



МІНІСТЕРСТВО ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ
ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА
АКАДЕМІЯ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ
ОСВІТИ ТА УПРАВЛІННЯ

03035, м. Київ-35, вул. Митрополита Василя
Липківського, 35, т./ф. (044) 206-31-87,
e-mail: dei2005@ukr.net

MINISTRY OF ENVIRONMENTAL
PROTECTION AND NATURAL RESOURCES
OF UKRAINE
STATE ECOLOGICAL ACADEMY OF
POST-GRADUATE EDUCATION AND
MANAGEMENT

35, Metropolitan Vasil Lypkivskyi str., Kyiv, 03035,
Ukraine, tel./fax (044) 206-31-87,
e-mail: dei2005@ukr.net

Голові спеціалізованої вченої ради
Д 26.062.03 у Національному
авіаційному університеті МОН
України

03680, м. Київ, пр. Любомира
Гузара,1.

ВІДГУК

офіційного опонента,

проректора з наукової роботи

Державної академії післядипломної освіти та управління,
Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України,
доктора технічних наук, професора *МАШКОВА Олега Альбертовича*
на дисертацію *ГУСИНІНА Андрія В'ячеславовича*
за темою: "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 дисертації.

У теперішній час реалізація науково-технічного потенціалу України в галузі 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. Це пов'язано з тим, що сучасні високопродуктивні малогабаритні бортові комп'ютери, бездротові телекомунікаційні системи та відповідне програмне

51.13/98

07.04.2021

забезпечення дозволяють успішно вирішити ці складні завдання. Як різновиди сучасних та перспективних літальних апаратів у дисертації розглядаються перспективні автономні безпілотні літальні апарати: багаторазові авіаційно-космічні системи типу «повітряний старт» та аеростатичні літальні апарати. З теоретичної точки зору ці об'єкти керування, враховуючи зміну їх конструктивних параметрів (зміна мас, центрівок тощо), зміни режимів роботи двигунів та системи керування при виконанні цільових завдань, що пов'язані з виведенням у задані термінальні умови, можуть бути класифіковані як багаторежимні літальні апарати. Траєкторії їх руху є багатоетапними та складаються із декількох ділянок, всередині яких змінні вектору стану є неперервними, а на межах ділянок може відбуватися їх перервна зміна, не виходячи за межі прийнятих обмежень. Багатоетапне керування передбачає керування автономним безпілотним літальним апаратом під час їх польоту за багатоетапною траєкторією з урахуванням змін характеристик та режимів роботи систем апарату на кожній ділянці польоту. Створення автономних безпілотних літальних апаратів для виконання ними специфічних задач (виведення корисного навантаження на орбіту, вирішення термінових задач моніторингу, нагляду, зв'язку у заданому районі тощо) диктує необхідність оперативного синтезу керування та траєкторій з метою забезпечення оптимального виведення у задані термінальні умови. Проблеми неперервної оптимізації багатоетапного процесу керування 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, необхідністю точного виконання кожного етапу польоту, від яких залежить ефективність їх застосування. Точний вихід у задані термінальні умови та подальше виконання поставлених завдань залежить, насамперед, від оптимізації керування та траєкторії у реальному масштабі часу. При цьому, вплив параметричних та зовнішніх збурень

вимагає неперервної оптимізації траєкторії польоту у реальному часі на всіх етапах польоту.

При вирішенні цієї проблеми автор у своїх дослідженнях спирався на праці вітчизняних і зарубіжних вчених, які зробили значний внесок у розвиток теорії управління та оптимізації динамічних процесів із різними підходами до їх розв'язання, які розглядалися у працях Понтрягіна Л.С., Беллмана Р., Сейджа Е.П., Брайсона А., Кротова В.Ф., Красовського М.М., Гамкрелідзе Р.В., Болтянського В.Г., Лоудена Д.Ф., Лєтова А.М., Красовського О.А., Міхалевича В.С., Кунцевича В.М., Вороніна А.М., Зіатдінова Ю.К., Лисенка О.І. та багато інших. До сьогодні, задача оптимізації багатетапного траєкторного руху автономних безпілотних літальних апаратів бортовими засобами повністю не розв'язана. Це пов'язано зі складністю проведення оперативного, в реальному масштабі часу, синтезу алгоритмів оптимальних багатетапних процесів керування рухом ЛА, що описуються нелінійними диференціальними рівняннями, традиційними методами оптимізації. Виходячи з практичного застосування, більшість з цих методів базується на методах Понтрягіна Л.С., Беллмана Р., Красовського М.М., Красовського А.А. та їх модифікаціях. Математичні та обчислювальні труднощі їх використання для розв'язку нелінійних задач оптимального керування пов'язані з необхідністю численного інтегрування диференціальних рівнянь руху ЛА, розв'язанням важко вирішуваної двоточкової крайової задачі або чисельним інтегруванням диференціальних рівнянь у часткових похідних. У зв'язку з цим розвиток методів розв'язання нелінійних задач оптимального термінального керування рухом літальних апаратів у реальному часі є актуальною науковою проблемою, що має важливе практичне значення для створення перспективних зразків авіаційно-космічної техніки.

Інше актуальне в науковому та практичному плані завдання полягає у розв'язанні задачі багатокритеріальної оптимізації термінального керування багатетапним рухом безпілотного літального апарата, що описується

нелінійними диференціальними рівняннями. Як відомо, процес керування літальним апаратом при виведенні у задані термінальні умови оцінюється багатьма критеріями, залежно від характеристик літального апарату, цільової задачі та функціонування систем апарата на окремих етапах польоту. Ці критерії часто суперечать один одному, поліпшення одного з них неминуче приводить до погіршення інших. Однак не можна нехтувати жодним з них, оскільки тільки у своїй сукупності вони дають повне уявлення про керований багатоступінний рух апарата. Тут необхідно розв'язувати нелінійну задачу оптимізації, що полягає у знаходженні оптимального компромісного розв'язку серед усіх критеріїв якості з урахуванням обмежень на область їх допустимих значень.

Аналіз літератури показав, що на сьогоднішній день напрацьовано різні методи, механізми, принципи і методики управління та розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів на основі різноманітних підходів.

Незважаючи на істотні досягнення в теорії управління складними системами, існує клас динамічних систем, для яких постановка задач, методи та алгоритми оптимізації багатоступінного процесу виведення автономних безпілотних літальних апаратів у задані термінальні умови, розроблені не повною мірою.

При забезпеченні оптимального управління рухом літальних апаратів виникає відоме у практиці управління складних систем протиріччя: забезпечення заданого рівня точності досягнення бажаних фазових координат потребує збільшення обсягу інформації, що обробляється та точності вимірювань параметрів руху з одного боку, з іншого – відсутність оперативного часу для синтезу керуючих функцій в процесі руху в умовах непередбачуваних зовнішніх впливів.

У рамках зазначеного протиріччя актуальною науковою проблемою є розвиток методів розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літального апарата на основі диференціальних перетворень та їх

застосування до оптимізації багатоетапного процесу виведення автономних безпілотних літальних апаратів у задані термінальні умови.

Дисертація присвячена вирішенню проблеми ~~проблема~~—розв’язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів з метою підвищення ефективності їх функціонування при автономному виведенні у задані термінальні умови завдяки забезпеченню можливості здійснювати бортовими засобами оперативний синтез оптимального керування у реальному масштабі часу.

Тому тема дисертаційної роботи *Гусиніна Андрія Вячеславовича*, яка присвячена рішення цієї наукової проблеми, є актуальною.

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

Автор добре розуміє специфіку задачі, що розглядається у дисертації та коректно формулює її постанову. Аналіз сучасного стану методів розв’язання нелінійних задач оптимального термінального керування рухом літальних апаратів, порівняльний аналіз методів термінального керування авіаційно-космічними системами, аналіз багатокритеріальних задач багатоетапного оптимального керування літальними апаратами, які виконано досить кваліфіковано, склали основу побудови методології розв’язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів на основі диференціальних перетворень.

При цьому, розв’язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів на основі диференціальних перетворень здійснюється **на** єдиній методологічній основі теорії автоматичного керування та синтезу оптимального керування складними технічними системами. Тому автор обґрунтовано застосовує математичний апарат диференціальних перетворень функцій та рівнянь, використовує методи теорії оптимального керування, диференціальних ігор, математичного моделювання та динаміки польоту літальних апаратів.

Під час проведення досліджень автор спирається на відомі факти та наукові досягнення в обраній сфері, які отримані з використанням апробованого математичного апарату, який є адекватним моделі управління рухом літальних апаратів та забезпечення визначеної якості керування.

Розроблені автором практичні рекомендації ґрунтуються на розробленому ним науково-методичному апараті, який є достатньо чутливим для відповідних змін вихідних даних.

Відмічаю, що наукові положення та рекомендації, які сформульовані у висновках зроблено науково обґрунтовано і логічно по результатам моделювання виведення аеростатичного літального апарату на задану висоту, виведення авіаційно-космічної системи на орбіту.

Достовірність одержаних результатів.

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

Достовірність і обґрунтованість результатів дисертації ґрунтуються на:

- використанні результатів аналізу сучасного стану методів розв'язання нелінійних задач оптимального термінального керування рухом літальних апаратів;
- коректності застосування методів диференціальних перетворень функцій та рівнянь, методів теорії оптимального керування, диференціальних ігор, математичного моделювання та динаміки польоту літальних апаратів;
- узгодженістю із наявними результатами інших авторів, які надруковано у вітчизняній та зарубіжній літературі;

- даних про їх успішне практичне застосування при комп'ютерному моделювання, та порівняння отриманих результатів з відомими даними незалежних дослідників та результатами моделювання.

Наукова новизна та важливість результатів, які одержані автором в дисертації, полягають в наступному.

У дисертаційній роботі розв'язана наукова-технічна проблема, яка спрямована на підвищення ефективності функціонування безпілотних літальних апаратів при їх автономному виведенні у задані термінальні умови завдяки забезпеченню можливості здійснювати бортовими засобами оперативний синтез оптимального керування у реальному масштабі часу. Оперативна оптимізація досягається завдяки застосуванню розроблених на основі розвинутого математичного апарату диференціальних перетворень методів оптимізації керування.

Метою роботи визначено розвиток методів розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літального апарата на основі диференціальних перетворень та їх застосування до оптимізації багатоетапного процесу виведення автономних безпілотних літальних апаратів у задані термінальні умови.

Поставлена мета дисертаційного дослідження досягається розв'язанням наступних задач:

1. Розвиток методу диференціальних перетворень для розв'язання нелінійних звичайних диференціальних рівнянь.
2. Розвиток методу диференціальних перетворень для розв'язання крайових задач, що описуються нелійними звичайними диференціальними рівняннями.
3. Розробка методу дискретно-аналітичного відображення у дискретні моделі нелінійних задач термінального виведення літального апарата.
4. Розробка методу оптимізації багатоетапного керування процесом термінального виведення літального апарата.

5. Розробка методу багатокритеріальної оптимізації процесів багатоетапного виведення літального апарата у задані термінальні умови.

6. Розробка методу оптимізації гарантовано-адаптивного керування термінальним виведенням літального апарата в умовах дії невизначених збурень.

7. Дослідження шляхів практичного застосування розроблених методів оптимізації до оперативного синтезу алгоритмів оптимального багатоетапного керування виведенням авіаційно-космічних систем на орбіту та безпілотних аеростатичних літальних апаратів у задані термінальні умови.

Автором встановлено, що створення перспективних зразків авіаційно-космічної техніки та широкий спектр завдань, що на них покладаються, потребують розв'язання низки задач щодо виведення літальних апаратів у задані термінальні умови та висувають проблему розробки ефективних методів розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальним апаратом у реальному часі.

На основі аналізу наявних відомих методів адаптивного, оптимального та робастного керування, а також методів керування на основі інтелектуальних технологій зроблено висновок, що вони використовують різноманітні апроксимації та спрощення у математичній моделі руху, потребують чисельного інтегрування диференціальних рівнянь руху та не дозволяють максимально реалізувати можливості літальних апаратів при виведенні у задані термінальні умови у реальному часі.

Ґрунтуючись на аналізі особливостей процесів виведення сучасних безпілотних літальних апаратів у задані термінальні умови, на прикладі виведення авіаційно-космічної системи орбіту та безпілотного аеростатичного літального апарата на задану висоту, доведена необхідність постановки багатокритерійної задачі багатоетапного оптимального керування літальним апаратом.

В роботі доведена необхідність постановки задачі гарантовано-адаптивного керування багатоетапним рухом літальним апаратом при виведенні у задані термінальні параметри в умовах дії невизначених збурювань.

Встановлено, що найбільш простими з обчислювальної точки зору, порівняно з відомими методами розв'язання задач оптимального керування у реальному часі, є операційні методи, що засновані на диференціальних перетвореннях вихідної математичної моделі в області зображень, в якій відсутній неперервний часовий аргумент.

Відмічено, що основними обмеженнями методу диференціальних перетворень є обмеженість застосування інтервалу, на якому збігаються ряди Тейлора шуканих функцій, складність отримання диференціальних зображень нелінійних функцій, необхідність обчислення великої кількості дискрет диференціального спектру для досягнення необхідної точності, що значно збільшує складність аналітичних перетворень.

Зазначено, що на теперішній час існує необхідність подальшого розвитку методу основних диференціальних перетворень для його застосування до розв'язання нелінійних задач оптимізації багатоетапного керування літальним апаратом, що є актуальним для максимальної реалізації їх можливостей під час виведення у задані термінальні умови.

Обґрунтовано доцільність та ефективність застосування багатоетапного методу диференціальних перетворень, що ґрунтується на поєднанні методу основних диференціальних перетворень та методу припасовування, до розв'язання нелінійних звичайних диференціальних рівнянь та нелінійних крайових задач. Зазначений підхід дає змогу значно розширити інтервал та підвищити точність розв'язку.

Розроблено модифікований метод диференціальних перетворень до розв'язання нелінійних звичайних диференціальних рівнянь та систем диференціальних рівнянь, що базується на сумісному використанні методу основних диференціальних перетворень, методу припасовування та застосуванні апроксимації нелінійних складових диференціальних рівнянь

поліномами Адоміана. Метод дозволяє розширити інтервал розв'язання, підвищити точність розв'язку, дає змогу подолати математичні складності при обчисленні диференціальних зображень складних нелінійностей рівнянь, та розширити сферу застосування методу основних диференціальних перетворень.

Запропоновано метод розв'язання крайових задач, які описуються нелінійними звичайними диференціальними рівняннями, що ґрунтується на базі модифікованого методу диференціальних перетворень. Метод дає змогу спростити обчислення диференціальних зображень складних нелінійностей задачі за рахунок їх апроксимації поліномами Адоміана, розширити інтервал та підвищити точність розв'язку.

Запропонована оцінка похибки розв'язку диференціальних рівнянь модифікованим методом диференціальних перетворень. Доведено, що їх застосування у випадку розбиття заданого інтервалу розв'язку на підінтервали однакової довжини забезпечує порівняно з методом основних диференціальних перетворень зниження верхньої межі оцінки похибки розв'язку в p^s раз, де p - кількість підінтервалів, на які розбивається заданий часовий інтервал, s - кількість врахованих дискрет диференціального спектра.

Зазначено, що метод зміщених диференціальних перетворень є частковим випадком багатоетапного методу диференціальних перетворень за умови розбивання інтервалу розв'язку на два підінтервали.

Розроблено метод дискретно-аналітичного відображення у спектральні моделі вихідних нелінійних математичних задач багатоетапного траєкторного руху літального апарата при виведенні у задані термінальні умови. Запропонований підхід ґрунтується на модифікованому методі диференціальних перетворень, дозволяє запобігти складностей, що пов'язані з відображенням нелінійних складових рівнянь руху, за рахунок апроксимації нелінійних складових диференціальних рівнянь поліномами Адоміана, спростити побудову спектральної моделі задачі із збереженням точності вихідної математичної моделі та дає змогу використати її для оперативної оптимізації багатоетапного керованого процесу.

Побудовано модифіковані спектральні моделі багатоетапних процесів виведення безпілотного аеростатичного літального апарата на задану висоту та виведення авіаційно-космічної системи на орбіту у вигляді рекурентних виразів, що потребують виконання операцій тільки складання-віднімання та добутку. Отримані спектральні моделі дають змогу за диференціальним спектром керування знайти диференціальний спектр вектору стану та отримати набір диференціальних спектрів змінних траєкторного руху, який відповідає вихідній математичній моделі.

За спектральними моделями визначено дискрети диференціальних спектрів змінних траєкторного руху безпілотного аеростатичного літального апарата та авіаційно-космічної системи, обчислювальні витрати при знаходженні яких істотно зменшені за рахунок використання поліномів Адамсана для апроксимації нелінійних складових рівнянь руху.

На прикладі безпілотного аеростатичного літального апарата показано можливість на основі диференціальних спектрів траєкторного руху апарата розв'язувати нелінійні задачі аналітичного конструювання керування процесом термінального виведення безпілотного літального апарата.

Запропоновано підхід до побудови оптимальних багатоетапних програмних керувань з використанням удосконаленого дискретно-аналітичного відображення нелінійних задач виведення безпілотного літального апарата у задані термінальні умови та модифікованого методу диференціальних перетворень. На відміну від відомих зазначених підхід не потребує розв'язання двоточної крайової задачі або нелінійних диференціальних рівнянь в частинних похідних, зводить проблему побудови керування до розв'язання скінченної системи рівнянь відносно параметрів керування.

Розвинуто численно-аналітичний метод розв'язання нелінійних задач оптимізації термінального керування рухом літального апарата. На відміну від відомих метод ґрунтується на удосконаленому дискретно-аналітичному відображенні нелінійних вихідних математичних задач в область зображень, модифікованому методі диференціальних перетворень та враховує

багатоетапність траєкторного руху. Метод виключає необхідність чисельного інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь, дозволяє отримувати алгоритм керування в аналітичному вигляді, здійснювати оперативний синтез керування та проводити моделювання динамічного процесу у реальному часі.

Виконано аналітичний синтез алгоритму оптимального за витратою палива керування багатоетапним процесом виведення авіаційно-космічної системи на орбіту, що забезпечує приведення авіаційно-космічної системи в задані термінальні умови та досягнення наприкінці виведення максимальної швидкості.

Моделювання багатоетапного процесу виведення авіаційно-космічної системи «Оріль» на орбіту показало, що синтезований з використанням модифікованого методу диференціальних перетворень алгоритм керування забезпечує економію палива порівняно з відомим алгоритмом $\sim 1\%$.

Виконано аналітичний синтез алгоритму оптимального керування безпілотним аеростатичним літальним апаратом на етапі посадки. Моделюванням показано, що запропонований алгоритм забезпечує з прийнятною точністю досягнення заданої вертикальної швидкості зниження у момент торкання посадкової поверхні та мінімальної горизонтальної посадкової швидкості апарата з коротким пробігом по землі.

Показано можливість застосування зміщених диференціальних перетворень до розв'язання задачі оптимізації багатоетапного термінального керування літальним апаратом. Доведено, що застосування зміщених перетворень до розв'язання задач синтезу замкнених законів оптимального керування призводить до ускладнення отримання спектральної моделі задачі та збільшення кількості невідомих в системі скінчених нелінійних рівнянь для визначення параметрів керування.

Сформульовано постановку задачі багатокритеріальної оптимізації багатоетапних динамічних процесів. На основі порівняльного аналізу багатокритерійних моделей оптимізації динамічних процесів обґрунтований вибір моделі оптимізації для розв'язання задачі синтезу алгоритмів

багатоетапного керування процесом виведення безпілотного літального апарата в задані термінальні умови у вигляді скалярної згортки частинних критеріїв за нелінійною схемою компромісів. Вибрана модель враховує обмеження на часткові критерії якості, забезпечує адаптацію щодо змін параметрів моделі та, у разі опуклості часткових критеріїв якості, забезпечує унімодальність скалярної згортки, що значно спрощує оптимізацію багатоетапних процесів.

Уперше на базі удосконаленого дискретно-аналітичного відображення траєкторного руху літального апарата та модифікованого методу диференціальних перетворень, з використанням нелінійної схеми компромісів розроблено численно-аналітичний метод багатокритеріальної оптимізації для розв'язання нелінійних задач синтезу оптимального багатоетапного керування рухом літальних апаратів. Запропонований підхід дає можливість спростити процес знаходження розв'язку нелінійної задачі оптимізації та звести проблему векторної оптимізації до розв'язання скінченної системи нелінійних рівнянь відносно параметрів керування.

Синтезовано алгоритм багатокритеріального керування багатоетапним процесом виведення АКС «Оріль» на орбіту, що забезпечує компромісний розв'язок між термінальними помилками виведення та тепловими навантаженнями на поверхні авіаційно-космічної системи.

Моделюванням на ЕОМ обґрунтовано працездатність, ефективність та адаптивність запропонованого комбінованого алгоритму, складеного з синтезованих модифікованим методом диференціальних перетворень алгоритмів термінального та багатокритерійного керування виведенням авіаційно-космічної системи «Оріль» на орбіту. Показано, що комбінований алгоритм, порівняно з термінальним, забезпечує зниження теплового потоку на 43%, швидкісного напору на 19%, максимальної піднімальної сили на 3% та забезпечує таку саму точність виведення в задані кінцеві умови практично за той самий час, витрачаючи, при цьому, більше палива усього на 0,12 %.

Синтезовано алгоритм багатокритеріального керування багатоетапним процесом зльоту безпілотного аеростатичного літального апарата з виведенням

на задану висоту, що забезпечує компромісний розв'язок між термінальними помилками виведення та енергетичними витратами на підняття апарату на задану висоту.

Моделюванням на ЕОМ обґрунтовано працездатність, ефективність та адаптивність комбінованого алгоритму, складеного з алгоритмів багатокритеріального та термінального керування процесом зльоту безпілотного аеростатичного літального апарату з підніманням на задану висоту. Встановлено, що комбінований алгоритм, порівняно з термінальним, забезпечує зниження витрат енергії на піднімання апарату на висоту 350 м на 6% та дозволяє отримати більшу горизонтальну швидкість наприкінці процесу піднімання. Зниження витрат енергії збільшується із збільшенням висоти піднімання.

Дослідження процесів виведення безпілотних літальних апаратів в задані термінальні умови при дії різних варіантів вітрових збурень показало, що комбіновані алгоритми забезпечують виведення з припустимою точністю:

- авіаційно-космічної системи «Оріль» на задану орбіту за припустимих значень аеродинамічних та теплових навантажень на конструкцію апарату;
- безпілотного аеростатичного літального апарату на задану висоту за припустимих витратах енергії з досягненням максимальної горизонтальної швидкості.

Встановлено, що застосування зміщених ДТ-перетворень до багатокритеріального синтезу алгоритмів багатоетапного керування рухом літальних апаратів дозволяє підвищити точність моделювання динамічного процесу за обмеженої кількості дискрет диференціального спектру. Однак, у той самий час, значно ускладнюється система спектральних моделей і, як результат, збільшується кількість невідомих в системі скінчених нелінійних рівнянь для визначення параметрів керування.

Розроблено диференціально-ігрову модель процесу багатоетапного керування траєкторним рухом безпілотних літальних апаратів при виведенні у задані термінальні умови при дії невизначених збурень. Модель подано у формі

диференціальної гри між системою керування та впливом факторів невизначених збурень і ґрунтується на сумісному використанні методів диференціальної гри та математичного апарату диференціальних перетворень. Розкриття невизначеності досягається застосуванням принципу максимального гарантованого результату.

На основі розробленої диференціально-ігрової моделі запропоновано чисельно-аналітичний метод побудови програмних алгоритмів багатоетапного керування траєкторним рухом безпілотних літальних апаратів за максимальної протидії невизначених збурень. Запропонований підхід виключає необхідність інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь руху, розв'язує задачу побудови програмних стратегій гравців без використання функції часу та дає змогу проводити неперервні обчислення програмних стратегій гравців у реальному часі.

На прикладі виведення безпілотного аеростатичного літального апарата на задану висоту показано можливість побудови оптимальних програмних стратегій учасників диференціальної гри шляхом аналітичних перетворень, що дозволяє значно скоротити об'єм обчислень для отримання розв'язку у чисельному або аналітичному вигляді.

Розроблено метод оптимізації гарантовано-адаптивного багатоетапного керування безпілотними літальними апаратами при виведенні у задані термінальні умови при впливі невизначених збурень завдяки застосуванню удосконаленого дискретно-аналітичного відображення вихідної нелінійної математичної задачі в область зображень та модифікованого методу диференціальних перетворень. Метод використовує диференціально-ігрову модель багатоетапного динамічного процесу, спрощує дискретно-аналітичне відображення вихідної математичної моделі в область зображень, не потребує чисельного інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь, зводить проблему синтезу до розв'язання скінченої системи нелінійних рівнянь відносно параметрів керування та збурень і припускає аналітичний розв'язок задачі.

Запропоновано гарантовано-адаптивний алгоритм багатоетапного керування безпілотними аеростатичним літальним апаратом при виведенні в задані термінальні умови, що враховує термінальні умови на кожній ділянці виведення, володіє властивостями адаптації до дії збурень та забезпечує гарантію реалізації процесу багатоетапного виведення за найгіршого сполучення факторів обмежених збурень.

Синтезовано гарантовано-адаптивний алгоритм керування процесом виведення авіаційно-космічної системи на орбіту в умовах дії невизначених збурень, що враховує термінальні умови за висотою та вертикальною швидкістю на кожній ділянці виведення, забезпечує гарантію багатоетапного виведення на орбіту в задані термінальні умови за найгіршого сполучення дії обмежених збурень та володіє властивостями адаптації до дії збурень.

Таким чином, важливість отриманих результатів полягає в наступному.

Розвинута наукова та методична база для забезпечення розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів на основі математичного апарату диференціальних перетворень. Зокрема, розвинуті 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 при виведенні у задані термінальні умови. Запропоновані підходи не потребують чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, спрощують та підвищують точність розв'язку крайових задач, що описуються нелійними диференціальними рівняннями, створюють умови для оперативної оптимізації керованих процесів завдяки забезпечення можливості отримання розв'язку в аналітичній формі.

Новим є розроблений модифікований метод диференціальних перетворень для розв'язання нелінійних звичайних диференціальних рівнянь, що базується на сумісному використанні методу основних диференціальних перетворень, методу припасовування та застосуванні апроксимації нелінійних складових диференціальних рівнянь поліномами Адоміана. Метод дозволяє розширити

інтервал розв'язання та спростити дискретно-аналітичне відображення задачі, забезпечує зниження верхньої межі оцінки похибки в p^s раз, де p - кількість підінтервалів, на які розбивається інтервал розв'язку, s - кількість врахованих дискрет диференціального спектра.

Новим є запропонований підхід до розв'язання крайових задач, що описуються нелінійними звичайними диференціальними рівняннями, на базі модифікованого методу диференціальних перетворень. Запропонований підхід не потребує чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, спрощує знаходження диференціальних зображень складних нелінійностей задачі за рахунок їх апроксимації поліномами Адоміана, дає змогу розширити інтервал та підвищити точність розв'язку.

Новим є розроблений метод дискретно-аналітичного відображення у спектральні моделі вихідних нелінійних математичних задач траєкторного руху літального апарата при виведенні у задані термінальні умови. Метод дозволяє запобігти складностей, що пов'язані з відображенням нелінійних складових рівнянь руху, спростити побудову спектральної моделі та дає змогу використати її для оперативної оптимізації багатоетапного керованого процесу у реальному масштабі часу.

Також новим є удосконалений метод диференціальних перетворень функцій та рівнянь в області застосування до розв'язання нелінійних задач оптимізації керування рухом літальних апаратів. Запропонований підхід ґрунтується на застосуванні модифікованого методу диференціальних перетворень та удосконаленого методу дискретно-аналітичного відображення нелінійних задач в область зображень. За зазначеним підходом розвинуті та розроблені нові методи розв'язання нелінійних задач оптимального термінального, багатокритеріального та гарантовано-адаптивного керування траєкторним рухом літального апарата при виведенні у задані термінальні умови.

Автором розвинуто чисельно-аналітичний метод розв'язання нелінійних задач оптимального термінального керування траєкторним рухом літального

апарата завдяки застосуванню модифікованого методу диференціальних перетворень та удосконаленого дискретно-аналітичного відображення вихідних нелінійних математичних задач в область зображень з врахуванням багатоетапності траєкторного руху. Метод не потребує чисельного інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь, дозволяє отримати алгоритм керування в аналітичному вигляді, здійснювати оперативну оптимізацію керування та траєкторії руху та проводити моделювання динамічного процесу у реальному часі.

В роботі на базі удосконаленого дискретно-аналітичного відображення в область зображень нелінійних задач траєкторного руху літального апарата та модифікованого методу диференціальних перетворень, з використанням нелінійної схеми компромісів розроблено чисельно-аналітичний метод багатокритерійної оптимізації багатоетапного керування траєкторним рухом літальних апаратів. Запропонований підхід дає можливість спростити процес знаходження розв'язку нелінійної задачі оптимального керування та звести проблему векторної оптимізації до розв'язання скінченої системи нелінійних рівнянь відносно параметрів керування.

Новим є розроблений метод оптимізації гарантовано-адаптивного термінального керування рухом літальних апаратів при впливі невизначених збурень на базі удосконаленого дискретно-аналітичного відображення вихідної нелінійної математичної задачі в область зображень та модифікованого методу диференціальних перетворень. Запропонований метод ґрунтується на диференціально-ігровій моделі багатоетапного динамічного процесу, спрощує дискретно-аналітичне відображення нелінійної вихідної математичної моделі в область зображень, не потребує чисельного інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь руху, зводить проблему оптимізації до розв'язання скінченої системи рівнянь відносно параметрів керування та збурень та припускає аналітичний розв'язок задачі.

Отже, мета роботи, направлена на розвиток методів розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів на основі

диференціальних перетворень та їх застосування до оптимізації багатоетапного процесу виведення автономних безпілотних літальних апаратів у задані термінальні умови.

На основі виконаних розрахунків та проведених досліджень отримано такі нові результати.

Вперше:

1. Розроблено модифікований метод диференціальних перетворень (ММДП) для розв'язання класу задач, математичні моделі яких описуються нелінійними звичайними диференціальними рівняннями, завдяки сумісному використанню методу основних диференціальних перетворень, методу припасовування та застосуванні апроксимації нелінійних складових диференціальних рівнянь поліномами Адоміана. Метод відрізняється від відомого розширенням інтервалу розв'язку, спрощенням дискретно аналітичного відображення рівняння в область зображень 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.

2. Розроблено метод дискретно-аналітичного відображення в область зображень вихідної нелінійної математичної моделі руху ЛА при виведенні у задані термінальні умови, що базується на застосування модифікованого методу диференціальних перетворень. Відмінність полягає у спрощенні побудови спектральної моделі траєкторного руху та приведенні її до вигляду, зручного для оптимізації багатоетапного керованого процесу.

3. Розроблено чисельно-аналітичний метод багатокритеріальної оптимізації для розв'язання нелінійних задач синтезу оптимального багатоетапного керування рухом ЛА завдяки використанню удосконаленого дискретно-аналітичного відображення задачі та модифікованого методу диференціальних перетворень, з використанням нелінійної схеми компромісів. На відміну від відомих розроблених метод дає можливість спростити процес знаходження розв'язку нелінійної багатокритеріальної

задачі оптимального керування та звести проблему векторної оптимізації до розв'язання скінченної системи нелінійних рівнянь відносно параметрів керування.

4. Розроблено метод оптимізації гарантовано-адаптивного багатоетапного керування рухом ЛА при виведенні у задані термінальні умови при впливі невизначених збурень завдяки застосуванню удосконаленого дискретно-аналітичного відображення вихідної нелінійної математичної задачі в область зображень та модифікованого методу диференціальних перетворень. На відміну від відомих запропонований метод використовує диференціально-ігрову модель багатоетапного динамічного процесу, спрощує дискретно-аналітичне відображення вихідної математичної моделі в область зображень, не потребує чисельного інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь, зводить проблему синтезу до розв'язання скінченної системи нелінійних рівнянь відносно параметрів керування та збурень та припускає аналітичний розв'язок задачі.

Отримали подальший розвиток:

1. Метод розв'язання крайових задач, які описуються нелійними звичайними диференціальними рівняннями. На відміну від відомого, метод ґрунтується на базі модифікованого методу диференціальних перетворень та дозволяє спростити обчислення диференціальних зображень складних нелінійностей задачі, розширити інтервал та підвищити точність розв'язку.

2. Метод диференціальних перетворень в області застосування до розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом ЛА. Зокрема, розвинуті та розроблені нові методи розв'язання нелінійних задач оптимального термінального, багатокритеріального та гарантовано-адаптивного керування. Відмінність полягає у використанні модифікованого методу диференціальних перетворень, спрощенні розв'язання нелінійних задач оптимізації керованих процесів, можливості отримання розв'язку в аналітичній формі та здійснювати оперативний синтез керування.

Удосконалено:

1. Наукову та методичну базу для забезпечення розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом ЛА на основі математичного апарата диференціальних перетворень. Зокрема, розвинуті 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 руху ЛА. Відмінність полягає у підвищенні ефективності їх розв'язання завдяки відсутності необхідності чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, можливості отримання розв'язку в аналітичній формі та підвищенні його точності, спрощенні використання диференціальних перетворень для оперативної оптимізації керованих процесів.

2. Чисельно-аналітичний метод розв'язання нелінійних задач оптимізації термінального керування рухом літальних апаратів. На відміну від відомих, метод ґрунтується на удосконаленому дискретно-аналітичному відображенню нелінійних вихідних математичних задач в область зображень, модифікованому методі диференціальних перетворень та враховує багатоетапність траєкторного руху. Метод виключає необхідність чисельного інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь, дозволяє отримувати алгоритм керування в аналітичному вигляді, здійснювати оперативний синтез керування та проводити моделювання динамічного процесу у реальному часі.

Таким чином, запропоновані моделі, методи, методики і алгоритми забезпечують розвиток методів розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів на основі диференціальних перетворень та їх застосування до оптимізації багатоетапного процесу виведення автономних безпілотних літальних апаратів у задані термінальні умови.

Аргументування та критичне оцінювання порівняно з відомими рішеннями запропонованих автором нових рішень.

Сьогодні можливо визначити, що розробка та впровадження методології розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів на основі диференціальних перетворень є новим перспективним

науковим напрямом дослідження. Зараз працюють або готуються до розгортання різні підходи до оптимального управління рухом літальних апаратів.

Відомо, що створення гарантовано конкурентоздатних систем стабілізації руху складних багатовимірних об'єктів, у тому числі нестійких, з мінімальними витратами на проектування є однією з головних вимог досягнення успіху на ринку такого класу пристроїв. Одним з найбільш ефективних і перевірених шляхів виконання такої умови при створенні, зокрема, авіаційної та космічної техніки є застосування експериментально-аналітичного підходу до проектування оптимальних систем стабілізації складних об'єктів. Цей підхід передбачає виконання декількох взаємопов'язаних етапів проектувальних робіт: експериментальне дослідження динаміки векторів сигналів "вхід-вихід" моделі об'єкта управління в реальних умовах функціонування; виконання структурної та/або параметричної ідентифікації моделей динаміки рухомого об'єкта на основі одержаних характеристик векторів сигналів "вхід-вихід"; визначення оптимальної структури і параметрів багатовимірного регулятора на основі застосування сучасних методів синтезу оптимальних багатовимірних систем стабілізації до результатів ідентифікації моделі об'єкта управління; аналіз границь якості стабілізації математичної моделі об'єкта, який входить до складу оптимальної системи стабілізації, в реальних умовах функціонування; розробка технічної пропозиції на створення нової або на модернізацію існуючої системи стабілізації багатовимірного рухомого об'єкта управління.

Успішне застосування такого підходу визначається, з одного боку, відповідністю алгоритмів ідентифікації, синтезу і аналізу моделі до реальних умов функціонування об'єктів управління і особливостей їх динаміки, а з другого боку – наявністю системи комп'ютерної математики, зокрема MatLab, яка дозволяє застосувати синтезовані алгоритми для автоматизованого проектування оптимальних систем автоматичного управління.

Проблеми проектування, аналізу, синтезу та оптимізації руху космічних об'єктів, їх оптимального управління та імітаційного моделювання, вимірювання параметрів і обробки сигналів вирішує багато наукових колективів і окремих вчених як в нашій країні, так і за кордоном. Широко відомі роботи В. Азарскова, Б. Банді, Л. Блохіна, В. Волосова, В. Зубова, В. Ігнатова, І. Куценка, В. Кунцевича, В. Ларіна, Д. Лебедева, О. Летова, І. Прокопенка, В. Синєглозова, А. Туніка, О. Ткаченка, В. Харченка, О. Яковлева, S. Barnett, S. Dodds, R. Kalman, V. Klein, Y. Ku, R. Moore, A. Walleer та багатьох інших. Проблема оптимальної стабілізації та керування (управління) системами (об'єктами) виникає при обмежених енергетичних ресурсах, коли реалізація управління певної потужності, необхідної для переведення об'єкта з однієї точки простору в іншу або, зокрема, для точної стабілізації системи, виявляється неможливою. При цьому доводиться миритися або із залишковими похибками стабілізації, або з переходом об'єкта не в задану точку, а в її приблизний окіл. Проблема забезпечення найкоротшого шляху чи найменшого часу реалізації руху об'єкта принципово не відрізняється від проблеми з його обмеженою енергетикою: в усіх задачах оптимізації кількісна характеристика ступеня досягнення чи встановлення компромісу між енергетичними витратами і величинами залишкових похибок у системі неможлива без критерію якості, найчастіше інтегрального квадратичного, мінімум якого й повинне забезпечувати оптимальне управління – найкраще для заданого критерію. Методи жорсткого синтезу нелінійних систем стабілізації були запропоновані С.М. Онищенком на початку 90-х років минулого сторіччя, але оптимізація синтезованого ним закону управління не була реалізована. Тому дослідження цього питання давно назріло і є актуальним.

Дослідження нелінійних систем є однією з найактуальніших задач техніки та теорії регулювання. Відмітимо декілька обставин, які призводять до необхідності розгляду нелінійних систем.

Регулятори та об'єкти регулювання, як правило, нелінійні. Їх лінеаризація допустима лише при початковому (приблизному) розгляді й часто не відображає суттєвих особливостей системи. Наприклад, розрахунок стійкості автомата стабілізації кутового руху ракети з лінійним законом корекції проводиться в рамках лінійної теорії. При цьому нелінійності сервоприводу вважаються малими і не враховуються. Однак добре відомо, що ці нелінійності породжують автоколивання на частоті, близькій до частоти зрізу частотної характеристики розімкнутої системи. Це означає, що система, яка розглядається, є нелінійною, оскільки в лінійній системі автоколивань не буває в принципі. До того ж, автоколивання, які виникають в цій системі, становлять нормальний експлуатаційний режим і дозволяють технічно реалізовувати автоматичне налаштування коефіцієнта підсилення. При високих вимогах до точності керування об'єктом із суттєво змінними параметрами виявляється досить ефективним використання нелінійних коректуючих пристроїв. В цьому випадку використання релейних систем, систем зі змінною структурою, систем із самоналаштуванням коефіцієнта підсилення є важливим засобом стабілізації літальних апаратів в умовах швидкої зміни висоти та швидкості польоту. Часто керування складними системами реалізується введенням в контур керування цифрового комп'ютера. Однак комп'ютер може працювати лише із сигналами, квантованими за рівнем і часом. Отже, наявність комп'ютера в контурі керування викликає появу нелінійностей, які враховують квантування за рівнем на вході та виході комп'ютера. Математичною моделлю нелінійних механічних систем є нелінійне звичайне диференціальне рівняння (або система таких рівнянь). Їх дослідження чисельними методами в принципі не можуть забезпечити розв'язання таких необхідних для інженера задач, як виявлення загальних якісних закономірностей системи, її фізичних характеристик та врахувати вплив параметрів і структури керуючого пристрою на процес регулювання і на поведінку об'єкта. Усі нелінійні об'єкти, як правило, нестійкі – будь-яке їх відхилення від положення

рівноваги призводить до неповернення у вихідне положення, тому важливо зробити об'єкт стійким, використовуючи систему стабілізації. Розв'язання цієї задачі забезпечується побудовою спеціального стабілізуючого регулятора у зворотному зв'язку. Його синтез традиційно реалізується з використанням другого (або його ще називають прямим) метода Ляпунова. Та до 90-х років минулого сторіччя вирішення цієї проблеми все ж було можливе на трьох напрямках: монотонна стабілізація; асимптотичне лінійне наближення; стабілізація за лінійним наближенням.

Проблема стабілізації нелінійних систем, що вирішується з використанням прямого методу Ляпунова, приводить для систем, які подані у псевдолінійній формі, до матричного рівняння Ляпунова, з якого треба визначити дві матриці – матрицю управління і матрицю коефіцієнтів квадратичної форми – функції Ляпунова. Ця, здавалося б погано обумовлена задача, розв'язується чотирма можливими шляхами: монотонна стабілізація; асимптотичне стійке лінійного наближення; стабілізація за лінійним наближенням; оптимальна стабілізація;

Рух багатьох літальних апаратів, таких як ракети-носії, авіаційно-космічні системи, аеростатичні літальні апарати та ін. є багаторежимним. Це пов'язано з умовами їх експлуатації. Так, процес керованого виведення на орбіту ракети-носія або орбітального ступеня авіаційно-космічної системи характеризується різними режимами роботи двигунної установки ступенів і стрибкоподібною зміною маси в моменти відділення ступенів та скидання головного обтічника. Крім того, на кожному етапі виведення необхідно враховувати наявність різних обмежень на теплове навантаження та аеродинамічні перевантаження, дію збурень навколишнього середовища, тощо. Процес керування рухом аеростатичного літального апарата характеризується різними режимами керування балонетами (впуск та випуск повітря) та газовими клапанами, вектором тяги двигунів та аеродинамічними органами управління, практично стрибкоподібною зміною маси апарату під час скидання баласту. Іншою особливістю руху аеростатичних літальних

апаратів є наявність обмежень на параметри руху в процесі виконання зльоту та посадки. Багаторежимність руху літальних апаратів призводить до необхідності побудови їх системи керування з найбільш повним урахуванням особливостей експлуатації. Оптимізація багаторежимного руху літального апарату дозволяє реалізувати його максимально можливі льотні характеристики, сприяє підвищенню надійності польоту внаслідок підвищення стійкості алгоритмів керування до зовнішніх збурень. Синтез алгоритмів керування багаторежимних літальних апаратів в умовах дії збурень є складною проблемою. Високий порядок нелінійних диференціальних рівнянь просторового руху літальних апаратів, зміна в широкому діапазоні масово-інерційних характеристик ускладнюють розв'язання цієї проблеми. При цьому, звичайно відсутня апріорна інформація відносно компонентів зовнішніх збурень. В той же час, високі вимоги до термінальних параметрів при виведенні на орбіту ракет-носіїв та авіаційно-космічних систем, значна тривалість польоту літаків та аеростатичних літальних апаратів вимагають врахування впливу збурень на досягнення цілей керування. Одним з способів розкриття невизначеності, пов'язаної з непередбаченою дією зовнішніх збурень, є застосування концепції гарантовано-адаптивного підходу до синтезу алгоритмів керування траєкторним рухом літальних апаратів. Ця концепція використовує принцип максимального гарантованого результату, тому що процес керування розглядається при найбільш несприятливих умовах, які можуть мати місце при впливі збурень. Задача синтезу гарантованого керування у невизначених умовах впливу збурень вимагає переходу від задач оптимізації до задач двобічної оптимізації, які розглядаються в теорії диференціальних ігор (Айзекс, Р. Дифференциальные игры.– М.: Мир, 1967. – 479 с.). В таких умовах доцільно розглядати задачу термінального керування у формі математичної моделі диференціальної гри двох гравців. Перший гравець формує керування літальним апаратом, а вектор збурень формується цілеспрямовано другим гравцем. Цілі управління першого та другого гравців

є протилежними. Завдання першого гравця полягає у переводі літального апарату з початкового стану у задане кінцеве, при якому мінімізується критерій якості керування за умови максимізації його з боку другого гравця. Ігровий підхід гарантує досягнення термінальних умов при будь-яких допустимих реалізацій вектора збурень, так як синтез алгоритмів термінального керування орієнтований на найбільш не-сприятливі умови дії збурень. Відомий підхід до синтезу алгоритмів термінального керування динамічних об'єктів в умовах дії збурень на основі диференціальних перетворень моделі диференціальної гри (Моделирование игровых алгоритмов терминального управления динамическими объектами / В.Л. Баранов, О.С. Урусский, Г.Л. Баранов, Е.Ю. Комаренко // Электронное моделирование. –1996. – Т.18, №2. – С. 75–81). Метод не вимагає для своєї реалізації чисельного інтегрування диференціальних рівнянь руху динамічного об'єкту, використовує математичний апарат диференціальних перетворень функцій та рівнянь (Пухов Г.Е. Дифференциальные спектры и модели. – К.: Наукова думка, 1990. – 184 с.).

При цьому, задача синтезу оптимального адаптивного алгоритму зводиться до рішення системи нелінійних рівнянь відносно його вільних параметрів (Баранов, В.Л. Моделирование задач терминального управления методом дифференциальных пре-образований [Текст] / В.Л. Баранов, О.С. Урусский, Г.Л. Баранов // Электронное моделирование. – 1995. – Т.17, No2. – С. 12–16.).

Запропоновано підхід до синтезу гарантовано-адаптивних алгоритмів керування рухом багаторежимних динамічних об'єктів на основі математичного апарату диференціальної гри для випадку відсутності апріорної інформації про стохастичні характеристики дії збурень. Даний підхід формалізовано у вигляді відповідної математичної моделі. Основною перевагою запропонованого методу полягає в аналітичних перетвореннях, які дозволяють істотно зменшити об'єм обчислень для отримання рішень у числовій формі. Це дозволяє проводити безперервні обчислення програмних

стратегій гравців у реальному масштабі часу та отримати керування багаторежимним динамічним об'єктом із зворотнім зв'язком, що враховує дію різних збурень.

Перспективи застосування імітаційного моделювання в задачах автоматизації та управлінні технологічними системами розглянуто в працях Лопаткіна Р.Ю., Петрова С.А., Ігнатенка С.Н., Іваненка В.А. (Вісник НТУ "ХПІ". Механіко-технологічні системи та комплекси. Харків: НТУ "ХПІ", 2016, №17(1189), С.61-71. УДК 004.94; 519.876). В їх працях розглядаються фундаментальні аспекти застосування імітаційного моделювання в задачах автоматизації і керуванням технічними системами і комплексами, а також розглянуто та проаналізовано стандарти та протоколи побудови подібних систем. Досліджено питання розвитку систем імітаційного моделювання в розрізі розвитку науки в галузі синтезу інформаційних систем, структурного проектування та зв'язку з системами штучного інтелекту. Визначені принципові характеристики систем імітаційного моделювання а також обґрунтовується перспектива застосування розподілених систем на базі мультиагентного підходу що масштабується.

В працях Хацька Н.Є. (Розв'язання термінальної задачі управління з виристанням інформації інерціального блока. Хацько Н.Є. // Радіоелектроніка, інформатика, управління. Запоріжжя: Запорізький нац. техн. ун-т, 2016, №1(36), С.101-107. -рос. УДК 629.7) розглянуто задачу термінального управління літальним апаратом за інформацією безплатформеної інерціальної навігаційної системи, в якій за заданий час потрібно перевести апарат у задане просторове положення з необхідним значенням вектора кінцевої швидкості. Побудовано програмне управління для незбуреного руху літального апарата. Синтезовано функцію управління літального апарату за поточним значенням його вектора стану, визначеного інерціальним навігаційним блоком. Отримано вирази для оцінки точності вирішення термінальної задачі з урахуванням похибки акселерометра. Проаналізовано точність виведення літального апарату в кінцеву точку

замкненою системою управління при використанні інформації від інерціальних датчиків з відомим рівнем похибок. На прикладі спрощеної моделі проведено комп'ютерне моделювання руху літального апарату. Доведено, що точність приведення вектора стану в задану кінцеву точку залежить від рівня збурень і похибки вхідної інформації. Проведено чисельні експерименти, що дозволяють виявити вплив чисельного значення глибини прогнозу, використаного в синтезі управління за методом переслідування провідною точки, на точність рішення термінальної задачі. Сформульовано рекомендації для проектування алгоритмів автоматичного управління рухом в комплексі з проектуванням інформаційно-вимірювальної системи.

Структурний синтез регуляторів дискретних систем керування розглядали Кадирова Д.Р., Кадирова А.А. В їх працях запропоновано методику розрахунку цифрових регуляторів дискретних систем керування за допомогою динамічних графових моделей процесів. Пропонований метод моделювання дозволяє знайти шляхи для вирішення задач синтезу дискретних систем різної складності: одномірних і багатомірних, стаціонарних і нестаціонарних, з нестандартним режимом роботи імпульсних елементів та ін. Вирішення задач аналізу і синтезу складних систем керування класичними методами виявляється часто неможливим через обчислювальні труднощі. Застосування графових моделей дозволяє виконати чітку і строгу формалізацію й автоматизацію обчислювальних процедур. Використовується фундаментальна властивість дискретних систем, а саме, здатність до природної декомпозиції і структуризації. Будь-які дискретні елементи у складі систем керування розглядаються не тільки як джерела дискретизації сигналів, але і як джерела дискретизації структури системи. Відомий запропонований метод дозволяє синтезувати закони керування за обраними критеріями оптимальності і максимально близько враховувати характеристики і властивості реальних об'єктів керування.

Порівняння багатомодельних методів ідентифікації у задачі ідентифікації нелінійних динамічних систем розглядали Гуда А.І., Михальов

П.І. (Радіоелектроніка, інформатика, управління. Запоріжжя: Запорізький нац. техн. ун-т, 2016, №4(39), С.112-120. -англ. УДК 681.5.015) Вони розглянули кілька методів ідентифікації для нелінійних(можливо хаотичних) динамічних систем. Переваги і недоліки існуючих методів згадуються. Всі методи використовують множину моделей. Пропонуються різні тактики для руху параметрів моделі з метою розв'язання задачі ідентифікації. Найпростіша тактика використовує моделі з фіксованими параметрами. Цей метод має просту реалізацію, забезпечують найкращу швидкість ідентифікації і гіршу точність. Метод з моделями з обмеженою смугою пошуку дозволяє домогтися більшої точності, завдяки використанню моделей, які налаштовують свій параметр в значення локального максимуму, але схилено до високочастотним коливанням через ігнорування динаміки самої системи ідентифікації. Підхід з моделями, чий рух імітує рух тіла під дією зовнішніх сил і в'язкого тертя демонструє мінімальні помилки ідентифікації і значну швидкість.

Питання оптимізації фільтрів власного руху самоналагоджувальної САУ об'єктом технологічного типу розглянуто Хобіним В.А., Левінским М.В. (Радіоелектроніка, інформатика, управління. Запоріжжя: Запорізький нац. техн. ун-т, 2016, №4(39), С.120-129. -рос. УДК 62-503.57). Було визначено, що технологічні процеси як об'єкти керування характеризуються істотним запізненням реакції керованих змінних на керуючі впливи і великою кількістю мінливих факторів, які впливають на процес, але практично недоступні для виміру. Ці особливості на практиці часто приводять до істотного погіршення роботи систем керування з типовими алгоритмами й суттєво ускладнюють побудову самоналагоджувальних систем керування для даного типу об'єктів. Фактори, залежно від наслідків їх прояву на об'єкті керування, підрозділяють на неконтрольовані координатні й параметричні збурення. У статті розглядається випадок, коли спектральний склад параметричних збурень є суттєво більш низькочастотним у порівнянні зі спектральним складом координатних збурень. Фактори, що викликають

високочастотні зміни керованих змінних, які не можуть бути скомпенсовані керуючими впливами, розглядаються як шуми. Для об'єктів технологічного типу, у яких параметричні збурення викликають зміни коефіцієнта передачі, запропонована структура самоналагоджувальної системи автоматичного керування. На відміну від багатьох відомих, принцип її роботи припускає пасивну ідентифікацію змін коефіцієнта передачі в замкнутому контурі. Із загального руху замкнутої системи, який виникає під впливом координатних збурень, за допомогою смугових фільтрів виділяється складова власного руху. По змінах у спектрі цієї складової контур самоналагодження визначає поточні значення коефіцієнта передачі об'єкта керування й змінює коефіцієнт передачі регулятора системи стабілізації для збереження стійкої її роботи. Проведені комп'ютерні експерименти по оцінці впливу змін спектрального складу координатних збурень і шумів на якість самоналагодження, показана можливість проведення оптимального параметричного синтезу системи, запропоновані рекомендації з наближеного визначення параметрів контуру самоналагодження.

Аналітичне конструювання оптимальних систем управління рухом лінійного об'єкта по заданій траєкторії при стохастичних впливах розглянуто в працях вчених: Блохін Л.М., Осадчий С.І., Калич В.М., Кочерженко Ю.М. (Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. Одеса: Одеська національна академія харчових технологій, 2016, №1, т.8, С.4-12. -рос. УДК 681.51.011). В їх працях розроблено новий метод розрахунку матриць передавальних функцій трактів керування оптимального багатовимірного регулятора. Регулятор призначений для максимізації точності переходу лінійного багатовимірного об'єкта управління з одного сталого режиму в інший. Передбачається що на об'єкт управління діють обурення, а датчики вимірювальної інформації мають інерцією і перешкодами. Як обурення, так і перешкоди представляють собою адитивну комбінацію регулярних і випадкових складових. Випадкові складові обмежені класом взаємопов'язаних стаціонарних процесів з дрібно-раціональними матрицями

спектральних густин. В основу розробки методу покладена постановка задачі синтезу з використанням нової структурної схеми системи управління, отриманої з урахуванням результатів атестації динаміки датчиків. Синтез регулятора здійснюється в частотній області методом Вінера-Колмогорова. Отриманий в результаті рішення задачі синтезу новий алгоритм дозволяє знайти матриці передавальних функцій регулятора, які забезпечують мінімум відповідних квадратичних критеріїв якості. Перший з них являє суму певним чином зважених інтегральних квадратичних відхилень регулярних помилки проходження об'єкта по траєкторії і сигналу управління. Другий критерій представляє суму зважених дисперсій випадкових складових помилки і сигналу управління. Для використання запропонованого алгоритму необхідно виконати операції винеровської факторизації і сепарації дрібно-раціональних матриць. Відповідні функції містяться в вільно розповсюджується пакеті програм SciLab.28.17.07.0146 / 207068.

А Кухарський (irbis-nbuv.gov.ua) запропонував неявну обчислювальну схему інтегрування диференційних рівнянь балістичного руху космічного апарату на основі зміщених диференціальних перетворень з використанням ступеневих функцій. Запропонована схема враховує особливості диференційних рівнянь балістичного руху космічного апарату, що дозволяє ефективно використовувати її на практиці.

Математичні моделі і методи комп'ютерного керування електропостачанням залізниць на основі диференціальних перетворень Пухова розглядали Стасюк, О.І., Гончарова, Л.Л. В їх працях наведено результати аналізу сучасного стану наукових досліджень в області інтелектуалізації електричних мереж залізниць. Показано, що актуальною проблемою є створення математичних моделей і методів формування нових знань шляхом підвищення рівня інформативності первинних даних. На основі математичного апарату диференціальних перетворень розроблено математичні моделі для покращення рівня інформативності даних, отриманих при реєстрації аномальних режимів систем електропостачання.

Запропоновано комп'ютерно-орієнтовані методи організації інтелектуального обчислювального процесу з використанням диференціальних зображень для проведення спектрального і кореляційного аналізу первинної інформації.

В теперішній час найбільш поширеними чисельними методами для вирішення балістичних задач в даний час є метод Адамса 7-го порядку і метод Рунге-Кутта 4-го порядку (Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений.– М.: Сов. радио, 1978. – 384 с.).

Обчислювальні алгоритми чисельного рішення при реалізації цих методів, виходячи з їх основних математичних властивостей, мають комбіновану структуру, знижує їх гнучкість при (приспособленості до) розв'язку різнопланових завдань (Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: Учеб. пособие для вузов. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. – 432 с.). Так, для початку розрахунку методом Адамса необхідно задати значення параметрів руху космічного апарату в 7-ми початкових точках (вузлах обчислювальної мережі), що, як правило, проводиться методом Рунге-Кутта, а для реалізації методом Адамса обчислювального алгоритму з адаптивним кроком, або отримання розв'язку в проміжних між вузлами обчислювальної мережі точках необхідно застосовувати процедури інтерполяції. Позбутися вищенаведених недоліків традиційних чисельних методів при розв'язку балістичних задач вдається за допомогою математичного апарату диференціальних перетворень (Баранов Г.Л., Баранов В.Л., Жуков І.А., Алексеева Л.О. Диференціальні перетворення для комп'ютерного моделювання: Навчальний посібник. – К.: Національний авіаційний університет, 2002. – 106с.). Диференціальні перетворення вже застосовувалися до вирішення завдання інтегрування, але вони використовувалися в найпростішому варіанті - прямі диференційно-тейлорівські перетворення (Ковбасюк С.В., Ракушев М.Ю. Прогнозирование неуправляемого движения космического аппарата методом дифференциальных преобразований// Двойные технологии. – 2003. – No 4. –

С. 16–20.). Натомість відомі й інші, більш ефективні, з обчислювальної точки зору, види диференціальних перетворень - зміщені диференціальні перетворення. Зміщені диференціальні перетворення є найсучаснішим, і по тому ще недостатньо поширеним, видом диференціальних перетворень. Вони розроблені на базі диференційно-тейлорівських перетворень і дозволяють досягти значного зменшення похибки апроксимації (невязка) результуючого обчислювального алгоритму на цьому розв'язку диференціального рівняння (Фролова О.Г. Моделювання оптимальних процесів керування зміщеними диференціальними перетвореннями // Вісник ЖІТІ. – 2001. – № 18. – С. 155–160.). Так, з використанням диференційно-тейлорівських перетворень неузгодженість виникає за рахунок відкидання (неврахування) відрізка з останніх членів ряду Тейлора, а з використанням зміщених перетворень її вдається істотно знизити за рахунок взаємного компенсації відкинутих відрізків ряду Тейлора в прямій і зворотній моделях.

Сучасний рівень комп'ютеризації систем автоматичного керування визначається розв'язуються поточними завданнями, які і визначають можливості і потреби в комп'ютерній техніці. До поширених завдань відносяться: проектування установок (при цьому широко відомий важливий недолік дорогих автоматизованих систем проектування через відсутність достатнього набору засобів модельної підтримки); обробка результатів випробувань (виконується автономними засобами); супровід результатів профілактики; реєстрація результатів вимірювань в контрольних точках при діагностиці та контролі; забезпечення процесів управління (використовуються регулятори, наприклад ПІД-регулятори, які не враховують властивості об'єкта). Таким чином, клас задач, які вирішуються комп'ютером, є досить обмеженим, має обмежену складність, і не забезпечує в повному обсязі рішення задач спостереження та керування режимами функціонування систем автоматичного керування. Разом з тим, сучасні тенденції даного напрямку розвитку систем автоматичного керування передбачають рішення саме цих завдань. Комп'ютерно-інтегровані системи з

необхідними властивостями повинні задовольняти принципом «Full responsibility systems» (системи з повною відповідальністю). Створення таких систем з урахуванням комп'ютерно-інтегрованого виконання з властивими їм обмеженнями на ресурси вимагає вирішення нових проблем побудови математичних моделей динаміки установки, підсистем управління і діагностики, що забезпечують ефективне функціонування систем автоматичного керування. Рішення даних проблем вимагає проведення фундаментальних досліджень в області процесів моделювання, управління, діагностики, алгоритмічного і програмного забезпечення. Задоволення зазначених вимог призводить до гострої необхідності розробки адаптаційних методів моделювання та забезпечення процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем з використанням процесів оптимізації. Існуючі наукові досягнення в галузі математичного моделювання динамічних систем, в основному, базуються на застосуванні апарату диференціальних рівнянь. На основі цього підходу створено і активно застосовується чимало методів і засобів комп'ютерного моделювання. Однак, такий підхід може мати деякі обмеження. Серед них можна виділити питання забезпечення стійкості обчислювального процесу при наявності значних рівнів високочастотних спектрів шумів в вихідних даних, поширений прояв ефекту Гіббса при моделюванні об'єктів з розподіленими параметрами, обмежене застосування традиційних (не адаптованих) алгоритмів і ін. Для вирішення зазначених питань необхідно на додаток до існуючим, створювати нові способи побудови і числової реалізації математичних моделей. Ефективним кроком в цьому напрямку є використання інтегральних операторів і рівнянь. Такий вибір обумовлений тим, що інтегральні моделі мають ряд позитивних властивостей, зокрема високою універсальністю (структура моделі є незмінною для різних класів динамічних об'єктів, а властивості задаються однією функцією - ядро інтегрального оператора), потенційно високою адекватністю процесів моделювання, властивістю згладжування при виконанні обчислень і використанні в реальних системах зі значним рівнем

спектрів високочастотних шумів, високою стійкістю обчислювальних процесів, можливістю ефективного побудови моделі за експериментальними даними тощо. Разом з тим, використання інтегральних моделей має ряд особливостей, облік яких вимагає проведення ряду теоретичних і практичних досліджень і розробок.

Зокрема, це стосується проблеми отримання еквівалентних інтегральних моделей на основі відомої диференціальної моделі, оскільки значна частина фізичних законів записується в диференціальній формі. Насичення установок вбудованими комп'ютерними засобами дозволяє вирішувати комплекс зазначених завдань і забезпечення інтелектуальних функцій. Поява можливості вирішення складних і специфічних завдань обумовлює необхідність розробки ефективних математичних і комп'ютерних моделей даного класу об'єктів. Ця обставина породжує таку вимогу до комп'ютерних моделей, як здатність роботи в реальному часі при обмежених обчислювальних ресурсах. Отже, для вирішення завдань проектування, управління, контролю, діагностики виникає необхідність розкладання методів і засобів математичного і комп'ютерного моделювання таких систем і їх складових елементів, які здатні враховувати зазначені особливості. Аналіз публікацій в напрямку створення таких методів свідчить про існування певних позитивних тенденцій, але вирішення проблеми в цілому не можна вважати завершеним. Відмінною особливістю технічних комп'ютерно-інтегрованих систем є різноманітність елементів, що входять до складу фізичної частини, що породжує неоднорідність в математичному описі системи та надає відповідні особливості методів і засобів математичного моделювання, створюються. Таким чином, в зв'язку з інтенсивним якісним розвитком, ускладненням структур і істотним розширенням сфери застосування комп'ютерно-інтегрованих систем актуальна науково-технічна проблема створення адаптаційних методів і засобів математичного і комп'ютерного моделювання процесів їх функціонування для дослідження і забезпечення якісних показників зазначеного класу систем, ефективного

вирішення задач аналізу, синтезу і побудови засобів управління і діагностики з урахуванням обмежень до інформаційних ресурсів. Ефективне вирішення зазначеної проблеми може досягатися шляхом розширення класу математичних моделей для врахування особливостей окремих типів ланок систем, що моделюються, в тому числі із залученням інтегральних динамічних моделей і макромоделей, створення і застосування методів еквівалентних і апроксимаційних перетворень моделей, отримання та застосування швидкодіючих алгоритмів для реалізації динамічних моделей, підвищення рівня адекватності відтворення процесів як в окремих ланках, так і в цілому в системі, структурно-алгоритмічної організації програмних засобів комп'ютерного моделювання. Облік особливостей комп'ютерно-інтегрованих систем призводить до необхідності надання методам і засобам моделювання адаптувань можливостей. Для вирішення зазначеної проблеми доцільно структурно-орієнтований підхід в моделюванні, на якому традиційно ґрунтуються дослідження і інженерні розробки при створенні сучасної техніки, який є основою для створення нових методів математичного моделювання з використанням принципу декомпозиції, а також засобів комп'ютерного моделювання шляхом організації сучасних моделюючих програмних комплексів. Підхід дозволяє використовувати, в тому числі одночасно, різні види динамічних моделей, створювати розгалужене алгоритмічне забезпечення з можливістю розробки і застосування відповідного набору програмних модулів, використовувати опис модельованої в природний і зручний для розробника графічний форми.

Поява можливості вирішення складних і специфічних завдань обумовлює необхідність розробки ефективних математичних і комп'ютерних моделей даного класу об'єктів. Ця обставина породжує таку вимогу до комп'ютерних моделей, як здатність роботи в реальному часі при обмежених обчислювальних ресурсах. Отже, для вирішення завдань проектування, управління, контролю, діагностики виникає необхідність розкладання методів і засобів математичного і комп'ютерного моделювання таких систем і

їх складових елементів, які здатні враховувати зазначені особливості. Аналіз публікацій в напрямку створення таких методів свідчить про існування певних тенденцій, але вирішення проблеми в цілому не можна вважати завершеним. До Найбільш відомих центрів, що здійснюють розробки в цьому напрямі, відносяться підрозділи провідних світових фірм: "Дженерал Електрик", "Сіменс", "Елекрісіте де Франс", "Вестінгауз", "Бабкок", "Тошиба", "Хітачі". В Україні подібними роботами займаються в СКТБ ВАТ "Турбоатом", ДП "Івченко-Прогрес", ВАТ "Мотор-Січ", ВАТ Мінпромполітики України "Елемент", ДП НВКГ «Зоря» - «Машпроект». Відмінною особливістю технічних комп'ютерно-інтегрованих систем є різноманітності елементів, що входять до складу фізичної частини, що породжує неоднорідність в математичному описі системи, що надає відповідні особливості методам і засобам математичного моделювання. створюються.

Для вирішення зазначеної проблеми доцільно застосування структурно-орієнтованого підходу в моделюванні, на якому традиційно ґрунтуються дослідження і інженерні розробки при створення зразків нової техніки, і Який є основою для створення нових методів математичного моделювання з впровадженням принципу декомпозиції, а також засобів комп'ютерних моделювання шляхом організації сучасних моделює програмних комплексів. Підхід дозволяє використовувати, в тому числі одночасно, різні види динамічних моделей, створювати розгалуженої алгоритмічне забезпечення з можливістю розробки і застосування відповідного набору програмних модулів, використовувати опис модельованої в природний і зручною для розробника графічній формі. Істотний внесок в проблему створення методів і засобів математичного моделювання процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем внесли результати робіт Бублика Б.М., Верланя А.Ф., Гаращенко Ф.Г., Горбаня А.В., Дячук А.А. , Жученко А.І., Євдокимова В.Ф., Задири В.К., Іванова В.В., Кветний Р.Н. , КіріченкаМ.Ф., Кисельова Н.В., Клепікова В.Б., Кубрака А.І., Лозинського А.Ю., Мороза В.І., Москвіною

С.М., Святного В.А., Стахіва П. В. Г., Федорчука В.А., Химича А.Н., Ali-Zade P.G., Baker С.Н., Bird J., Cinlar E., Harvill Lawrence R., Hoffman J.D., Lyshevski S.E., Moon F.C. та ін.

Методи розв'язання некоректних задач на основі багатокритеріальної оптимізації і диференціальних перетворень для автоматизованих систем управління розглянуто в працях Засядько А.А. В її працях вперше розроблені нові методи розв'язання некоректних задач для інформаційного і математичного забезпечення автоматизованих систем управління за допомогою багатокритеріальної оптимізації і диференціальних перетворень, що дає можливість підвищити якість інформації про стан об'єктів автоматизованих систем управління. Удосконалено метод відновлення інформації, який відрізняється від відомих застосувань багатокритеріальної оптимізації за нелінійною схемою компромісів, що дає можливість знизити похибку відновлення інформації. Уперше розроблена диференціально-тейлорівська модель процесу відновлення сигналів для контролю стану об'єктів автоматизованих систем управління, у яких відсутня методична похибка і неперервний аргумент в області зображень, що дозволяє моделювати процес відновлення інформації про стан об'єктів автоматизованих систем управління у реальному часі. Уперше розроблений метод розв'язання некоректних задач в області зміщених диференціальних перетворень інформації, що дозволяє отримати прості і швидкі алгоритми обробки інформації про стан об'єктів автоматизованих систем управління. Уперше запропонований метод процесу відновлення інформації про стан об'єктів автоматизованих систем управління, що відрізняється від відомих спільним застосуванням багатокритеріальної оптимізації і зміщених диференціальних перетворень інформації, що дало можливість знизити похибку і спростити процес відновлення інформації про стан об'єктів автоматизованих систем управління в умовах невизначеності та збурень. Уперше розроблений за допомогою нелінійної схеми компромісів метод багатокритеріальної оптимізації для розв'язання некоректних задач

оптимального планування, що відрізняється від відомих узгодженою оптимізацією похибки розв'язання і стійкості методу з урахуванням обмежень на частинні критерії якості, що дає можливість знизити розмірність некоректних задач оптимального планування. Уперше розроблений комбінований метод моніторингу параметрів рухомих об'єктів, який відрізняється від відомих застосуванням диференціальних перетворень і багатокритеріальної оптимізації за нелінійною схемою компромісів, що дозволяє розширити діапазон прогнозування параметрів руху.

Засядько А.А. обґрунтувала, що науково-технічний прогрес в області керування транспортними процесами вимагає створення складних автоматизованих систем управління. Незалежно від призначення автоматизованих систем управління і виду транспорту (авіаційного, автомобільного, залізничного, водного, морського) процес управління вміщує в собі наступні етапи: збір первинної інформації про стан об'єкта або процесу керування; обробка первинної інформації з метою підвищення її достовірності; прийняття рішення про керуючі дії на об'єкт або процес керування; реалізація прийнятого рішення шляхом дії на керований об'єкт або процес.

Ефективність автоматизованої системи управління безпосередньо залежить від завчасності і точності керуючих дій, які формуються на основі первинної інформації про стан об'єкта або процесу керування. В умовах невизначеності отримуваної інформації вплив достовірності первинної інформації про стан об'єкта або процесу керування на ефективність автоматизованих систем управління істотно зростає. Тому першочерговою задачею для автоматизованих систем управління, які діють в умовах невизначеності первинної інформації, є розробка методів перетворення і відновлення інформації. Така задача розв'язується в сучасних автоматизованих системах управління в рамках їхнього інформаційного і математичного забезпечення.

Розв'язання задач пошуку шляхів підвищення ефективності автоматизованих систем управління стало можливим завдяки розвитку засобів обчислювальної техніки, інформаційних технологій, методів системного аналізу, зокрема математичного моделювання і теорії оптимізації. Вирішенню цих проблем присвячені роботи Глушкова В.М., Скуріхіна В.І., Пухова Г.Є., Павлова О.А., Васильєва В.В., Вороніна А.М., Левковця П.Р., Беляєвського Л.С., Стасюка О.І., Баранова Г.Л., Баранова В.Л., Карандакова Г.В., Ігнатенка О.С., Тимченка А.А.

Підвищення ефективності використання транспортних ресурсів приводить до необхідності розглядати некоректні задачі контролю, оптимізації і прогнозування стану транспортних засобів в умовах невизначеності. З 60-тих років ХХ ст. і дотепер розроблений широкий спектр різних підходів до розв'язання некоректних задач. Основою для досліджень в даній області є праці наукової школи А.М. Тихонова, яка створила математичну теорію некоректно поставлених задач. Вона представлена методом регуляризації А.М. Тихонова, методом заміни М.М. Лаврентьєва, методом підбору і квазірозв'язку В.К. Іванова та іншими методами. Розроблені також методи ітеративної, статистичної, локальної, дискриптивної регуляризації, субоптимальної фільтрації, розв'язання на компактi та ін. Іноземні розробки представлені методами оптимальної фільтрації Калмана-Б'юсі і Вінера, методами керованої лінійної фільтрації (Бейкуса-Гільберта) та ін. Хоча ці методи є в принципі більш точними, але методи, запропоновані радянськими вченими (в першу чергу, метод регуляризації Тихонова) вимагають набагато менше додаткової інформації про розв'язок і тому знаходять більш широке застосування при розв'язанні некоректних задач.

Питання моделювання та оптимізації динамічних об'єктів і процесів на основі зміщених диференціальних перетворень розглянуто в працях Фролової О.Г. Було визначено, що потреба у розв'язку задач моделювання та оптимізації динамічних об'єктів і процесів виникає у багатьох областях науки

та техніки. Такі задачі мають місце при керуванні різноманітними видами транспорту, аерокосмічними та аеродинамічними об'єктами, сільськогосподарськими машинно-тракторними агрегатами у системах “точного землеробства”, під час керування швидкоплинними фізичними процесами тощо. Моделювання та оптимізація керування рухом динамічних об'єктів і процесів розглядалися також у працях Понтрягіна Л.С., Беллмана Р., Сейджа Е.П., Кротова В.Ф., Красовського А.А., Шушляпіна Є.А. та інших. До задач оптимального керування динамічними об'єктами і процесами ставиться вимога моделювання та оптимізації у реальному часі, а також у прискореному часі з метою запобігання зіткнень рухомих об'єктів. При цьому потреба моделювання у реальному часі вступає в протиріччя із складністю розв'язку задач оптимального керування. Відомі методи, які застосовуються для моделювання оптимального керування, такі, як варіаційні методи, принцип максимуму Понтрягіна Л.С. та динамічне програмування, не завжди задовольняють вимогам реалізації процесів керування в реальному та прискореному часі, особливо якщо виникає потреба чисельного моделювання. Так, варіаційні методи призводять до чисельного інтегрування рівнянь Ейлера-Лагранжа, принцип максимуму вимагає розв'язання двоточкової граничної задачі, а динамічне програмування перетворює задачу оптимального керування у задачу чисельного інтегрування рівняння Беллмана в часткових похідних. Такі задачі є досить складними у обчислювальному відношенні і вимагають потужних бортових ЕОМ для керування рухом динамічного об'єкту, що є економічно не вигідним при широкому застосуванні, особливо якщо розглядувана задача багатокритеріальна. Таким чином, являється актуальною проблема розробки методів, які дозволяють моделювати процеси оптимального керування в реальному та прискореному часі.

Серед таких методів відомий операційний метод диференціальних перетворень (або основних диференціальних перетворень), що був започаткований у працях академіка Пухова Г.Є. та набув подальшого

розвитку в роботах Ронто Н.І., Семагіної Е.П., Баранова В.Л., Сауха С.Є., Степанова А.Є., Степанова А.В. та інших. Цей метод також використовувався для моделювання оптимальних процесів керування Барановим В.Л., Уруським О.С., Залогіним Н.С. та Комаренко О.Ю. Метод основних диференціальних перетворень дозволяє виконувати розв'язання задачі у області з відсутнім часовим аргументом і зводити складну задачу оптимального керування до більш простої задачі, яку можна досить легко розв'язати чисельними методами. Але вказаний метод має недоліки, властиві усім методам, що використовують ряд Тейлора, а саме: 1) обмеження часового інтервалу, на якому розглядається задача, радіусом збіжності ряду Тейлора, а також 2) необхідність забезпечення потрібної точності зменшенням інтервалу або великою кількістю дискрет, які не можуть бути достовірно отримані із моделі оптимального керування внаслідок наявності шумів та збурень, що діють на об'єкт. Тому актуальною є розробка моделей та методів оптимізації об'єктів і процесів на основі більш точних перетворень моделей об'єктів керування. В якості таких перетворень пропонується застосувати зміщені диференціальні перетворення, основи яких розроблені академіком Пуховим Г.Є. Зміщені перетворення дозволяють побудувати більш точні моделі оптимізації динамічних об'єктів і процесів та реалізувати процеси оптимального керування динамічними об'єктами і процесами в реальному і прискореному часі.

Відомі також операційні методи розв'язання інтегральних рівнянь, які дозволяють шляхом переходу з області оригіналів в область зображень перетворити інтегральні рівняння в алгебраїчні. Наприклад, широке застосування отримали інтегральні перетворення Лапласа і Фур'є. Проте інтегральні перетворення Лапласа використовуються в основному для лінійних рівнянь, що обмежує область їх застосування, а використання перетворень Фур'є у випадку нелінійних рівнянь ускладнено. Серед таких методів відомий операційний метод диференціальних перетворень, основи якого були розроблені в роботах академіка Г.Є. Пухова. Метод основних

диференціальних перетворень дозволяє розв'язати задачу в області з відсутнім неперервним аргументом і звести складну задачу до більш простої задачі, яку можна достатньо легко розв'язати чисельними методами. Проте вказаний метод має недоліки, притаманні всім методам, які використовують ряд Тейлора, а саме: обмеженням неперервного інтервалу, в якому розглядається задача, радіусом збіжності ряду Тейлора, а також необхідністю забезпечення потрібної точності зменшенням інтервалу або більшою кількістю дискрет, які не можуть бути достовірно отримані з моделі внаслідок наявності завад і збурень, діючих на об'єкт. Тому актуальною є розробка моделей і методів оптимізації об'єктів і процесів на основі більш точних перетворень їх моделей. В якості таких перетворень пропонується використовувати зміщені диференціальні перетворення, запропоновані Г.Є. Пуховим. Зміщені перетворення дозволяють побудувати більш точні моделі оптимізації динамічних об'єктів і процесів і реалізувати їх моделювання в реальному і прискореному часі.

Для дослідження поведінки складних фізичних об'єктів або процесів застосовується системний підхід, який характеризується розглядом множини властивостей і взаємозв'язків, притаманних об'єкту або процесу. При цьому досліджувані властивості часто суперечать одна одній, проте ні одною з них не можна знехтувати, оскільки тільки в своїй сукупності вони дають повне уявлення про даний об'єкт. Для некоректних задач такими суперечливими властивостями або частинними критеріями якості в багатокритеріальній постановці задачі можуть бути стійкість і точність отриманого розв'язку.

Подальший розвиток автоматизованих систем управління вимагає нових теоретичних положень. Тому відсутність ефективних методів, теоретичних положень і математичного забезпечення, що дозволяють розв'язувати некоректні задачі відновлення інформації та оптимізації параметрів об'єктів автоматизованих систем управління в умовах невизначеності у значній мірі стримує впровадження сучасних високоефективних автоматизованих систем управління. Окрім того, забезпечення рівня безпеки руху високошвидкісних

транспортних засобів досягається за рахунок знаходження оптимальних параметрів та характеристик, а також створення спеціального математичного й алгоритмічного забезпечення системи відновлення інформації в умовах невизначеності. У зв'язку з цим актуального значення набуває створення науково обґрунтованих методів розв'язання некоректних задач для підвищення достовірності та якості інформації для автоматизованих систем управління в умовах невизначеності.

Питання прогнозування руху космічних апаратів методом багатовимірних диференціально-тейлорівських перетворень розглянуто в працях Ракушев М.Ю., Пермякова О.Ю.

Досвід антитерористичної операції на сході України свідчить, що інформація від космічних систем істотно підвищує ефективність забезпечення дій збройних сил. В Україні реалізується Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма, згідно з якою створюється космічна система спостереження Землі "Січ", призначена, в тому числі, для виконання завдань у сфері національної безпеки і оборони. Експлуатація цієї системи неможливо без складного програмного забезпечення, одне з центральних місць в ньому займає процедура прогнозування руху космічних апаратів, в якій реалізовано інтегрування відповідного диференціального рівняння. До основних вимог, що пред'являються до процедур прогнозування руху космічного апарата відносяться: висока точність, абсолютна достовірність, оперативність, максимальне відпрацювання використовуваних методів і можливість автоматичного рішення вторинних, щодо прогнозування руху космічного апарата, завдань; відповідність методів, алгоритмів і програм технічними характеристиками електронно-обчислювальних машин. Крім того, слід додати вимоги до вартості створення таких процедур, їх уніфікації, а також гнучкості при вдосконаленні або зміні. Описано особливості обумовлюють те, що розробці процедур прогнозування руху космічного апарату при вирішенні задач балістико-навігаційного забезпечення управління космічним апаратом приділяється значна увага.

Актуальними розробки нових підходів, які покращують відповідність процедур прогнозування руху космічного апарата вимогам які до них висуваються. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Чисельні методи інтегрування звичайних диференціальних рівнянь є основними для високоточного короткострокового прогнозування руху космічного апарата ближнього космосу (в інтервалі до 1-2 тижнів, що відповідає 100-200 періодів обертання апарату). В даний час у вітчизняній практиці балістико-навігаційного забезпечення управління космічного апарата для короткострокового прогнозування руху космічного апарата ближнього космосу найбільшого поширення набув числовий кінцево-різницевий метод Адамса 7-го порядку, використовується по Екстраполяційні-інтерполяційної схемою, розгін якого проводиться методом Рунге Кутта 4-го порядку .Якщо розглянути останні дослідження щодо впровадження інших методів інтегрування звичайних диференціальних рівнянь в практику балістико-навігаційного забезпечення, то можна відзначити, що одним з перспективних є метод диференційно-тейлорівських (ДТ) перетворень.

Обчислювальні схеми прогнозування руху космічного апарата на основі ДТ-перетворень було застосовано для найбільш поширених моделей руху космічного апарата ближнього космосу - моделей руху в Грінвічській системі координат. Характерною ознакою всіх зазначених вище підходів до прогнозування руху космічного апарата є те, що числовий метод інтегрування (як кінцевого різницевий, так і ДТ-перетворення) використовується тільки для чисельного рішення попередньо отриманого (аналітично записаного у відповідній системі координат) диференціального рівняння руху космічного апарата, причому деякі члени таких рівнянь (відповідні прискорення) мають досить громіздкий вигляд, перш за все це стосується , врахування впливу геопотенциала (подається у вигляді відповідних рядів, що мають рекурентну форму), прискорення від якого знаходять через його градієнт. Визначення таких (громіздких) членів є окремим завданням, для вирішення якої використовуються спеціальні, перш

за все аналітичні методи, в цілому, підвищує складність розробки відповідних процедур для прогнозування руху космічного апарата. Такий порядок дій є обов'язковим (не має альтернативних рішень) для традиційних чисельних методів, проте не використовує всіх математичних (перш за все аналітичних) властивостей ДТ-перетворень різної мірної (коли деякі аналітичні викладки проводяться в області ДТ-спектрів в чисельно-аналітичному вигляді). Прикладом використання властивостей багатовимірних ДТ-перетворень є розроблені на їх основі методи для розрахунку приватних похідних від прогнозованого положення космічного апарата за початковими умовами руху і його прогнозування за стохастичною моделлю руху. Однак в наведених методах багатовимірні ДТ-перетворення використовуються тільки після отримання розв'язку (як його "розширення") завдання інтегрування диференціального рівняння руху космічного апарату одновимірними ДТ-перетвореннями і не стосуються саме завдання прогнозування руху космічного апарата. Таким чином, актуальним є проведення досліджень з розробки обчислювальної схеми для прогнозування руху космічного апарата на основі багатовимірних ДТ-перетворень, забезпечувати зменшення необхідних аналітичних викладок і поліпшити їх уніфікацію і гнучкість.

Загальними проблемами управління авіаційно-космічними системами та безпілотними аеростатичними літальними апаратами є розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів на основі диференціальних перетворень

Усі вище визначені чинники визначають аргументування та критичне оцінювання запропонованих автором нових рішень порівняно з відомими рішеннями.

Практична значимість та важливість для галузі полягає в тому, що розвиток теорії та методів розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів на основі диференціальних перетворень дозволяють в реальному часі здійснювати оперативну оптимізацію керування

та траєкторії руху і найбільш повно реалізувати максимально можливі льотні характеристики автономних безпілотних літальних апаратів. Теоретичні основи дисертаційної роботи доведено до рівня алгоритмів оптимізації керування конкретних безпілотних літальних апаратів на етапі їх виведення у задані термінальні умови, наслідком реалізації котрих є підвищення ефективності їх функціонування.

Має практичне значення отриманий в роботі алгоритм оптимального за витратою палива керування багатоетапним процесом виведення авіаційно-космічної системи на орбіту, що забезпечує приведення авіаційно-космічну систему в задані термінальні умови та досягнення наприкінці виведення максимальної швидкості. При цьому синтезований алгоритм оптимального керування рухом безпілотного аеростатичного літального апарату дозволяє здійснювати посадку апарата з досягненням мінімальної горизонтальної посадкової швидкості апарата.

Сформований алгоритм багатокритерійного оптимального керування багатоетапним процесом виведення авіаційно-космічну систему на орбіту забезпечує компромісний розв'язок між термінальними похибками та тепловими навантаженнями на поверхні авіаційно космічної системи. Отриманий алгоритм багатокритеріального оптимального керування рухом безпілотного аеростатичного літального апарата на режимі зльоту з виведенням на задану висоту дає змогу мінімізувати енергетичні витрати та досягти максимальної горизонтальної швидкості.

Синтезований гарантовано-адаптивний алгоритм керування процесом багатоетапного виведення авіаційно космічної системи на орбіту володіє властивостями адаптації до дії збурень та забезпечує гарантію виведення в задані термінальні умови при дії обмежених збурень.

Запропонований гарантовано-адаптивний алгоритм багатоетапного керування рухом безпілотного аеростатичного літального апарата на режимі зльоту з виведенням на задану висоту володіє властивостями адаптації до дії

збурень та забезпечує гарантію виведення в задані термінальні умови при дії обмежених збурень.

Теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи впроваджено на підприємствах: НВП «Хартрон-Аркус», м. Харків, Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ, Національного центру управління та випробувань космічних засобів, м. Київ та у навчальний процес Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ при викладанні дисциплін «Спеціальні розділи сучасної теорії автоматичного керування» та «Системи керування літальних апаратів», а також Національного авіаційного університету, що підтверджено відповідними актами. Крім того, результати дисертаційної роботи можуть бути використані при розробці тактико-технічних вимог до систем керування автономних безпілотних літальних апаратів, синтезу алгоритмів їх функціонування та розрахунків оптимальних траєкторій.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність у цілому, відповідність оформлення дисертації вимогам, затвердженим МОН України.

У *вступі* обґрунтовано актуальність дослідження, сформульовано мету та наукову проблему дисертації, показано зв'язок роботи з науковими темами та програмами, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію щодо кількості публікацій, апробацію та впровадження основних результатів дослідження, виділено особистий внесок здобувачки в опублікованих працях зі співавторами.

У *першому розділі* «Аналіз сучасного стану методів розв'язання нелінійних задач оптимального термінального керування рухом ЛА» розглянуто особливості задач оптимального термінального керування рухом літальних апаратів. Надано аналіз траєкторії виведення авіаційно космічної системи на орбіту, траєкторії безпілотних аеростатичних літальних апаратів на етапах зльоту та посадки. Формалізована задача та визначено принципи термінального керування. Надано порівняльний аналіз методів термінального керування авіаційно космічної системи (адаптивне керування, оптимальне

керування, керування на основі інтелектуальних технологій). Розглянуто питання автоматичного керування траєкторним рухом безпілотних аеростатичних літальних апаратів. Надано постановку задачі синтезу оптимального багатоетапного термінального керування літальними апаратами. Формалізована багатокритеріальна задача багатоетапного оптимального керування літальними апаратами (задача векторної оптимізації, розв'язання багатокритеріальних задач оптимізації). Надано постановку задачі синтезу оптимального гарантовано-адаптивного керування при впливі невизначених збурень (перехід від задачі оптимізації до задачі двобічної оптимізації, розв'язання задачі в рамках теорії диференціальних ігор). Обґрунтовано диференціальні перетворення та їх застосування до розв'язання задач оптимального керування (основні положення методу диференціальних перетворень, застосування методу диференційних перетворень до розв'язання крайових задач та задач оптимального керування. Це дозволило обґрунтувати та формалізувати наукову проблему та задачі дослідження.

У *другому розділі* «Розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь та крайових задач на базі модифікованого методу диференціальних перетворень» запропоновано модифікований метод диференціальних перетворень для розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь (багатоетапний метод диференціальних перетворень, апроксимація нелінійних складових диференціальних рівнянь поліномами Адоміана, модифікований метод диференціальних перетворень). Обґрунтовано метод розв'язання нелінійних крайових задач. Оцінено похибки розв'язку із застосуванням різних підходів (основні диференціальні перетворення, зміщені диференціальні перетворення, модифікований метод диференціальних перетворень).

У *розділі 3* «Дискретно-аналітичне відображення нелінійних задач багатоетапного траєкторного руху ЛА» запропоновано модифікований метод дискретно-аналітичного відображення нелінійних задач термінального

виведення ЛА. Модифікований метод дискретно-аналітичного відображення вихідної нелінійної математичної моделі в область зображень (спектральну модель) полягає у виконанні наступних дій: застосування до диференціального рівняння модифікованого методу диференціальних перетворень; апроксимація нелінійних складових диференціального рівняння їх поліномами Адоміана; заміщення у компонентах поліномів Адоміана змінних їх відповідними зображеннями того самого індексу; формування спектральної моделі для кожного підінтервалу руху. Розглянуто відображення задачі багатоетапного руху безпілотного аеростатичного літального апарата у спектральну модель (математична модель траєкторного руху, спектральна модель руху безпілотного аеростатичного літального апарата, диференціальні спектри змінних траєкторного руху). Запропонована технологія відображення задач багатоетапного виведення авіаційно-космічної системи на орбіту у спектральну модель (математична модель траєкторного руху, спектральна модель процесу виведення авіаційно-космічної системи на орбіту, диференціальні спектри змінних траєкторного руху). Запропоновано аналітичне конструювання термінального керування рухом літальних апаратів на базі диференціальних спектрів.

Четвертий розділ «Розв'язання нелінійної задачі оптимального термінального керування рухом літальних апаратів на основі диференціальних перетворень» присвячено розробці чисельно-аналітичного методу розв'язання нелінійної задачі оптимізації багатоетапного термінального керування. Розглянуто особливості оптимізації багатоетапних процесів термінального керування на основі диференціальних перетворень. Основними перевагами застосування розглянутого підходу до визначення оптимального багатоетапного термінального керування є: базування на модифікованому методі диференціальних перетворень та удосконаленому дискретно-аналітичному відображенню вихідної нелінійної математичної задачі у дискретну (спектральну) модель; можливість знаходження оптимального керування та відповідних фазових траєкторій без використання

чисельних методів інтегрування диференціальних рівнянь; зведення проблеми синтезу замкнених законів термінального керування до розв'язання скінченої системи рівнянь відносно параметрів керування; встановлення у неявній формі нелінійного зв'язку керування з вектором поточного стану, що дає змогу сформулювати керування зі зворотним зв'язком від параметрів траєкторного руху безпілотного літального апарата під час багатоетапного процесу керування; аналітичне розв'язання нелінійної задачі синтезу оптимального керування; можливість подолання математичних труднощів при обчисленні диференціальних спектрів складних нелінійностей диференціальних рівнянь траєкторного руху за рахунок їх апроксимації поліномами Адоміана, що значно скорочує обсяг обчислень при отриманні розв'язку задачі в чисельному або аналітичному вигляді; забезпечення «гнучкої» адаптації оптимальної траєкторії виведення до дії невідомих збурюючих факторів. Синтезовано оптимальне термінальне керування виведенням авіаційно-космічної системи на орбіту (синтез оптимального за витратою палива алгоритму керування, дослідження оптимального алгоритму керування). Запропоновано оптимальне термінальне керування аеростатичним літальним апаратом на злітно-посадкових режимах (синтез алгоритму оптимального термінального керування, дослідження ефективності оптимального алгоритму керування на режимі зльоту з виведенням на задану висоту, дослідження ефективності оптимального алгоритму керування на режимі посадки. Розглянуто застосування зміщених диференціальних перетворень до оптимізації багатоетапного термінального керування.

У *п'ятому розділі* «Багатокритерійна оптимізація термінального багатоетапного керування літальними апаратами» зроблено постановку задачі багатокритеріальної оптимізації багатоетапних динамічних процесів. Проаналізовано багатокритеріальні моделі оптимізації та запропоновано чисельно-аналітичний метод багатокритеріальної оптимізації багатоетапного термінального керування. Зроблена оптимізація виведення авіаційно-

космічної системи на орбіту передбачила синтез багатокритеріального алгоритму керування, розробку комбінованого алгоритму керування, дослідження ефективності комбінованого алгоритму. Запропоновано оптимізацію керування аеростатичним літальним апаратом на режимі зльоту з виведенням на задану висоту, яка передбачає синтез багатокритеріального алгоритму керування, дослідження ефективності багатокритеріального алгоритму). Проведено дослідження впливу вітрових збурень на якість процесів керування на наступних режимах: виведення авіаційно-космічної системи на орбіту, виведення аеростатичного літального апарату на задану висоту. Обґрунтовано застосування зміщених диференціальних перетворень до багатокритеріальної оптимізації багатоетапних процесів керування.

У шостому розділі «Оптимальне керування рухом літальних апаратів за наявності збурень на основі диференціально-ігрового підходу та диференціальних перетворень» оцінено переваги застосування диференціально-ігрових моделей та запропоновано диференціально-ігрову модель процесу багатоетапного керування. Запропоновано метод побудови оптимальних програмних стратегій. Синтезовано програмний алгоритм керування аеростатичним літальним апаратом за максимальній протидії збуренням. Запропоновано метод синтезу гарантовано-адаптивного багатоетапного керування. Досліджено гарантовано-адаптивні алгоритми термінального керування літальними апаратами на наступних режимах: виведення аеростатичного літального апарату на задану висоту, виведення авіаційно-космічної системи на орбіту.

У **висновках** відтворено основні результати дисертаційного дослідження, що відображають методологію розв'язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів на основі диференціальних перетворень.

У **додатках** наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи

Структура та обсяг роботи.

Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел (293 найменувань, в т.ч. 202 кирилицею та 91 латиницею), додатків, містить 11 таблиць та 24 рисунків. Основний текст роботи викладено на 297 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 342 сторінку.

Оцінка мови та стилю викладення дисертації і автореферату. Мова та стиль дисертації та автореферату свідчать про вміння автора аргументовано викладати свої думки та, у цілому, відповідають вимогам МОН України. Сформульовані у дисертаційній роботі основні положення, висновки та рекомендації викладені у логічній послідовності та доказовій формі, що значно сприяє усвідомленню думок автора. Всі розділи дисертації мають внутрішню єдність і завершеність. Змістове наповнення підрозділів роботи відповідає змісту визначених розділів.

Отримані підсумкові результати дисертації співпадають із загальною метою і конкретними науковими завданнями, сформульованими у вступі. В цілому, дисертаційна робота сприймається як кваліфікаційна закінчена наукова праця, що містить нові наукові результати.

Підтвердження повноти викладу основних результатів дисертації в наукових фахових виданнях.

Наукова новизна безсумнівна та достатня для докторської дисертації. Основні наукові і практичні результати, що отримані в ході дисертаційного дослідження, опубліковано з необхідною повнотою після захисту кандидатської дисертації у 48 наукових працях.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 4 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 даних), 1 – монографія, 2 – учбових

посібники та 17 – у матеріалах наукових конференцій та публікацій в наукових журналах і збірниках наукових праць інших країн (2009-2017 р.), у т.ч. 2 – у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus.

Інформація про отримані результати у кандидатській дисертації здобувача не використовувалась при підготовці докторської дисертації.

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

Відмічаю в цілому науково-коректний стиль викладення матеріалів дисертації. Назва роботи відповідає самій роботі, яка відповідає паспорту спеціальності 05.13.03 – системи та процеси керування.

Недоліки

У якості недоліків у роботі потрібно відмітити наступне.

1. У якості мети досліджень автором визначено «розвиток методів розв’язання нелінійних задач оптимального керування рухом ЛА на основі диференціальних перетворень та їх застосування до оптимізації багатоетапного процесу виведення автономних БЛА у задані термінальні умови». Вважаю, що наукові дослідження, які проведені автором, є інструментарієм для здійснення оперативної оптимізації керування та траєкторії руху, що надає можливість найбільш повно реалізувати максимально можливі льотні характеристики автономних безпілотних літальних апаратів щодо їх виведення у задані термінальні умови, наслідком реалізації котрих є підвищення ефективності їх функціонування.

2. В підрозділі «1.9. Наукова проблема та задачі дослідження» (стор. 94) бажано було надати математичну формалізацію задачі досліджень. Бажано було визначити потребу розробки нових ефективних методів розв’язання нелінійних задач оптимального керування рухом БЛА на основі

диференціальних перетворень та їх застосування до оптимізації багатоетапного процесу виведення БЛА у задані термінальні умови. В чому полягає їх перевага по відношенню до відомих методів, наприклад методу обернених завдань динаміки, динамічного програмування, аналітичного конструювання регуляторів тощо. При цьому бажано було б математично формалізувати завдання, визначити множину (кортеж) факторів та за рахунок яких здійснюється оптимальне керування рухом літальних апаратів, які обмеження та зовнішні впливи враховуються.

3. В розділі 2 «Розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь та крайових задач на базі модифікованого методу диференціальних перетворень» автор розглядає окремі різні модельні приклади:

- багатоетапний метод диференціальних перетворень, - (2.9), стор. 100;
- апроксимація нелінійних складових диференціальних рівнянь поліномами Адоміана, - (2.13), стор. 107;
- модифікований метод диференціальних перетворень, - (2.26), стор. 109;
- метод розв'язання нелінійних крайових задач, -(2.33), стор. 112;

При цьому виникає питання, чому з одного боку моделі різні, а з іншого, вважаю за доцільне розглядати питання, пов'язані з керуванням рухом літальних апаратів.

4. У розділі 3 «Дискретно-аналітичне відображення нелінійних задач багатоетапного траєкторного руху ЛА» на основі модифікованого методу диференціальних перетворень та модифікованого методу дискретно-аналітичного відображення, будується спектральна модель багатоетапного траєкторного руху БАЛА на злітно-посадкових режимах. Вважаю, що було доцільне визначити пріоритетність режимів, що розглядаються, саме для авіаційно-космічної системи та безпілотних аеростатичних літальних апаратів, а також обґрунтувати достатність розгляду тільки поздовжнього руху.

5. У розділі 4 «Розв'язання нелінійної задачі оптимального термінального керування рухом літальних апаратів на основі

диференціальних перетворень» автор визначає позитивний ефект (поліпшення точності досягнення термінальних умов виведення на $\sim 2\%$ за висотою та швидкістю), отриманий завдяки застосуванню до синтезу алгоритму керування процесом виведення АКС на орбіту модифікованого метода диференціальних перетворень. Бажано було б надати змістовні матеріальні переваги цього позитивного ефекту, - а саме масою корисного навантаження, що виводиться на орбіту, витратами палива на процес виведення, часом виводу на орбіту, помилками досягнення термінальних умов, тепловими та аеродинамічними навантаженнями на поверхні АКС, обмеженнями на швидкісний напір, піднімальну силу, кут атаки та ін. Як співвідносяться точність досягнення термінальних параметрів з точністю диференційних перетворень.

6. Зауваження проблемного характеру. Стор.188 підрозділ 4.4.2. «Дослідження ефективності оптимального алгоритму керування на режимі зльоту з виведенням на задану висоту». Автор апріорі досліджує процес зльоту та виведення на *задану* висоту аеростатичного літального апарата за синтезованим алгоритмом керування, який забезпечує досягнення на заданій висоті *максимальної горизонтальної швидкості*. При цьому проведені дослідження стосуються дирижабля «Skyship-500». Аеростати можливо розглядати як стартова позиція повітряного старту авіаційно-космічної системи. Тому, доцільне було розглянути варіант *максимізації* висоти підняття аеростату з послідовним стартом (відділенням) авіаційно-космічної системи.

7. При дослідженні ефективності оптимального алгоритму керування не визначені вимоги до точності характеристик датчиків первинної інформації. Так, за вхідні сигнали в автопілоті керма висоти взято висоту польоту, швидкість зміни висоти польоту (швидкість зниження), кут атаки та швидкість зміни кута атаки. Питання: які висотоміри застосовувалися: барометричні або радіовисотоміри. Датчики кута атаки при керуванні рухом не застосовують, - похибка до 20%. Тому кутовим рухом звичайно керують

за допомогою кута тангажа. Чому не розглядався режим вертикальної посадки дирижабля.

8. У розділ 6 «Оптимальне керування рухом літальних апаратів за наявності збурень на основі диференціально-ігрового підходу та диференціальних перетворень» при розгляді (стор.267) диференціально-ігрова модель процесу багатоетапного керування не визначено ціну гри, яка в подальшому повинна формувати теоретико-ігровий підхід обирання відповідних стратегій (законів керування об'єктами, що розглядаються). В, задачі, що розглядається, гравці не рівноцінні: формувач керування та збурення. Тому припущення, що пара стратегій гравців є оптимальною та має місце сідлова точка гри потребує обґрунтування. Сідлова точка (компроміс) в задачах, що розглядаються, керування не потрібне. При цьому, задача першого гравця полягає у переведенні АКС із початкових умов в задані кінцеві умови з мінімальним значенням функціоналу якості, за умови максимізації його другим гравцем, який імітує дію найнесприятливішого сполучення факторів збурень. В цілому це знижує ефективність процесів керування.

9. В роботі мають місце деякі посилання на не досить сучасні наукові джерела, наприклад:

- 12. Nagabhushan B. L. Thrust vector control of a V/STOL airship / B. L. Nagabhushan, G. D. Faiss // J. of aircraft. – **1984**. - Vol.21, No.6. - P. 408-413

- 32. Глумов В. М. Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами: некоторые результаты и направления развития / В. М. Глумов С. Д. Земляков, В. Ю. Рутковский // Автоматика и Телемеханика. - **1999**. - № 6. - С. 100-116.

- 38. Фрадков А. Л. Адаптивная стабилизация минимально-фазовых объектов с векторным входом без измерения производных от выхода / А. Л. Фрадков // Докл. РАН. – **1994**. – Т. 337, №5. – С. 592-594.

- 41. Емельянов С. В. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности / С. В. Емельянов, С. К. Коровин. – 1997. – М.: Наука. – 352 с.

- 178. Семагина Э. П. Дифференциальные преобразования и их возможности для решения задач динамики / Э. П. Семагина // Электронное моделирование. – 1986. – Т.8, №4. – С.44-49.

- 180. Ронто Н. И. О неявных схемах интегрирования, основанных на дифференциальных преобразованиях / Н. И. Ронто // Электронное моделирование. – 1981. – №5 (3). – С.6-11.

- 272. Попов Н. М. Об оценке вычислительной сложности многокритериальной оптимизации / Н. М. Попов // Вычислительные комплексы и моделирование сложных систем. – М.: МГУ, 1989. – С.142-152.

Вказані недоліки не знижують науковий рівень дисертації “Методи розв’язання нелінійних задач оптимального керування рухом літальних апаратів на основі диференціальних перетворень” та не впливають на позитивне враження від дисертації, як кваліфікаційну роботу, в цілому, завершеність якої не викликає сумніву. Робота містить висунуті автором науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, наукові положення, особистий внесок здобувача в науку.

Висновок.

Вивчення дисертаційної роботи, автореферату та опублікованих здобувачем наукових праць дозволяє стверджувати, що дисертаційна робота виконана на актуальну тему, представляє собою логічне завершене наукове дослідження, що містить нові обґрунтовані наукові результати, які в сукупності є вирішенням сформульованої вище наукової-технічної проблеми, та відповідає вимогам п. 9, 10, 12-14 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо докторських дисертацій, а здобувач **ГУСИНІН Андрій В'ячеславович** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – системи та процеси керування.

Офіційний опонент -
проректор з наукової роботи
доктор технічних наук, професор,
Заслужений діяч науки і техніки України,
Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки



О.А.Машков