

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Кусія Сергія Миколайовича «Робастна стабілізація та оптимізація систем керування при наявності обмежених збурень», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.01 – теоретична механіка

**Актуальність теми дисертації.** При дослідженні динамічних систем з невизначеністю та зовнішніми збуреннями виникли сучасні напрямки в теорії керування, основу яких складають задачі робастної стабілізації та  $H_\infty$ -оптимізації. Проблема робастної стабілізації виникає для сім'ї систем, яка визначається параметричною або матрично-функціональною невизначеністю, а методи  $H_\infty$ -оптимізації дозволяють оцінити та мінімізувати вплив обмежених збурень у системі керування. Проблеми (робастної) стабілізації та  $H_\infty$ -оптимізації по вимірюваному виходу за умов неповної інформації про стан навіть для класу лінійних систем керування є досить складними і розв'язані лише в окремих випадках при додаткових обмеженнях. Засновниками теорії  $H_\infty$ -керування вважаються G. Zames, В.А. Francis, J.C. Doyle та ін. Розвиток та узагальнення методів  $H_\infty$ -оптимізації неперервних та дискретних систем керування отримано у роботах Б.Т. Поляка, П.С. Щербакова, Д.В. Баландіна, М.М. Когана, К. Glover, В.А. Francis, Р.Р. Kharconekar, Р. Gahinet, Р. Arkarian та ін.

Дисертаційна робота С.М. Кусія присвячена розробці нових та розвитку відомих методів стабілізації та  $H_\infty$ -оптимізації неперервних та дискретних систем керування, поданих у векторно-матричній формі із урахуванням зовнішніх збурень та аналітичних невизначеностей. Практичне застосування таких методів забезпечує високу надійність та безпеку керованих транспортних, космічних, робото-технічних та ін. об'єктів в реальних умовах. Тому тематика роботи безперечно є важливою і актуальною.

**Огляд змісту та основних результатів роботи.** Дисертаційна робота С.М. Кусія викладена на 136 сторінках друкованого тексту і складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, додатку та списку використаних джерел із 100 найменувань.

У **вступі** обґрунтовано актуальність, відображено наукову новизну та практичну цінність роботи, наведено інформацію щодо апробації результатів та публікацій за темою дисертації.

У **першому** розділі наведено огляд класичної та сучасної літератури з теорії стійкості та стабілізації динамічних систем, перелік основних задач та відомих результатів, пов'язаних з тематикою дисертаційних досліджень.

**Другий** розділ присвячено розробці нових методів побудови стабілізуючих статичних та динамічних регуляторів для багатовимірних

лінійних та нелінійних систем керування, поданих у векторно-матричній формі. Введене поняття  $\alpha$ -стійкості лінійної системи характеризує її асимптотичну стійкість з деяким спектральним запасом. Наведено критерії існування керувань у вигляді статичного та динамічного зворотних зв'язків, які забезпечують  $\alpha$ -стійкість відповідної замкненої системи (теореми 2.1 і 2.2). Показано, що алгоритми стабілізації, які випливають із даних критеріїв, можна застосувати для класу псевдолінійних систем з неперервними функціональними матричними коефіцієнтами. Слід зазначити, що запропонований алгоритм пошуку стабілізуючого динамічного регулятора повного порядку зводиться до розв'язання системи лінійних матричних нерівностей, яке можна здійснити за допомогою комп'ютерної системи Matlab. В п. 2.5 наведено методику робастної стабілізації розглянутих класів систем з невизначеною матрицею коефіцієнтів у вигляді політопа.

**Розділ 3** присвячено розвитку та узагальненню відомих методів теорії  $H_\infty$ -оптимізації неперервних систем керування. Введений критерій якості  $J$  за допомогою узагальнених  $L_2$ -норм характеризує зважений рівень гасіння зовнішніх і початкових збурень в системі відносно її вектора виходу. Аналогічний критерій якості  $J_0$  при нульових початкових умовах раніше використовувався у задачах  $H_\infty$ -оптимізації у випадку одиничних вагових матриць. Використання довільних додатно визначених вагових матриць функціоналу якості дозволяє встановити пріоритети між компонентами векторів виходу, зовнішніх збурень та початкових умов в задачі  $H_\infty$ -оптимізації системи керування. Розглянуто випадки наявності збурюючого вектора у рівняннях регулятора (п. 3.2), а також більш загальна постановка задачі  $H_\infty$ -оптимізації при наявності обмежених збурень у рівняннях руху системи з керованими і спостережуваними виходами (п. 3.4). Сформульовано критерії існування (теореми 3.1–3.4) та алгоритми побудови статичних і динамічних регуляторів, які забезпечують задану оцінку введених критеріїв якості, робастну стійкість та спільну квадратичну функцію Ляпунова замкненої системи. Розглянуто також випадок невизначеності матричних коефіцієнтів системи. Можливості та переваги запропонованих алгоритмів стабілізації та  $H_\infty$ -оптимізації порівняно з відомими продемонстровано на моделях керування одноланкового робота-маніпулятора та лінійного осцилятора з демпфуванням.

У **четвертому** розділі розглядаються лінійні та нелінійні системи керування з дискретним часом. Критерій забезпечення  $\rho$ -стійкості лінійної системи за допомогою статичного регулятора по виходу сформульовано у вигляді двох матричних нерівностей, одна із яких нелінійна. Для її розв'язання розроблено збіжний ітераційний алгоритм, на кожному кроці якого розв'язується система лінійних матричних нерівностей і який продемонстровано на дискретній моделі системи стабілізації гелікоптера.

По аналогії з неперервними системами описано переваги застосування динамічних регуляторів в задачах стабілізації порівняно зі статичними (теорема 4.3). Визначаючи критерії якості  $J$  систем за допомогою зважених  $l_2$ -норм векторів виходу та початкових умов, сформульовано також дискретні аналоги основних результатів розділу 3 стосовно зваженої оцінки та мінімізації впливу зовнішніх і початкових збурень в лінійних та псевдолінійних системах керування (теореми 4.4–4.6). У підрозділі 4.4 наведено результати чисельних експериментів з метою побудови наближених  $J$ -оптимальних статичних регуляторів по стану для дискретної системи стабілізації перевернутого маятника на рухомій платформі.

У додатку на мові системи Matlab наведено алгоритм 3.2 зваженої  $H_\infty$ -оптимізації лінійного осцилятора з керованими і спостережуваними виходами та ітераційний алгоритм 4.1 для дискретної системи стабілізації гелікоптера.

Серед наведених результатів дисертаційної роботи до найбільш вагомих на мій погляд належать: 1) критерії існування динамічних регуляторів по вимірюваному виходу у вигляді матричних нерівностей, які забезпечують асимптотичну стійкість лінійних неперервних та дискретних систем з деяким спектральним запасом; 2) критерії та достатні умови існування регуляторів по вимірюваному виходу, які забезпечують верхні оцінки зваженого рівня гасіння зовнішніх і початкових збурень в лінійних системах керування; 3) алгоритми стабілізації та зваженої  $H_\infty$ -оптимізації неперервних та дискретних систем, їх чисельна реалізація для конкретних механічних систем із застосуванням комп'ютерної системи Matlab.

До роботи маю такі зауваження: 1) У п. 1) алгоритму стабілізації 2.1 не вказаний спосіб знаходження матриць  $X$  і  $X_0$ , які задовольняють співвідношення (2.9) і (2.17). 2) У роботі відсутні практичні рекомендації щодо побудови динамічних регуляторів порядку  $r < n$ , оскільки не зрозуміло, як задовольнити рангові обмеження на шукані матриці у відповідних матричних співвідношеннях. 3) У роботі бажано було б навести приклад нелінійної неперервної або дискретної системи керування, для якої виконуються умови відповідних лем 3.2 і 4.1 для забезпечення верхньої оцінки критеріїв якості  $J$  і  $J_0$ .

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи і не знижують її рівень наукового та практичного значення. В цілому результати роботи викладено послідовно і коректно. Всі твердження та висновки, отримані в дисертації, є математично обґрунтованими та вірними. Автореферат відповідає темі та змісту роботи. Дисертація достатньо повно апробована на семінарах та конференціях. Основні результати опубліковані в десяти роботах у періодичних виданнях, п'ять з яких входять до переліку фахових видань України, а два індексуються у наукометричній базі Scopus (одна робота без співавторів). Вони становлять певний інтерес для фахівців з теорії стійкості та

стабілізації руху механічних об'єктів. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні високонадійних систем стабілізації складних об'єктів механіки та техніки. В цьому полягає її практичне значення.

На підставі наведеного вважаю, що дисертаційна робота Кусія Сергія Миколайовича «Робастна стабілізація та оптимізація систем керування при наявності обмежених збурень» є цілісною науковою працею, що відповідає вимогам пп. 11, 12 та 13 «Порядку присудження наукових ступенів» (Постанова КМУ від 24 липня 2013 р. № 567), що висуваються до кандидатських дисертацій за спеціальністю 01.02.01 – теоретична механіка, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.

Доктор фіз.-мат. наук, доцент,  
провідний науковий співробітник  
Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка  
НАН України

В.І. Слинько

Підпис В.І. Слинька засвідчую.

Вчений секретар Інституту механіки  
ім. С.П. Тимошенка НАН України  
доктор фіз.-мат. наук

22.12.2017



О.П.Жук

Надійшов до  
вченої ради  
секретар ради

спеціалізованої  
Канцелярія



26.12.2017р.

1 Артемченко М.І.