

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

головного наукового співробітника Центрального науково-дослідного інституту Збройних Сил України, доктора технічних наук, професора, Котлярова Володимира 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»

Актуальність теми

Сучасний рівень розвитку високопродуктивних малогабаритних бортових обчислювальних комплексів, бездротових телекомунікаційних систем та відповідного програмного забезпечення дозволяють створювати перспективні зразки авіаційно-космічної техніки та вирішувати на них широкий спектр цільових завдань, пов'язаних з виведенням у задані термінальні умови.

В якості різновиду таких перспективних зразків у дисертації розглядаються автономні безпілотні літальні апарати (БЛА): багаторазові авіаційно-космічні системи типу «повітряний старт» та безпілотні аеростатичні літальні апарати (БАЛА) типу дирижабль. Доцільність створення таких систем диктується прагненням зниження витрат, пов'язаних з доставкою вантажів на орбіту, та необхідністю мати альтернативний високо економічний та екологічний засіб повітряного транспорту.

Траєкторії польоту цих апаратів, при виконанні ними цільових завдань, характеризуються зміною конструктивних параметрів (мас, центрівок тощо) та роботи їх функціональних систем, є багатоетапними та складаються із декількох часових ділянок (підетапів), всередині яких змінні вектору стану є неперервними, а на межах ділянок може відбуватися їх перервна зміна, яка не виходить за межі прийнятих обмежень. В дисертаційній роботі під багатоетапним керуванням розуміється керування БЛА під час їх польоту за

51.13/99
05 04. 2021

багатоетапною траєкторією з урахуванням змін характеристик та режимів роботи систем апарату на кожній ділянці польоту.

Оптимізація руху БЛА при виконанні цільових задач дозволяє найбільш повно реалізувати їх максимально можливі льотні характеристики та потребує оперативного синтезу керування та траєкторії руху у реальному часі на кожній ділянці польоту. Проблеми неперервної оптимізації багатоетапного процесу керування безпілотними літальними апаратами у реальному масштабі часу визнані у світі такими, що є актуальними з наукової та практичної точок зору. Це пов'язано з тим, що високі вимоги до якості керування обумовлюються обмеженістю енергоресурсів літальних апаратів (ЛА) та необхідністю точного виконання кожного етапу польоту, від яких залежить ефективність їх застосування.

Тому обрана тема наукових досліджень, яка пов'язана з розробкою методів розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом ЛА, які дозволили б на наявних на борту обчислювальних засобах, у реальному масштабі часу, вирішувати задачу оперативного синтезу оптимальних керувань та траєкторій руху ЛА при виведенні їх у задані термінальні умови є актуальною.

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» на період до 2021 року, постанов Кабінету міністрів України №294 від 12.03.2012р., №980 від 18.01.2017р. «Про затвердження середньострокових пріоритетних напрямків інноваційної діяльності галузевого рівня на 2017-2021 роки, Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2013-2017 роки та Стратегічного плану розвитку авіаційного транспорту України на період до 2020 року, затвердженого розпорядженням Кабінету міністрів України від 20.10.2010 року №2174-р.).

Актуальність теми дисертації, важливість та перспективність отриманих результатів підтверджується тим, що результати роботи вже знайшли практичне застосування згідно наданих актів впровадження.

Наукова новизна отриманих результатів

Основні наукові результати дисертації Гусиніна А.В. полягають у наступному:

1. Розвинуто наукову та методичну базу для забезпечення розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом ЛА на основі

- математичного апарата диференціальних перетворень. Зокрема, розвинуті існуючі та розроблені нові методи розв'язання нелінійних звичайних диференціальних рівнянь, нелінійних крайових задач та метод дискретно-аналітичного відображення в область зображень вихідної нелінійної математичної моделі траєкторного руху ЛА.
2. Уперше розроблено модифікований метод диференціальних перетворень (ММДП) для розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь, що базується на сполученні використання методу основних диференціальних перетворень, методу припасовування та застосуванні апроксимації нелінійних складових диференціальних рівнянь поліномами Адоміана та забезпечує зниження верхньої межі оцінки похибки в p^s раз, де p - кількість підінтервалів, на які розбивається заданий інтервал розв'язку, s - кількість врахованих дискрет диференціального спектра.
 3. Запропоновано метод розв'язання крайових задач, що описуються нелійними диференціальними рівняннями. Метод ґрунтується на базі модифікованого методу диференціальних перетворень та дає змогу спростити обчислення диференціальних зображень складних нелінійностей задачі, розширити інтервал та підвищити точність розв'язку.
 4. Уперше розроблено метод дискретно-аналітичного представлення у формі спектральної моделі з відсутнім часовим аргументом нелінійної математичної моделі багатоетапного руху БЛА при виведенні у задані термінальні умови.
 5. Отримав подальший розвиток математичний апарат диференціальних перетворень в області застосування до розв'язання нелінійних задач оптимального багатоетапного керування БЛА. Зокрема, розроблені методи розв'язання нелінійних задач оптимального термінального, багатокритерійного та гарантовано-адаптивного керування, що базуються на модифікованому методі диференціальних перетворень, створюють можливість отримання розв'язку в аналітичній формі та здійснювати оперативний синтез керування.
 6. Розвинуто чисельно-аналітичний метод розв'язання нелінійних задач синтезу оптимальних замкнених законів термінального керування виведенням БЛА, що враховує багатоетапність керування, ґрунтується на дискретно-аналітичному відображенні вихідної нелінійної математичної моделі руху у спектральній моделі та модифікованому методі диференціальних перетворень. Метод не потребує розв'язання двоточкової крайової задачі, виключає необхідність чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, дозволяє отримати алгоритм керування в

аналітичному вигляді та проводити моделювання динамічного процесу у реальному часі.

7. Уперше на базі модифікованого методу диференціальних перетворень, дискретно-аналітичного відображення у спектральні моделі траєкторного руху ЛА, з використанням нелінійної схеми компромісів розроблено чисельно-аналітичний метод багатокритерійної оптимізації для розв'язання нелінійних задач синтезу оптимального багатоетапного керування рухом літальних апаратів при виведенні у задані термінальні умови.
8. Уперше на базі 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.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, їх достовірність

Особливістю отриманих автором результатів досліджень є те, що розробка методів розв'язання нелінійних задач оптимального керування спрямована на практичне їх використання в реальних бортових обчислювальних комплексах автономних безпілотних літальних апаратів.

Ступінь обґрунтованості отриманих положень, висновків та результатів, сформульованих у дисертації, підтверджується коректністю використання обґрунтованих методів дослідження та застосування відомих моделей, методів і засобів наукових досліджень, зокрема, методів теорії оптимального керування, диференціальних ігор, операційного метода диференціальних перетворень, методів математичного та комп'ютерного моделювання.

Міра обґрунтованості висновків по розділах дисертації та загальних висновків стосовно наукової і практичної значущості результатів дисертаційних досліджень, що базуються на отриманих результатах аналітичних досліджень та комп'ютерного моделювання, достатня для їх практичного застосування на етапах проектування систем керування сучасних і перспективних безпілотних літальних апаратів, зокрема авіаційно-космічних систем та автономних аеростатичних літальних апаратів.

Достовірність наукових положень, які захищаються здобувачем, висновків і рекомендацій підтверджується їх відповідністю методології дослідження поставленій проблемі, повнотою розгляду на теоретичному і експериментальному рівнях об'єкту дослідження, що охоплюють його змістовні і процесуальні характеристики, застосуванням комплексу методів, адекватних предмету дослідження.

Підсумовуючи, можна зазначити, що основні наукові результати дисертаційних досліджень в цілому є теоретично обґрунтованими, а їх достовірність підтверджено числовими результатами та широким обсягом результатів комп'ютерного моделювання.

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.

Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації і дає повне уявлення про отримані результати дослідження та їх наукову новизну та практичну значимість.

Сформульовані у дисертаційній роботі основні положення, висновки та рекомендації викладено у логічній послідовності, що значно сприяє усвідомленню думок автора. Всі розділи дисертації мають внутрішню єдність і завершеність. Змістовне наповнення підрозділів роботи відповідає змісту визначених розділів. В цілому, дисертаційна робота сприймається як закінчена наукова праця, що містить нові наукові результати.

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.

Практичне значення одержаних результатів

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

Синтезовано для авіаційно-космічної системи:

- алгоритм оптимального за витратою палива керування процесом виведення на орбіту, що забезпечує приведення в задані термінальні умови та досягнення наприкінці виведення максимальної швидкості;
- алгоритм багатокритерійного оптимального керування процесом виведення на орбіту, що забезпечує компромісний розв'язок між термінальними похибками та тепловими навантаженнями на поверхні АКС;
- гарантовано-адаптивний алгоритм керування процесом виведення на орбіту, що володіє властивостями адаптації до дії збурень та забезпечує гарантію виведення в умовах дії обмежених збурень.

Сформовано для аеростатичного літального апарату:

- алгоритм оптимального керування, що дозволяє здійснити посадку з досягненням мінімальної горизонтальної посадкової швидкості апарата;
- алгоритм багатокритерійного оптимального керування рухом БАЛА на режимі зльоту з виведенням на задану висоту, що дає змогу мінімізувати енергетичні витрати на підйом та досягти максимальної горизонтальної швидкості;
- гарантовано-адаптивний алгоритм керування на режимі зльоту з виведенням 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-Арко», 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.

Недоліки

1. При викладі багатоетапного методу диференціальних перетворень доцільно було б розглянути питання оцінки верхньої межі похибки для

випадку, коли інтервал розв'язку розбивається на підінтервали різної довжини.

2. В роботі не достатньо розглянуто питання чому саме поліноми Адоміана прийнято для апроксимації нелінійних складових диференціальних рівнянь.

3. При проведенні аналізу відомих методів оптимізації траєкторного руху літальних апаратів необхідно було б зробити більш глибокій порівняний аналіз існуючих методів оптимального керування та висвітлити їх позитивні та негативні риси.

4. Не досліджено питання впливу точності вимірювальних пристроїв, сигнали яких використовуються у запропонованих алгоритмах, на точність досягнення кінцевих параметрів руху.

5. Доцільно було б конкретизувати кількісну оцінку зниження обчислювальних процедур при використанні розроблених в роботі методів синтезу алгоритмів керування.

Наведені недоліки безумовно не знижують науковий рівень дисертації і не впливають на загальну оцінку роботи та зроблених висновків в цілому.

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, які у своїй сукупності вирішують актуальну науково-прикладну проблему оперативної оптимізації 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».

Автореферат повністю відображає зміст та основні положення дисертації.

За науковим рівнем, практичною цінністю, публікаціями та апробацією дисертаційна робота 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 19.08.2015р.), а її автор Гусинін Андрій

В'ячеславович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.03–«Системи та процеси керування».

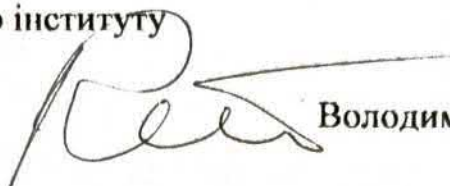
ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

Головний науковий співробітник

Центрального науково-дослідного інституту

Збройних Сил України

доктор технічних наук, професор



Володимир КОТЛЯРОВ

Підпис Котлярова В.П. засвідчую

ТВО начальника відділу персоналу та стройового

Центрального науково-дослідного інституту

Збройних Сил України



Надія ПАТЕР