрів об'єкту (маси, центрівок тощо), режиму роботи двигунів та системи керування. Зазначені літальні апарати відносяться до багаторежимних динамічних об'єктів зі змінними під час функціонування характеристиками.

Однією з найважливіших задач, що виникають при створенні зазначених БЛА, є розробка високоякісної системи керування польотом, яка повинна будуватися з найбільш повним урахуванням особливостей їх експлуатації. Застосування і розвиток існуючих та перспективних БЛА диктує необхідність оперативного синтезу їх керування та траєкторій, оскільки це дозволяє реалізувати їх максимально можливі льотні характеристики, сприяє підвищенню ефективності його функціонування та надійності польоту внаслідок підвищення стійкості алгоритмів керування до зовнішніх збурень.

Математична модель динаміки польоту БЛА описується нелінійними

51.13/97
07.04.2021

диференціальними рівняннями, що призводить до значних математичних та обчислювальних труднощів при неперервному розв'язанні задач синтезу оптимального керування бортовими обчислювальними комплексами у реальному масштабі часу. Використання традиційних методів оптимізації (принцип максимуму Понтрягіна, метод динамічного програмування Беллмана, метод узагальненої роботи Красовського тощо) пов'язано з чисельним інтегруванням нелінійних диференціальних рівнянь руху, розв'язанням двоточкової крайової задачі або чисельним інтегруванням диференціальних рівнянь Беллмана у часткових похідних. Крім цього, вплив параметричних та зовнішніх збурень потребує неперервної оптимізації у реальному часі траєкторії польоту під час всього процесу керування. Застосування для розв'язання задач синтезу оптимального керування ЛА при впливі збурень методів стохастичної оптимізації, теорії адаптивно-робастного та нейрон-нечіткого керування ускладнено через відсутність статистичних характеристик випадкових збурень, потребує наявності апріорної інформації про збурювання або реалізує прогнозування динаміки системи без оцінювання діючих збурень. До того ж, останні методи є занадто складними при реалізації в режимі реального часу та ще не знайшли широкого практичного застосування.

Тому проблема оперативної оптимізації процесу керування безпілотними літальними апаратами при їх багатоетапному траєкторному русі є актуальною з наукової та практичної точок зору.

Дисертація Гусиніна А.В. присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми оперативної оптимізації процесу керування рухом БЛА, яка дозволила б на наявних на борту обчислювальних засобах, в реальному масштабі часу, вирішувати задачу оперативного нелінійного синтезу оптимальних керувань та траєкторій руху такого типу літальних апаратів при багатоетапному виведенні їх у задані термінальні умови.

Дослідження, що складають основу дисертаційної роботи, відповідають основним науковим напрямкам розвитку науки і техніки України на період до 2021 року (відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», постанова Кабінету міністрів України № 294 від 12.03.2012р., № 980 від 18.10.2017р. «Про затвердження середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня на 2012-2016 та 2017-2021 роки) та виконана відповідно до Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2013-2017 роки (завдання 5. «Створення космічних комплексів») та Стратегічного плану розвитку авіаційного транспорту України на період до 2020 року, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20

жовтня 2010 року №2174-р.

Актуальність теми дисертації, важливість та перспективність отриманих результатів підтверджується й тим, що робота проводилась відповідно до планів науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України в рамках виконання держбюджетних та кафедральних науково-дослідних робіт. Крім того, результати роботи вже знайшли практичне застосування згідно наданих актів впровадження.

2. Наукова новизна

До найбільш важливих наукових результатів, викладених у дисертації, відношу наступні.

1. Розвинута наукова та методична база, яка створює умови для забезпечення розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів на основі математичного апарата диференціальних перетворень. До цієї бази входять розвинуті та розроблені нові методи розв'язання нелінійних звичайних диференціальних рівнянь, нелінійних крайових задач, метод дискретно-аналітичного відображення в область зображень вихідної нелінійної математичної моделі траєкторного руху ЛА. Запропоновані підходи не потребують чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, дають можливість отримання розв'язку в аналітичній формі, спрощують використання диференціальних перетворень для оперативної оптимізації керованих процесів.
2. Вперше, на основі об'єднання методу основних диференціально-тейлорівських перетворень, методу припасовування та застосування апроксимації нелінійних складових диференціальних рівнянь поліномами Адоміана, розроблено модифікований метод диференціальних перетворень (ММДП) для розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь.
3. Запропоновано метод розв'язання нелінійних крайових задач, що не потребує чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, дає змогу розширити інтервал та підвищити точність розв'язку.
4. Вперше на основі модифікованого методу диференціальних перетворень розроблено метод дискретно-аналітичного відображення у дискретні моделі вихідних нелінійних математичних задач багатоетапного виведення БЛА у задані термінальні умови.
5. Отримав подальший розвиток метод диференціальних перетворень в області застосування до розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом ЛА. На базі модифікованого методу диференціальних

перетворень розвинуті та розроблені нові методи розв'язання нелінійних задач оптимального термінального, багатокритерійного та гарантовано-адаптивного керування

6. Розроблено чисельно-аналітичний метод розв'язання нелінійних задач синтезу оптимальних замкнених законів термінального керування виведенням БЛА, що враховує багатоетапність керування, базується на модифікованому методі диференціальних перетворень та дискретно-аналітичному відображенні вихідних нелінійних математичних задач у спектральні моделі.
7. Вперше на базі модифікованого методу диференціальних перетворень та дискретно-аналітичного відображення нелінійних крайових задач, з використанням нелінійної схеми компромісів розроблено чисельно-аналітичний метод багатокритерійної оптимізації багатоетапного керування рухом літальних апаратів.
8. Вперше з використанням дискретно-аналітичного відображення вихідної нелінійної математичної задачі в область зображень та модифікованого методу диференціальних перетворень розроблено метод синтезу замкнених законів гарантовано-адаптивного багатоетапного керування літальними апаратами при виведенні у задані термінальні умови при впливі невизначених збурень.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, їх достовірність

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів дисертаційної роботи підтверджується коректним застосуванням відомих сучасних моделей, методів і засобів наукових досліджень, зокрема, математичного апарата диференціальних перетворень, методів теорії оптимального керування та диференціальних ігор, математичного моделювання та динаміки польоту літальних апаратів,. Автор бере до уваги те, що розробка методів розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів спрямована на практичне їх використання в реальних бортових обчислювальних комплексах. Коректне застосування комп'ютерного моделювання підтверджує обґрунтованість висновків по розділах дисертації та загальних висновків, стосовно наукової і практичної значущості результатів дисертаційних досліджень для їх практичного застосування на етапах проектування сучасних і перспективних зразків авіаційно-космічної техніки.

Отримані автором наукові результати є логічними, математично доведеними, не суперечать базовим твердженням аеродинаміки, динаміки польоту та не створюють протиріч при оцінці можливостей використання цих результатів на практиці.

Обґрунтованість подання вихідної математичної моделі руху у вигляді спектральної моделі з відсутнім часовим аргументом базується на відомому точному операційному методі диференціальних перетворень.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується повнотою розгляду на теоретичному і експериментальному рівнях об'єктів дослідження, застосуванням комплексу методів, адекватних предмету дослідження.

Вважаю, що основні наукові результати в цілому є теоретично обґрунтованими, а їх достовірність підтверджено значним обсягом результатів комп'ютерного моделювання.

Отримані наукові положення апробовані автором на 16 міжнародних та вітчизняних науково-практичних конференціях.

Конкретна реалізація отриманих наукових результатів підтверджується актами впровадження отриманих результатів.

4. Оцінка змісту, стиль викладу, публікації та апробації

Дисертаційна робота, складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 293 найменувань (202 кирилицею та 91 латиницею) та додатку, містить 285 сторінок основної частини, 24 рисунків, 11 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 341 сторінку

Оформлення дисертації відповідає вимогам ДАК України.

Мова та стиль дисертації та автореферату свідчать про вміння автора аргументовано викладати свої думки та відповідають вимогам МОН України. Дисертація має чітку логічну структуру. Термінологія, в цілому, використана правильно, стиль викладення зручний для аналізу. Зміст дисертації з достатньою повнотою викладений в статтях, що надруковані в фахових виданнях.

Ознайомлення з дисертацією, авторефератом та низкою статей дозволяє зробити висновок щодо наявності необхідної повноти публікацій наукових результатів у виданнях, що регламентовані МОН України. Особистий внесок здобувача підтверджується відображенням основних розділів дисертації в статтях і виступах з доповідями. Список праць складає 48 найменування, з яких 4 – у закордонних наукових виданнях, 24 – у наукових фахових виданнях (в т.ч. 11 – одноосібних, 4 – у наукових фахових виданнях, які

входять до переліку ВАК України, 20 - у фахових наукових виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз), 1 - монографія; 2 - учбових посібника та 17 - у збірниках матеріалів і праць міжнародних конференцій (у т.ч. 2 – у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus).

Обсяг публікацій відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів» щодо докторських дисертацій.

5. Практичне значення

Розвиток теорії та методів розв'язання нелінійних задач оптимального багатоетапного керування рухом БЛА на основі диференціальних перетворень дозволяє в реальному часі здійснювати оперативну оптимізацію керування та траєкторії руху і найбільш повно реалізувати максимально можливі льотні характеристики автономних безпілотних БЛА. Результати отримано у зручній формі для синтезу у реальному часі (оперативний синтез) оптимального керування.

Теоретичні основи дисертаційної роботи доведено до рівня алгоритмів оптимізації багатоетапного керування рухом конкретних БЛА на етапі їх виведення у задані термінальні умови:

- Отримано алгоритм оптимального за витратою палива керування процесом виведення АКС на орбіту, що забезпечує приведення АКС в задані термінальні умови та досягнення наприкінці виведення максимальної швидкості.
- Синтезовано алгоритм оптимального керування рухом БАЛА, що дозволяє здійснити посадку БАЛА з досягненням мінімальної горизонтальної посадкової швидкості апарата.
- Сформовано алгоритм багатокритерійного оптимального керування процесом виведення АКС на орбіту, що забезпечує компромісний розв'язок між термінальними похибками та тепловими навантаженнями на поверхні АКС.
- Отримано алгоритм багатокритерійного оптимального керування рухом БАЛА на режимі зльоту з підняттям на задану висоту, що дає змогу мінімізувати енергетичні витрати на підняття та досягти максимальної горизонтальної швидкості.
- Синтезовано гарантовано-адаптивний алгоритм керування процесом виведення АКС на орбіту, що володіє властивостями адаптації до дії збурень та забезпечує гарантію виведення за дії обмежених збурень.
- Сформовано гарантовано-адаптивний алгоритм керування рухом БАЛА на режимі зльоту з підняттям на задану висоту, що володіє властивостями адаптації до дії збурень та забезпечує гарантію виведення в задані термінальні умови при дії обмежених збурень.

Основні результати дисертаційної роботи впроваджено на НВП «Хартрон-Аркос», Інституту проблем матеріалознавства ім. Францевича НАН України, Національного центру управління та випробувань космічних засобів та у навчальний процес Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та Національного авіаційного університету, що підтверджено відповідними актами.

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи мають значну перспективу для використання при проектуванні сучасних та перспективних зразків авіаційно-космічної та повітроплавальної техніки.

6. Недоліки

У якості недоліків дисертаційної роботи вважаю за необхідне відмітити наступне:

1. В роботі доцільно було б конкретизувати кількісну оцінку зниження обчислювальних процедур при використанні апроксимації нелінійних складових диференціальних рівнянь поліномами Адоміана.

2. Для скорочення кількості членів ряду Тейлора та підвищення точності розв'язку, що відновлюється, бажано було б розглянути й питання щодо використання диференціальних перетворень нетейлорівського типу, наприклад на основі переходу до базису поліномів Чебишева, та висвітлити у порівнянні їх позитивні та негативні риси.

3. Необхідно більш чітко окреслити можливу область застосування розроблених методик синтезу оптимального керування, зазначити можливість або неможливість їх використання для синтезу алгоритму керування тривимірним рухом БЛА, визначити ступінь складності математичної моделі, при котрій дана методика буде мати переваги перед традиційними методами.

4. Доцільно було б виконати синтез алгоритмів оптимального керування й з використанням зміщених диференціальних перетворень та порівняти їх із запропонованими в роботі алгоритмами.

5. Доцільно було б з використанням спектральної моделі провести дослідження впливу похибки датчиків інформаційно-вимірювальної апаратури на термінальні похибки процесу виведення БЛА у задані термінальні умови.

6. У виконаному дослідженні диференціальний спектр обмежувався двома-трьома дискретами. Автор це пояснює тим, що цієї кількості достатньо для отримання рішення з прийнятною точністю в рамках задач управління

рухом ЛА. Необхідно було б надати пояснення – з якими обчислювальними труднощами можна зіткнутися при використанні більшої кількості дискрет.

Вказані недоліки, частина яких може бути віднесена до задач подальших досліджень, безумовно не знижують науковий рівень дисертації і не змінюють інтегроване позитивне враження від дисертації як кваліфікаційної роботи в цілому, завершеність якої не викликає сумніву завдяки ґрунтовності теоретичних досліджень та практичного значення використання її результатів.

7. Загальні висновки

Дисертаційна робота Гусиніна Андрія Вячеславовича на тему «Методи розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів на основі диференціальних перетворень» є завершеним науковим дослідженням, що містить нові науково обґрунтовані та практично важливі результати, що у сукупності вирішують актуальну науково-прикладну проблему оперативної оптимізації у реальному часі керування рухом безпілотних літальних апаратів при виведенні їх у задані термінальні умови.

Основні результати дисертації відповідають вимогам паспорту спеціальності 05.13.03-«Системи та процеси керування».

Дисертаційна робота за своїм змістом, науковим рівнем, практичною цінністю, публікаціями та апробаціями відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», що затверджений Постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 656 від 19.08.2015), а її автор Гусинін Андрій Вячеславович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.03-«Системи та процеси керування».

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

завідувач відділу системного аналізу

та проблем керування

Інституту технічної механіки НАНУ – ДКАУ,

член-кореспондент НАН України,

доктор технічних наук, професор,

Заслужений діяч науки і техніки України

А.П. Алпатов

Підпис Алпатова А.П.

Вчений секретар ІТМ НАНУ-ДКАУ

к.т.н., с.н.с.



О.М.Маркова