

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Малосєд Марина Миколаївна**



УДК 681.513:517.938 (043.3)

**АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ СИСТЕМ  
СТАБІЛІЗАЦІЇ НЕЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ**

**05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт**

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті, м. Київ  
Міністерство освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Синглазов Віктор Михайлович**,  
Національний авіаційний університет,  
Факультет аеронавігації, електроніки  
та телекомунікацій,  
завідувач кафедри авіаційних комп'ютерно-  
інтегрованих комплексів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Прасол Ігор Вікторович**,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки,  
професор кафедри біомедичної інженерії

доктор технічних наук, професор  
**Лисенко Олександр Іванович**,  
Національний технічний університет України "КПІ"  
Інститут телекомунікаційних систем,  
професор кафедри телекомунікацій

Захист відбудеться « 10 » жовтня 2019 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.08 у Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий « 04 » вересня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор технічних наук, проф.



В. М. Шутко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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:

1. Експериментальне дослідження динаміки векторів сигналів «вхід-вихід» моделі об'єкта управління в реальних умовах функціонування.

2. Виконання структурної та/або параметричної ідентифікації моделей динаміки рухомого об'єкта на основі одержаних характеристик векторів сигналів «вхід-вихід».

3. Визначення оптимальної структури і параметрів багатовимірного регулятора на основі застосування сучасних методів синтезу оптимальних багатовимірних систем стабілізації до результатів ідентифікації моделі об'єкта управління.

4. Аналіз границь якості стабілізації математичної моделі об'єкта, що входить до складу оптимальної системи стабілізації, в реальних умовах функціонування.

5. Розробка технічної пропозиції на створення нової або на модернізацію існуючої системи стабілізації багатовимірного рухомого об'єкта управління.

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

Трьом останнім пунктам цього підходу й присвячені дослідження, результати яких викладені в роботі, що пропонується. Основна увага в ній приділяється *третьому пункту*.

**Актуальність теми дослідження.** В зв'язку з постійним розширенням сфер використання штучних супутників Землі (ШСЗ) сьогодні зростає потреба в автоматизованому проектуванні подібних вискоєфективних систем. Ця потреба зумовлена, передусім, мінімізацією витрат на устаткування супутника, на виробництво його експериментальної моделі, на його експлуатацію та обслуговування при умові його використання з максимальною ефективністю, наприклад, для моніторингу земної поверхні з космосу.

Космічні знімки з високими метричними властивостями знаходять широке використання при вирішенні проблем детальної картографії місцевості, збору та обробки інформації для дослідження ресурсів Землі, екологічного контролю, моніторингу надзвичайних ситуацій, для метеорологічних потреб тощо. Це один з напрямів застосування ШСЗ, що стрімко розвивається, при цьому важливим елементом його ефективного використання в процесі фотозйомки є можливість здійснювати точну орієнтацію космічного апарата (КА) шляхом його поворотів навколо центру мас відносно трьох ортогональних осей. Така організація керованого руху супутника суттєво ускладнює планування зйомки та управління засобами спостереження, але значно розширює можливості застосування КА. Водночас система його управління повинна забезпечувати як високу маневреність апарата, так і задовольняти вимоги надзвичайно високої точності стабілізації кінематичних параметрів його руху. Тому розв'язана в роботі задача стабілізації та оптимальної стабілізації руху ШСЗ шляхом *автоматизованого проектування* є актуальною.

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. Лєтова, І. Прокопенка, В. Синєглазова, 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. 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*.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Наукові дослідження проводилися згідно з темою №396 Д-07 «Методика побудови комплексної навігаційної системи на основі спрощеного варіанту безплатформної інерціальної та високоточної супутникових систем» плану наукових робіт кафедри авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів Навчально-наукового інституту інформаційно-діагностичних систем Національного авіаційного університету.

Основні наукові результати отримано в рамках таких науково-дослідних робіт: 1) Кафедральна НДР № 761-ДБ-11 «Стійкі методи і алгоритми обробки сигналів в інформаційно-вимірювальних системах»; 2) Кафедральна НДР № 75 /22.01.03 «Інформаційні технології в системах радіотехнічного забезпечення польотів»; кафедри авіаційних радіоелектронних комплексів Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету; 3) Держбюджетна НДР № 245-ДБ 19.

**Мета і завдання дослідження.** *Мета дослідження* – підвищення точності стабілізації нелінійних об'єктів шляхом автоматизованого проектування структури оптимальних за квадратичним критерієм якості їх регуляторів, синтезованих методами прямого жорсткого синтезу стабілізованих нелінійних систем.

Для досягнення мети дослідження необхідно було розглянути такі *задачі*:

- запропонувати нову структуру САПР стабілізуючих регуляторів із застосуванням методів ПЖС НСС для нелінійних об'єктів;
- проаналізувати можливі шляхи стабілізації нелінійних динамічних систем;
- завершити дослідження методів прямого жорсткого синтезу (ПЖС) нелінійних систем стабілізації (НСС);
- розв'язати задачу оптимізації законів управління і стабілізації, синтезованих методами ПЖС;
- розробити САПР для оптимальної стабілізації штучного супутника Землі та математичного маятника;
- побудувати систему автоматизованого проектування оптимального регулятора стану ШСЗ в умовах невизначеності із застосуванням асимптотично стійкого спостерігача його положення.

*Об'єкт дослідження* – проблеми оптимального управління і стабілізації нелінійних динамічних систем.

*Предмет дослідження* – автоматизоване проектування оптимальних регуляторів для стабілізації нелінійних систем в умовах невизначеності методами ПЖС НСС.

Для розв'язання поставлених задач використовувались *методи* системного аналізу, теорії управління та оптимізації, другий метод Ляпунова, метод косиметризації матричного рівняння Ляпунова. Комп'ютерне моделювання виконувалося в середовищі MatLab.

### Наукова новизна одержаних результатів:

- запропонована нова структура САПР, яка відрізняється від відомих тим, що містить блоки: структурного синтезу регулятора, параметричного синтезу регулятора, оптимізації регулятора, математичного моделювання, аналізу результатів моделювання, що підвищує ефективність вирішення задач оптимальної стабілізації нелінійних систем;
- вперше повністю й детально досліджено і розроблено шостий метод жорсткого синтезу нелінійних систем стабілізації з *верхньою* матрицею коефіцієнтів квадратичної форми – функції Ляпунова, який відрізняється від відомих тим, що реалізується на єдиному першому етапі з однією компактною умовою стабілізованості – це дозволяє успішно й легко застосовувати його для стабілізації нелінійних систем;
- за критерієм узагальненої роботи О. А. Красовського вперше запропонована і досліджена процедура синтезу оптимального управління нелійними об'єктами методами ПЖС. До цього методи ПЖС НСС не були оптимізовані, а критерій О. А. Красовського не знаходив широкого застосування, бо потребував асимптотичної стійкості розімкнутої системи об'єкта. Разом з методами ПЖС НСС цей критерій дозволив будувати оптимальний регулятор без інтегрування як рівняння Ріккати, так і рівняння Ляпунова, що значно спрощує процедуру синтезу системи оптимальної стабілізації об'єкта;
- вперше побудовано шостим методом ПЖС НСС оптимальне стабілізуюче управління математичним маятником. Порівняно з результатами М. М. Красовського оптимальної стабілізації такого ж математичного маятника, але за лінійним наближенням, синтезований в дисертаційній роботі оптимальний регулятор покращує якість стабілізації математичного маятника в середньому на 50 %;
- вперше синтезовано стабілізуюче та оптимальне стабілізуюче управління кутовою орієнтацією штучного супутника Землі (ШСЗ) 6-м методом ПЖС НСС, яке дозволяє неперервно здійснювати корекцію кутової орієнтації супутника. До цього методи ПЖС НСС для стабілізації ШСЗ не застосовувалися;
- вперше побудовано 6-м методом ПЖС НСС асимптотично стійкий спостерігач похибок спостереження стану ШСЗ за магнітометричною і швидкісною інформацією з датчика кутової швидкості (ДКШ) в умовах невизначеності, досліджено стабілізацію ШСЗ з використанням цієї інформації. Запропонований та досліджений при цьому новий підхід до використання процедури стабілізації системи похибок спостереження стану ШСЗ не має аналогів;
- отримані в роботі нові результати із стабілізації та оптимальної стабілізації новими методами ПЖС НСС кутової орієнтації ШСЗ та похибок спостереження його стану, оптимальної стабілізації математичного маятника

у верхньому положенні рівноваги й стабілізації заданої напруги на виході АРП дозволили вперше успішно створити базу даних САПР, структура якої забезпечує автоматизоване проектування систем стабілізації:

- космічних об'єктів будь-якого призначення;
- багатоланкових математичних маятників у верхньому положенні рівноваги, математичні моделі яких подібні до моделей багатопротяжних трубопроводів з газу, нафто та водо наповненням – їх проблеми зараз дуже актуальні;
- постійної заданої напруги на виході АРП різної природи.

Автоматизоване проектування систем стабілізації подібних складних об'єктів призначене підвищувати точність і надійність їх функціонування, здешевлювати їх розробку та проектування.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Розроблені математичні моделі та методи можуть бути використані науково-дослідними та дослідно-конструкторськими організаціями та установами підчас створення нових та вдосконалення існуючих систем автоматизованого проектування ШСЗ, а також в навчальних закладах для підготовки, перепідготовки та підвищення кваліфікації фахівців у галузі автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Результати роботи отримали практичне втілення в процедурах САПР, в учбовому процесі НАУ в курсах: теорія оптимального управління механічними системами, основи комп'ютерного проектування РЕА, математичне моделювання систем та процесів для студентів напряму 6.050901 «Радіотехніка» спеціальності 8.05090103 «Радіоелектронні пристрої системи та комплекси» (див. додатки) та в публікаціях результатів досліджень у наукових виданнях.

**Особистий внесок автора.** В роботі автор самостійно дослідив шостий метод ПЖС нелінійних систем стабілізації з верхньою матрицею коефіцієнтів квадратичної форми і частково третій та п'ятий алгоритми, проаналізував можливі шляхи оптимізації методів ПЖС і розробив процедуру її реалізації з критерієм узагальноної роботи О. А. Красовського.

В роботах [2–5] автору належать результати досліджень шостого методу ПЖС із верхньою матрицею коефіцієнтів квадратичної форми. В роботах [6–8] автору належать результати побудови оптимального управління для нелінійних систем стабілізації, а в роботах [9, 10] – результати знаходження оптимального управління для математичного маятника. В роботі [11] автору належать результати побудови оптимального стабілізуючого управління ШСЗ. В роботі [19] автору належать результати побудови асимптотично стійкого спостережника стану ШСЗ в умовах невизначеності.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати і положення роботи доповідались і обговорювались на V Міжнародній НТК «Гиротехнологии,

навігація и управление движением» (Київ, НТУУ «КПІ», 2005), на VIII Кримській міжнародній математичній школі «МФЛ-2006: Метод функций Ляпунова и его приложения» (Крим, Алушта, 2006 р.), на засіданнях студентської секції Міжнародної НТК «Політ – 2005» і «Політ – 2006» (Київ, НАУ, 2005 р., 2006 р.), на Міжнародній конференції “Dynamical System Modelling and Stability Investigation”: Травень 22–25, 2007 та 2011 (Київ, КНУ ім. Тараса Шевченка, 2007 р., 2011 р.), на X Міжнародній конференції «Устойчивость, управление и динамика твердого тела»: Червень 5–10, 2008 р. (Донецьк, Ін-т прикладної математики і механіки НАНУ, 2008 р.), на IX Кримській міжнародній математичній школі «МФЛ-2008» (Тавридський нац. ун-т, Сімферополь, 2008), XV Міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика-2008» (Одеса, ОНМА, 23–26 вересня 2008 р.), VII НТК «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки» (Київ, НТУУ «КПІ», 2009 р.), на Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Проблеми навігації і управління рухом» (Київ, НАУ, 21–22 листопада 2011 р.), НТК «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, НАУ, 28–30 листопада 2012 р.), на Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Проблеми навігації і управління рухом» (Київ, НАУ, 28–29 листопада 2012 р.), IX НТК «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки» (Київ, НТУУ «КПІ», 17–18 квітня 2013 р.), НТК «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, НАУ, 17–19 листопада 2014 р.), НТК «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, НАУ, 21–23 листопада 2018 р.), на наукових семінарах у відділі динаміки та стійкості багатовимірних систем Інституту математики НАН України, на кафедрі авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів та на кафедрі авіаційних радіоелектронних комплексів факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету.

**Публікації.** За темою дисертації автором опубліковано 21 наукову роботу, з них 6 статей [1, 3, 11–13, 15] – в спеціалізованих виданнях, що входять до переліку фахових видань ДАК МОН України для здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (серед них 1 – в міжнародному журналі [3]), 4 статті в збірниках праць міжнародних конференцій [2, 9, 10, 19] та 11 тез доповідей на міжнародних конференціях [4–8, 14, 16, 17, 18, 20, 21].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота містить вступ, 5 розділів, загальні висновки і список використаних джерел, що складається з



177 найменувань на 17 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 173 сторінки (7,2 авторських аркуша). Робота містить 27 малюнків на 20 сторінках, 4 таблиці на 4 сторінках, 8 додатків на 9 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** до дисертації обґрунтовується актуальність теми дослідження, міститься загальна характеристика роботи, її зв'язок з науковими темами, визначені об'єкт і предмет дослідження, сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи, визначено новизну та практичну цінність отриманих результатів, кількість публікацій, особистий внесок здобувача, структура й обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** пропонується, розробляється та досліджується структура САПР стабілізуючих регуляторів для нелінійних систем із застосуванням методів ПЖС НСС для нелінійних об'єктів. Оскільки дослідження складних нестійких нелінійних систем супроводжується значними затратами часу та людських зусиль, то з метою спрощення процесу їх виробництва розроблено математичне забезпечення САПР, яке:

- ✓ скорочує час проектування об'єкта;
- ✓ створює реальний нелінійний об'єкт у віртуальному просторі ПК;
- ✓ підвищує якість і точність його функціонування;
- ✓ зменшує витрати на виробництво, зокрема на його стендові та натурні випробування.

**Другий розділ** присвячується аналізу можливих шляхів стабілізації нелінійних систем автоматизованого проектування на основі прямого методу Ляпунова, який здається погано обумовленим, бо з *одного* матричного рівняння Ляпунова

$$\dot{D} + D(A - BC) + (A - BC)^T D = -Q, \quad (1)$$

потрібно знаходити *дві* матриці – матрицю  $C$  підсилення в регуляторі зворотного зв'язку і матрицю  $D$  коефіцієнтів квадратичної форми (тут  $A$  – матриця коефіцієнтів математичної моделі об'єкта,  $B$  – відома матриця, яка відповідає каналам управління,  $D$ ,  $Q$  – матриці коефіцієнтів квадратичних форм – функцій Ляпунова). Проте ця проблема вирішується на сьогодні чотирма шляхами:

1. Матрицю  $D$  можна задати заздалегідь (це шлях монотонної стабілізації).

2. Матрицю  $D$  можна знайти як розв'язок рівняння Ляпунова, записаного для лінійного стаціонарного наближення нелінійної системи (це можливо лише при асимптотичній стійкості лінійного наближення), після чого вона вже як відома використовується в рівнянні Ляпунова (1) для замкнутої нелінійної системи, що дозволяє з нього визначити матрицю  $C$  як єдину невідому.

3. Матрицю  $C$  можна лінійно виразити через матрицю  $D$ , тоді рівняння Ляпунова (1) перетворюється на матричне рівняння Ріккати та дозволяє розв'язувати також і класичну задачу оптимального керування.

4. Можна задати певну структуру матриці  $D$  нижньою  $D = D_* D_*^T$  чи верхньою  $D = D_*^T D_*$  довільною неособливою квазітрикутною матрицею  $D_*$ , що й пропонується в методах ПЖС нелінійних систем стабілізації, дослідженню та аналізу автоматизованого проектування яких присвячується **третій розділ** роботи.

*Визначення:* Метод автоматизованого проектування *прямого жорсткого синтезу* (ПЖС) нелінійних систем стабілізації зводиться до побудови такої матриці управління  $C$  у виразі

$$u = -C(x, t)x \in \mathbf{U} \subset \mathbf{R}_m \quad (2)$$

за якої матриця коефіцієнтів  $A$ – $BC$  замкнутої системи буде задовольняти рівняння Ляпунова (1) при *фіксованих* структурах матриць  $D, Q$  коефіцієнтів квадратичних форм  $V, W$  і навіть при умові  $D = const$ .

Реалізація методів ПЖС можлива декількома способами й істотно залежить від властивостей матриці  $B$ . Коли матриця  $B$  неособлива і має обернену, матрицю керування  $C$  можна знайти з рівняння Ляпунова (1) методом його кососиметризації у вигляді

$$C = B^{-1} \left[ A + \frac{1}{2} D^{-1} (\dot{D} + Q + S) \right],$$

де  $S$  – довільна кососиметрична матриця.

Тоді вона цілком розв'язує задачу автоматизованого проектування стабілізації нелінійної системи, навіть априорі нестійкої, без будь-яких умов стабілізованості, причому з довільною матрицею  $D$ .

Проблема набагато ускладнюється, коли матриця  $B$  має вигляд

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}_{n \times m}. \quad (3)$$

При цьому для розв'язання задачі стабілізації вона повинна мати максимально можливий ранг, рівний  $m$  – розмірності управління.

Вигляд (3) матриці  $B$  зумовлює блочне представлення матриць  $A, C, Q$ :

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad C = [C_1 \quad C_2], \quad Q_i = \begin{bmatrix} Q_i & 0 \\ D_{12}^T Q_i & D_{22} Q_i \end{bmatrix}, \quad \det Q_i \neq 0, \quad i=1,2,$$

також, далі введені наступні позначення

$$\tilde{A}_{11} = A_{11} - A_{12} D_{21}, \quad \tilde{A}_{21} = A_{21} - A_{22} D_{21}, \quad \tilde{A}_{22} = A_{22} + D_{21} A_{12}, \quad \tilde{B}_2 = B_2 + D_{21} B_1.$$

Рівняння Ляпунова (1) для них перетворюється на такі три рівняння стійкості замкнутої системи щодо блоків матриць  $A, B, C, D, Q$ :

$$\dot{D}_{11} + D_{11} [\tilde{A}_{11} - B_1 (C_1 - C_2 D_{21})] + [\tilde{A}_{11} - B_1 (C_1 - C_2 D_{21})]^T D_{11} = -Q_{11} \quad (4a)$$

$$\dot{D}_{22} + D_{22}(\tilde{A}_{22} - \tilde{B}_2 C_2) + (\tilde{A}_{22} - \tilde{B}_2 C_2)^T D_{22} = -Q^*_{22}, \quad (4б)$$

$$D_{22}\dot{D}_{21} + D_{22}[\tilde{A}_{21} + D_{21}\tilde{A}_{11} - \tilde{B}_2(C_1 - C_2 D_{21})] + (A_{12} - B_1 C_2)^T D_{11} = -Q^*_{21}. \quad (4в)$$

Оскільки рівняння (4в) залежить від обох блоків  $C_1$  і  $C_2$  матриці  $C$ , що дозволяє формально виражати кожен з них через інший, то це перетворює систему (4) у рівнозначні три рівняння щодо шуканих матриць  $C_1$ ,  $C_2$ , причому з двох будь-яких рівнянь можна визначити  $C_1$  і  $C_2$ , а третє співвідношення, що залишилося, після виключення в ньому вже знайденої матриці управління можна розглядати як умову стабілізованості. В результаті для системи (4) з'являється можливість формальної реалізації шести різних алгоритмів розв'язку задачі. Їх зручно звести в таблицю.

Таблиця 1

		Алгоритми					
		1	2	3	4	5	6
Рівняння	(а)	$C_1$	$C_1$	*	$C_2$	$C_2$	*
	(б)	$C_2$	*	$C_1$	$C_1$	*	$C_2$
	(в)	*	$C_2$	$C_2$	*	$C_1$	$C_1$

З неї видно, які саме співвідношення (4) використовуються в кожному із шести алгоритмів для визначення блоків  $C_1$  і  $C_2$  матриці управління  $C$ , а які пропонуються як умови стабілізованості (вони позначені зірочкою).

Проведено порівняльний аналіз усіх шести методів автоматизованого проектування ПЖС нелінійних систем стабілізації, який дозволив виділити з них три конструктивні алгоритми (1-й, 2-й, 6-й), а три неконструктивні (3-й, 4-й і 5-й) відхилити.

Чільне місце в цьому розділі займає дослідження шостого методу ПЖС із верхньою матрицею  $D$  вигляду

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} + D_{21}^T D_{22} D_{21} & D_{21}^T D_{22} \\ D_{22} D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Розглянуто задачу автоматизованого проектування синтезу оптимального керування нелінійними системами методами ПЖС із критерієм узагальненої роботи О. А. Красовського.

Виконано порівняльний аналіз традиційного методу Калмана синтезу оптимального регулятора за квадратичним критерієм якості та методу О. А. Красовського за критерієм узагальненої роботи.

Було досліджено два можливих підходу до оптимізації стабілізуючого управління методами ПЖС. За *першим* з них матриця  $C$  формально прирівнювалась до матриці  $K$  оптимальної стабілізації. *Другий* підхід зводився до адитивного приєднання матриці  $K$  до матриці  $C$ , у результаті чого сумарна матриця  $C + K$  вже забезпечує не лише стабілізацію нелінійної системи, але й мінімізує критерій узагальненої роботи.

Нелінійна задача стабілізації математичного маятника у верхньому (нестійкому) положенні рівноваги з інтегральним керуванням розглянута як ілюстративний приклад в **четвертому розділі**, який показує можливість і ефективність реалізації методу прямого жорсткого синтезу нелінійних систем стабілізації та відповідної САПР. Шостим алгоритмом цього методу побудовано структуру стабілізуючого регулятора для маятника, що розглядається, і виконана його оптимізація. Проведено математичне моделювання руху маятника без управління (рис. 1), із стабілізуючим управлінням та з оптимальним стабілізуючим управлінням (рис. 2) у середовищі MatLab.

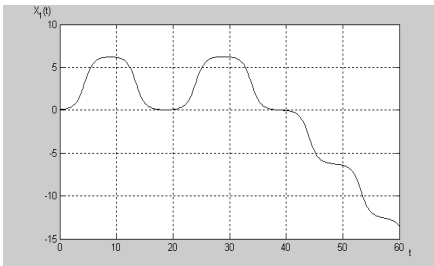


Рис. 1. Рух математичного маятника без керування при початкових умовах  $x_1(0) = 0,1$  (м) на інтервалі  $t \in [0; 60]$ , (сек.)

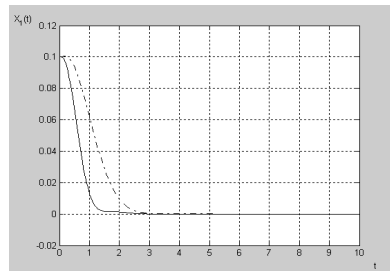


Рис. 2. Рух математичного маятника зі стабілізуючим управлінням (позначено пунктиром) та із сумарним оптимальним стабілізуючим управлінням (позначено суцільною лінією) при початкових умовах  $x_1(0) = 0,1$  (м) на інтервалі  $t \in [0; 10]$ , (сек.)

Виконано порівняльний аналіз результатів роботи з результатами М. М. Красовського та проведено математичне моделювання обох систем САПР з оптимальним управлінням (рис. 3).

Проаналізовано математичну модель автоматичного регулятора підсилення (АРП). Математична модель АРП описується системою лінійних

диференціальних рівнянь, які зв'язують змінні на вході лінійних ланок із змінними на їх виході, та двох нелінійних алгебраїчних рівнянь, що пов'язують змінні на виході нелінійних ланок із змінними на їх вході.

Шостим методом ПЖС НСС розв'язано задачу стабілізації вихідної напруги АРП шляхом синтезу необхідного закону управління.

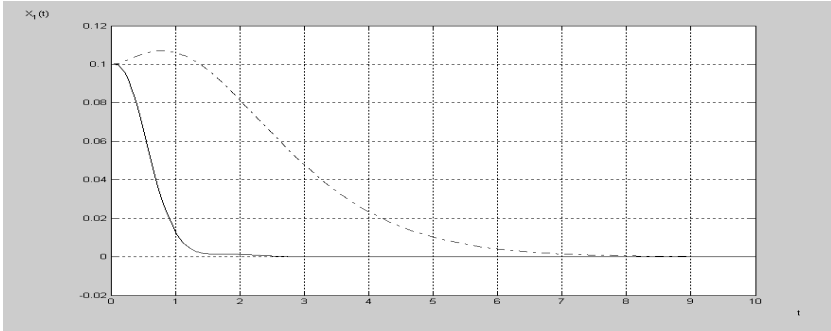


Рис. 3. Порівняльний аналіз руху математичного маятника з оптимальним стабілізуючим управлінням, побудованим в роботі (позначено суцільною лінією), та оптимальним управлінням М. М. Красовського

(позначено «- . -») при початкових умовах  $x_1(0)=0,1$  (м) на інтервалі

$$t \in [0;10], \text{ (сек)}$$

У **п'ятому розділі** розв'язана задача САПР стабілізації кутової орієнтації штучного супутника Землі як нелінійного динамічного об'єкта і побудовано оптимальне стабілізуюче управління його орієнтацією. Проведено математичне моделювання руху ШСЗ з оптимальним та неоптимальним стабілізуючим управлінням в середовищі MatLab.

Спочатку розглядається кінематика ШСЗ у параметрах Родріга-Гамільтона і для неї шукається стабілізуюче управління, що забезпечує задану орієнтацію ШСЗ, яка відповідає певній умові, накладеній на його кутову швидкість  $\omega$ . Тоді заданий програмний рух ШСЗ буде визначатися рівнянням

$$\dot{\lambda}_s = \frac{1}{2}[N(\omega_s) + M^T(\omega_\eta)]\lambda_s, \quad (6)$$

тут  $\omega_\eta = [0 \ 0 \ 0 \ \omega_3]^T$ ,  $\omega_3 = -\sqrt{\mu/R^3}$  – вектор кутової орбітальної швидкості в проекціях на осі орбітальної системи координат,  $\omega_s, \lambda_s$  – програмні значення абсолютної кутової швидкості та орієнтації ШСЗ.

$$M(\omega_s) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s^T \\ \omega_s & U(\omega) \end{bmatrix}, \quad N(\omega_\eta) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_\eta^T \\ \omega_\eta & U^T(\omega) \end{bmatrix}, \quad U(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

У загальному випадку приймалось  $\lambda = \lambda_s + x$ ,  $\omega = \omega_s + u$ , де  $x$  – збурення (відхилення від заданої орієнтації),  $u$  – управління кутовою швидкістю ШСЗ.

Шостим алгоритмом ПЖС знайдено стабілізуюче управління

$$C = M^T(\lambda)[M^T(\omega_\eta) + N(\omega_s) + Q + S], \quad (8)$$

де  $Q = \text{diag}[d_{11}^2 q_{11}^2, d_4^2 q_2^2, d_{22}^2 q_{22}^2]$ ,  $S$  – довільна кососиметрична матриця.

При цьому програмне значення абсолютної кутової швидкості ШСЗ визначається виразом

$$\omega_s^0 = M^T(\lambda_s)N(\lambda_s)\omega_\eta^0 + 2M^T(\lambda_s)\dot{\lambda}_s. \quad (9)$$

Далі розглянуто випадок, коли для точної орієнтації та стабілізації супутника використовуються як виконавчі органи двигуни маховиків.

Математична модель динаміки механічної системи, що складається з твердого тіла (ШСЗ) з діагональним тензором інерції  $J_*$  та  $N$  маховиків має вигляд

$$J_* \dot{\omega} + U(\omega)J_*\omega + G\dot{q}_z + U(\omega)Gq_z = 0, \quad (10)$$

де  $\omega$  – абсолютна кутова швидкість ШСЗ в проєкціях на осі  $z$ , зв'язані з ШСЗ;  $q_z$  – кінематичні моменти маховиків,  $G$  – матриця, що дозволяє з чотирьох маховиків вибрати три робочі;  $G = [I_3, 0]$ ;  $U(\omega)$  – матриця коефіцієнтів з (7).

Покладемо формально в рівнянні (10)

$$G\dot{q}_z + U(\omega)Gq_z = u_z \quad (11)$$

(тут  $u_z \in \mathbf{R}_{3 \times 1}$  – вектор управління ШСЗ з використанням маховиків). Тоді з нього матимемо задачу синтезу управління кутовою швидкістю ШСЗ

$$J_* \dot{\omega} + U(\omega)J_*\omega + u_z = 0. \quad (12)$$

Необхідно синтезувати в рівнянні (12) таке управління  $u_z$ , щоб  $\omega$  прямувало до  $\omega_s$  – заданого значення кутової швидкості з (9).

При розв'язанні цієї задачі отримано матрицю управління

$$C_1 = J_*[\tilde{A}_1(\omega, \omega_s) + (Q_1 + S_1)D_1], \quad (13)$$

тут  $\tilde{A}_1$  – відповідна матриця коефіцієнтів,  $S_1$  – довільна кососиметрична матриця,  $D_1 = \text{diag}[d_{11}^2, d_4^2, d_{22}^2]$ ,  $Q_1 = \text{diag}[d_{11}^2 q_{11}^2, d_4^2 q_2^2, d_{22}^2 q_{22}^2]$ .

Остаточно застабілізований рух ШСЗ описується рівнянням

$$\dot{\omega} = -(Q_1 + S_1)D_1(\omega - \omega_s) + \tilde{A}(\omega_s)\omega_s, \quad (14)$$

де позначено

$$\tilde{A}(\omega_s) = \begin{bmatrix} 0 & J_{21}\omega_3^* & -J_{31}\omega_2^* \\ -J_{12}\omega_3^* & 0 & J_{32}\omega_1^* \\ J_{13}\omega_2^* & -J_{23}\omega_1^* & 0 \end{bmatrix}, \quad J_{ij} = \frac{J_i}{J_j}.$$

Отримано управління, яке забезпечує оптимальну стабілізацію супутника, у вигляді

$$u_{omn} = -\tilde{A}_1 D_1^{-1} - J_*^{-1} R, \quad (15)$$

тут  $R = \text{diag}[r_1^2, r_2^2, r_3^2]$  – додатно визначена матриця вагових коефіцієнтів з критерію якості, а рівняння замкнутої системи з оптимальним управлінням матиме вигляд

$$\dot{\omega} = \tilde{A}(\omega)\omega - J_*^{-1} u_{omn}(\omega - \omega_s). \quad (16)$$

Кутовий рух КА, промодельований методом Рунге-Кутта в середовищі MatLab зі стабілізуючим та оптимальним стабілізуючим управлінням за початкових умов  $\omega(0) = [0,1; 0,1; 0,1]$ , заданих кутових швидкостях  $\omega_{s1} = -0,01$ ,  $\omega_{s2} = -0,02$ ,  $\omega_{s3} = -0,03$  і значеннях коефіцієнтів  $J_1 = 30$ ,  $J_2 = 35$ ,  $J_3 = 40$ ,  $d_{11} = 0,5$ ;  $d_4 = 0,7$ ;  $d_{22} = 0,9$ ;  $q_{11} = 5$ ,  $q_2 = 7$ ,  $q_{22} = 9$ ,  $r_1 = 1,5$ ;  $r_2 = 3,7$ ;  $r_3 = 7,8$ , представлений на рис. 4–6.

З них випливає, що отримане оптимальне управління ШСЗ забезпечує стійкість системи значно раніше за неоптимальне – оптимальне керування підвищує якість стабілізації ШСЗ в середньому на 30 %.

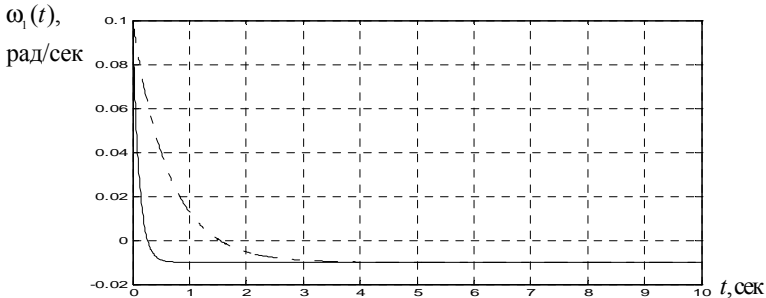


Рис. 4. Кутова швидкість  $\omega_1(t)$  супутника зі стабілізуючим неоптимальним (позначено штрих-пунктиром) та оптимальним управлінням (позначено суцільною лінією) при початкових умовах  $\omega_1(0) = 0,1$ ,  $t \in [0;10]$  і заданому значенні  $\omega_{s1} = -0,01$

У цьому розділі розглядаються також основні способи розв'язання задач спостереження. Ставиться задача стабілізації спостерігачів стану нелінійних систем в умовах невизначеності та знаходиться її розв'язок шостим алгоритмом ПЖС НСС. У САПР будується асимптотично стійкий

спостерігач стану ШСЗ за магнітометричною інформацією і за інформацією з ДКШ в умовах невизначеності та досліджується стабілізація ШСЗ з використанням цієї інформації.

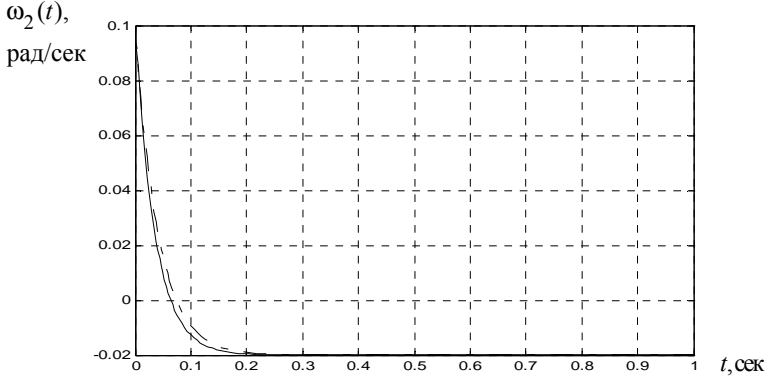


Рис. 5. Кутова швидкість  $\omega_2(t)$  супутника зі стабілізуючим неоптимальним (позначено штрих-пунктиром) та оптимальним управлінням (позначено суцільною лінією) при початкових умовах  $\omega_2(0) = 0,1$ ,  $t \in [0;1]$  і заданому значенні  $\omega_{s_2} = -0,02$

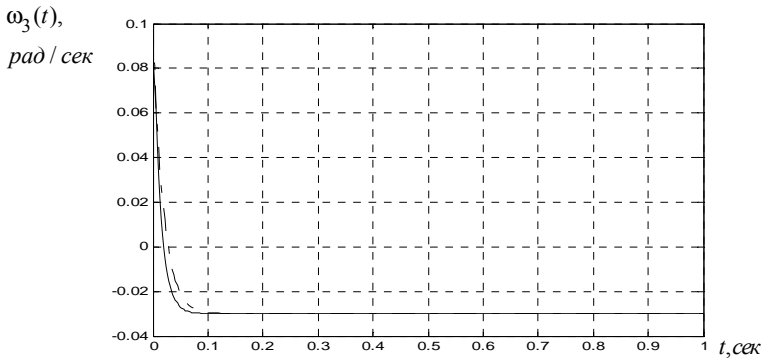


Рис. 6. Кутова швидкість  $\omega_3(t)$  супутника зі стабілізуючим неоптимальним (позначено штрих-пунктиром) та оптимальним управлінням (позначено суцільною лінією) при початкових умовах  $\omega_3(0) = 0,1$ ,  $t \in [0;1]$  і заданому значенні  $\omega_{s_3} = -0,03$

Проведено моделювання похибок спостереження стану штучного супутника Землі, яке обумовило такі висновки:



1) Методи ПЖС НСС дозволяють розв'язувати не лише задачі синтезу систем стабілізації, але й задачі спостереження.

2) Якість стабілізації супутника із спостережником у середньому на 28 % гірша за якість його стабілізації при застосуванні в регуляторі точних значень відхилень його кутових швидкостей.

## ВИСНОВКИ

У процесі виконання досліджень отримані нові наукові результати, які можна використовувати для підвищення точності стабілізації нелінійних об'єктів шляхом автоматизованого проектування структури оптимальних за квадратичним критерієм якості їх регуляторів, синтезованих методами прямого жорсткого синтезу стабілізованих систем.

Основні результати роботи такі:

1. Запропонована нова структура САПР розв'язання задачі стабілізації нелінійних об'єктів, яка за рахунок використання блоків стабілізації та оптимізації регулятора підвищує ефективність розв'язання задач оптимальної стабілізації нелінійних систем.

2. Вперше одержана і досліджена процедура реалізації шостого методу ПЖС НСС з верхньою матрицею коефіцієнтів квадратичної форми – функції Ляпунова. Його застосування до стабілізації математичного маятника та АРП в розд.4 і до стабілізації нелінійної математичної моделі руху штучного супутника Землі (ШСЗ) в розд.5 показали високу ефективність цього методу при синтезі стабілізуючого керування нелійними об'єктами.

3. Застосування вперше запропонованої та розробленої в роботі процедури оптимізації методів ПЖС сприяє підвищенню точності стабілізації нелінійних систем і мінімізує квадратичний критерій якості О.А. Красовського.

4. Шостим алгоритмом методу ПЖС побудовано структуру стабілізуючого регулятора для математичного маятника у верхньому (нестійкому) положенні рівноваги з інтегральним керуванням і вперше виконана оптимізація цього регулятора, що покращує якість стабілізації математичного маятника загалом на 25 %.

5. Порівняно з оптимальним стабілізуючим управлінням М.М. Красовського, побудованого для цього ж маятника, але в лінійному наближенні, синтезований в дисертаційній роботі оптимальний регулятор для нелінійного варіанту покращує якість стабілізації математичного маятника в середньому на 50 %.

6. Вперше розв'язано задачу стабілізації вихідної напруги АРП, за рахунок синтезованого шостим методом ПЖС НСС закону управління, що доводить доцільність застосування знайденого закону управління з метою одержання постійної заданої напруги на виході АРП.

7. Вперше знайдено стабілізуючий закон управління орієнтацією ШСЗ шостим методом ПЖС та виконано оптимізацію процесу стабілізації ШСЗ за

квадратичним критерієм якості О. А. Красовського. Математичне моделювання руху супутника з оптимальним та неоптимальним стабілізуючим управлінням в середовищі MatLab показало, що його оптимальне управління підвищує якість стабілізації в середньому на 30 %.

8. Вперше побудовано асимптотично стійкий спостерігач стану ШСЗ за магнітометричною інформацією і за інформацією з датчика кутової швидкості в умовах невизначеності та досліджено стабілізацію ШСЗ з використанням цієї інформації. Моделювання похибок спостереження стану штучного супутника Землі показало, що якість стабілізації супутника із спостережником у середньому на 28 % гірша за якість його стабілізації при застосуванні в регуляторі точних значень відхилень його кутових швидкостей.

### **СПИСОК ОПУБЛКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Сусол М. Н. Применение шестого алгоритма синтеза систем стабилизации к нелинейным объектам / С. М. Онищенко, Н. П. Коваленко, М. Н. Сусол // Проблемы информатизации та управління. К. : НАУ, 2005. – Вип. 2(13). – С. 73–77.

2. Сусол М. Н. К проблеме стабилизации нелинейных систем / М. Н. Сусол // V Международная НТК «Гиротехнологии, навигация и управление движением»: Сборник докладов. К.: НТУУ «КПИ», 2005. – С. 327–334.

3. Сусол М. Н. Анализ алгоритмов жесткого синтеза нелинейных систем стабилизации / Е. Л. Клименко, Н. П. Коваленко, С. М. Онищенко, М. Н. Сусол // Проблемы управления и информатики. – 2006 – № 4. – С. 30–39.

4. Сусол М. Н. Анализ методов прямого жесткого синтеза нелинейных систем стабилизации / Е. Л. Клименко, Н. П. Коваленко, С. М. Онищенко, М. Н. Сусол // VIII Крымская международная математическая школа. «Метод функций Ляпунова и его приложения». – Симферополь: ТНУ, 2006. – С. 80.

5. Сусол М. Н. Анализ условий стабилизируемости нелинейных систем шестым алгоритмом синтеза / М. Н. Сусол // Матеріали Міжнародної наукової конференції студентів та молодих учених «Політ–2006». – К. : НАУ, 2006. – С. 200.

6. Сусол М. Н. Оптимизация методов жесткого синтеза нелинейных систем стабилизации / С. М. Онищенко, М. Н. Сусол // Thesis of International Conference “Dynamical System Modeling and Stability Investigation” / May 22 – 25, 2007. – К. : КНУ. – 2007. – С. 76.

7. Малоед М. Н. Методы жесткого синтеза нелинейных систем стабилизации и их аддитивная оптимизация / М. Н. Малоед // Материалы X Международной конференции (5–10 июня 2008 года) «Устойчивость,

управление и динамика твердого тела». – Донецк: Ин-т прикладной математики и механики НАНУ. – 2008. – С. 135–136.

8. Малоед М. Н. Жесткие методы оптимальной стабилизации нелинейных систем / М. Н. Малоед // Материалы IX Крымской Международной математической школы «Метод функций Ляпунова и его приложения»: Таврический национальный ун-т. – Симферополь. – 2008. – С. 111.

9. Малоед М. М. Адитивна оптимальна стабілізація нелінійних систем методами жорсткого синтезу / М. М. Малоед // Автоматика–2008: доповіді XV міжнародної конференції з автоматичного управління, 23–26 вересня 2008 р. – Одеса: ОНМА. – С. 858–861.

10. Малоед М. Н. Оптимизация методов жесткого синтеза нелинейных динамических систем /М. Н. Малоед, С. М. Онищенко // Збірка доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки» / 23–24 квітня 2009 р., м. Київ. – К. : НТУУ «КПІ», 2009. – С. 145–151.

11. Малоед М. М. Стабілізація нелінійних систем оптимальними методами прямого жорсткого синтезу / М. М. Малоед, С. М. Онищенко // Проблеми динаміки та стійкості багатовимірних систем / Зб. Праць Ін-ту математики НАН України. – 2009. – Т.6, № 3. – С. 169–177.

12. Малоед М. Н. Оптимальная стабилизация математического маятника в верхнем неустойчивом положении равновесия / М. Н. Малоед, С. М. Онищенко // Проблеми аналітичної механіки / Зб. Праць Ін-ту математики НАН України. – 2010. – Т. 7, № 3. – С. 330–344.

13. Малоед М. М. Оптимізація стабілізуючого управління математичним маятником / М. М. Малоед // Електроніка та системи управління. – К. : НАУ, 2011. – № 1(27). – С. 78–83

14. Малоед М. М. Оптимальная стабилизация математического маятника в верхнем положении равновесия / М. Н. Малоед, С. М. Онищенко // International Conference “Dynamical System Modeling and Stability Investigation”: Thesis of Conference Report / May 25–27, 2011. – К. : КНУ, 2011. – С. 375.

15. Малоед М. М. Оптимальна стабілізація супутника / М. М. Малоед // Проблеми інформатизації та управління. К. : НАУ, № 3(35). – 2011. – С. 68–76.

16. Малоед М. М. Побудова оптимального управління супутником / М. М. Малоед, С. М. Онищенко // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, 21–22 листопада 2011 р., м. Київ. – К. : НАУ, 2011. – С. 75.

17. Малоед М. М. Моделювання автоматичного регулятора підсилення / М. М. Малоед // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної

конференції молодих учених і студентів, 28–29 листопада 2012 р., м. Київ. – К. : НАУ, 2012. – С. 57.

18. Малоед М. Н. Математическое моделирование автоматического регулятора усиления с обратной связью / М. Н. Малоед, И. Г. Прокопенко // Тези доповідей науково-технічної конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM», 28–30 листопада 2012 р., м. Київ. – К. : НАУ, 2012. – С. 77.

19. Малоед М. М. Спостереження стану штучного супутника Землі «Січ-2» / М. М. Малоед, С. М. Онищенко // Збірка доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки» / 17–18 квітня 2013 р., м. Київ: – К. : НТУУ «КПІ». – 2013. – С. 112–121.

20. Малоед М. М. Дослідження проблеми спостереження стану штучного супутника Землі / М. М. Малоед // Тези доповідей науково-технічної конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM», 17–19 листопада 2014 р., м. Київ. – К. : НАУ, 2014. – С. 85.

21. Малоед М. М. Дослідження проблеми спостереження вектора стану нелінійної динамічної системи / М. М. Малоед // Тези доповідей науково-технічної конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM», 21–23 листопада 2018 р., м. Київ. – К. : НАУ, 2019. – С. 42.

## АНОТАЦІЯ

**Малоед М. М. Автоматизоване проектування оптимальних систем стабілізації нелінійних динамічних об'єктів.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – Системи автоматизації проектувальних робіт. – Національний авіаційний університет, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню задач підвищення точності стабілізації нелінійних об'єктів шляхом автоматизованого проектування структури оптимальних за квадратичним критерієм якості їх регуляторів, синтезованих методами прямого жорсткого синтезу стабілізованих систем.

Запропонована нова структура САПР розв'язання задачі стабілізації нелінійних об'єктів, яка за рахунок використання блоків стабілізації та оптимізації регулятора підвищує ефективність розв'язання задач оптимальної стабілізації нелінійних об'єктів.

Проведено порівняльний аналіз шести методів ПЖС, який дозволив виділити з них три конструктивні – 1-й, 2-й та 6-й – і відхилити методи 3-й, 4-й і 5-й як неконструктивні.

Досліджено шостий метод жорсткого синтезу нелінійних систем стабілізації (за класифікацією С. М. Онищенко) з верхньою матрицею коефіцієнтів квадратичної форми – функції Ляпунова.

За критерієм узагальненої роботи О. А. Красовського вперше запропонована і досліджена процедура оптимізації методів ПЖС.

Побудована модель кутового руху супутника, керованого чотирма маховиками. Шостим методом ПЖС знайдено стабілізуючий закон управління орієнтацією ШСЗ та виконано оптимізацію цього закону. Проведено математичне моделювання руху супутника з оптимальним та неоптимальним стабілізуючим управлінням в середовищі MatLab. З використанням магнітометричної та швидкісної інформації розв'язана для нього задача спостереження в умовах невизначеності.

Розглянута стабілізація математичного маятника у верхньому (нестійкому) положенні рівноваги з інтегральним керуванням. Шостим алгоритмом методу ПЖС для нього побудована структура стабілізуючого регулятора і виконана його оптимізація.

**Ключові слова:** оптимізація, оптимальне управління, стабілізація, методи прямого жорсткого синтезу (ПЖС), жорстка стабілізація, монотонна стабілізація, математичне моделювання, математичний маятник, штучний супутник Землі, спостереження в умовах невизначеності.

## АННОТАЦІЯ

**Малоед М. Н. Автоматизированное проектирование оптимальных систем стабилизации нелинейных динамических объектов.** - Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектировочных работ. – Национальный авиационный университет, Киев, 2019.

Диссертационная работа посвящена решению задач повышения точности стабилизации нелинейных объектов путем автоматизированного проектирования структуры оптимальных по квадратичному критерию качества их регуляторов, синтезированных методами прямого жесткого синтеза стабилизированных систем.

Проведен анализ всех шести методов ПЖС и сформулированы рекомендации относительно возможности и целесообразности использования каждого из них: выделены три конструктивные методы – 1-й, 2-й та 6-й – и отброшены методы 3-й, 4-й и 5-й как неконструктивные.

Исследован шестой метод жесткого синтеза нелинейных систем стабилизации (по классификации С. М. Онищенко) с верхней матрицей коэффициентов квадратичной формы – функции Ляпунова.

По критерию обобщенной работы А. А. Красовского впервые предложена и исследована процедура оптимизации методов ПЖС.

Рассмотрена стабилизация математического маятника в верхнем (неустойчивом) положении равновесия с интегральным управлением. Шестым методом ПЖС для него построен стабилизирующий регулятор и выполнена его оптимизация. Проведено математическое моделирование колебаний маятника без управления, со стабилизирующим управлением и с оптимальным стабилизирующим управлением в среде MatLab, которое продемонстрировало, что без управления система не устойчива, синтезированное управление делает маятник асимптотически устойчивым, а его оптимизация улучшает качество переходного процесса на 25 %.

Построена модель углового движения искусственного спутника Земли, управляемого четырьмя маховиками; синтезирована структура его системы стабилизации и выполнена ее оптимизация; проведено математическое моделирование движения ИСЗ со стабилизирующим управлением и с оптимальным стабилизирующим управлением в среде MatLab, которое показало, что его оптимальное управление повышает качество стабилизации в среднем на 30 %; с использованием магнитометрической и скоростной информации решена задача наблюдения ИСЗ в условиях неопределенности.

**Ключевые слова:** оптимизация, оптимальное управление, стабилизация, методы прямого жесткого синтеза, жесткая стабилизация, монотонная стабилизация, математическое моделирование, математический маятник, искусственный спутник Земли, наблюдение в условиях неопределенности.

## ANOTATION

**Maloyed M. M. Automated design optimal systems stabilization of nonlinear dynamic objects.** – Manuscript.

Dissertation on the receipt of graduate degree of Ph.D (engineering) on specialty 05.13.12 – Systems of automation of design works. – National Aviation University, Kyiv, 2019.

Dissertation work is devoted to the stabilizing exactness increase tasks decision of the nonlinear systems by the automated planning of the optimal with the quadratic criterion of quality regulators structure synthesized by the direct hard synthesis methods for stabilized systems.

The sixth method of the stabilizing nonlinear systems hard synthesis (by S. Onyshchenko's classification) with the hard matrix coefficients quadratic form – Lyapunov's functions is investigation.

The model of angular motion of the Sputnik with four fly-wheels is built; the mathematical model of its motion with the stabilization control and the optimal stabilization control (created in the work) is conducted in the environment of MatLab.

**Keywords:** optimization, optimal management, stabilizing, methods of direct hard synthesis, hard stabilizing, monotonous stabilizing, mathematical design, mathematical pendulum, space satellite (Sputnic).

Підп. до друку 02.09.2019. Формат 60х84/16. Папір офс.  
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25.  
Тираж 100 пр. Замовлення № 129-1.

Видавець і виготівник  
Національний авіаційний університет  
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002