

## ВІДГУК

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

*Актуальність теми дисертації.* Дисертаційна робота С.М.Кусія присвячена розробці нових та розвитку існуючих методів синтезу стабілізуючих законів керування для динамічних систем, що описуються диференціальними та різницевиими рівняннями з елементами невизначеності. Невизначеність в рівняннях руху об'єкта може бути обумовлена наявністю неточно заданих параметрів або функцій, неконтрольованих зовнішніх збурень тощо. На практиці і в теоретичних дослідженнях, пов'язаних з проблемою робастної стабілізації динамічних систем, невизначеності в рівняннях руху та зворотного зв'язку найчастіше описуються у вигляді інтервальних, полієдральних або афінних множин у відповідних матричних просторах. Методи сучасної теорії  $H_\infty$ -керування розв'язують проблему (робастної) стабілізації та забезпечують бажану оцінку та мінімізацію рівня впливу обмежених зовнішніх збурень на динаміку замкненої керованої системи. Основи даної теорії викладено в роботах Б.Т. Поляка, П.С. Щербакова, G. Zames, В.А. Francis, J.C. Doyle, P. Gahinet, Р. Arkarian та ін. Слід зазначити, що задачі стабілізації руху та пониження впливу зовнішніх збурень у системах керування з елементами невизначеності складають основу математичних досліджень, які проводяться при проектуванні нових транспортних, космічних та ін. технічних об'єктів. Отже, тематика дисертаційної роботи є, безперечно, важливою і актуальною.

*Огляд змісту та основних результатів роботи.* Дисертаційна робота викладена на 136 сторінках друкованого тексту. Вона складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатку та списку використаної літератури.

У **вступі** та **першому** розділі обґрунтовується актуальність тематики дисертації та її практичне значення, формулюються основні результати автора, наводиться огляд відомих результатів, пов'язаних з аналізом стійкості та стабілізації динамічних систем з невизначеними параметрами.

У **другому** розділі викладено критерії існування стабілізуючих керувань у вигляді статичних та динамічних регуляторів по вимірюваному виходу для лінійних і псевдолінійних систем з неперервно залежними від стану матричними коефіцієнтами (теореми 2.1–2.3). Наведений алгоритм

2.1 побудови стабілізуючого динамічного регулятора у випадку повного порядку  $r=n$  зводиться до розв'язання системи лінійних матричних нерівностей і легко може бути реалізований в комп'ютерній системі Matlab.

**Третій** розділ присвячено розвитку відомих методів теорії  $H_\infty$ -оптимізації для неперервних систем керування з функціоналами якості  $J$ , які характеризують зважений рівень гасіння зовнішніх і початкових збурень відносно вектора керованого виходу. Критерії існування статичних і динамічних регуляторів, які забезпечують задану верхню оцінку функціоналу  $J$ , а також робастну стійкість замкненої системи зі структурованою невизначеністю вектора збурень і спільну квадратичну функцію Ляпунова, сформульовано у вигляді теорем 3.1–3.4 на основі допоміжних лем 3.1–3.3 і леми Шура. При цьому розглянуто випадки присутності вектора збурень у рівняннях регулятора (п. 3.2) та у рівняннях руху системи і її виходів (п. 3.4). Алгоритми побудови динамічних регуляторів 2.1 і 3.1 реалізовано на прикладі нелінійної системи стабілізації одноланкового робота-маніпулятора. Можливості алгоритму 3.1 продемонстровано також в задачі гасіння коливань лінійного осцилятора з демпфуванням.

У **четвертому** розділі наводяться дискретні аналоги основних тверджень розділів 2 і 3 для класів лінійних та псевдолінійних систем керування. При цьому виявлені деякі переваги методів розв'язання задач стабілізації та  $H_\infty$ -оптимізації для дискретних систем, порівняно з неперервними. Зокрема, на основі теореми 4.1 сформульовано збіжний ітераційний алгоритм побудови стабілізуючого статичного регулятора по вимірюваному виходу, на кожному кроці якого розв'язується система лінійних матричних нерівностей. Даний алгоритм продемонстровано на прикладі дискретної системи стабілізації гелікоптера. На прикладі дискретної моделі руху перевернутого маятника на рухомій платформі продемонстровано нові можливості методики зваженої  $H_\infty$ -оптимізації.

#### ***Наукова новизна та практичне значення результатів дисертації.***

Серед основних наукових результатів дисертаційної роботи С.М. Кусія можна виділити наступні. Встановлено критерії існування та розроблено алгоритми побудови статичних та динамічних регуляторів по вимірюваному виходу, які забезпечують асимптотичну стійкість лінійних систем керування. Для класів лінійних неперервних та дискретних систем з керованими і спостережуваними виходами розроблено методику побудови динамічних регуляторів з нульовим початковим вектором, які забезпечують робастну стійкість та задану оцінку зваженого рівня гасіння зовнішніх і початкових збурень. Розроблені алгоритми синтезу систем за допомогою статичних регуляторів по стану або динамічних регуляторів повного порядку зводяться до розв'язання лінійних матричних нерівностей. Обґрунтовано можливість застосування даних алгоритмів до



більш загального класу псевдолінійних систем з неперервними матричними функціями. Отримані результати та можливості їх подальшого практичного використання продемонстровано на конкретних прикладах механічних систем.

**Обґрунтованість і достовірність основних положень і висновків** підтверджується строгим доведенням результатів на основі логічного використання відомих фактів з теорії стійкості та матричного аналізу, а також порівняння з відомими результатами інших авторів та проведення чисельних експериментів з використанням засобів комп'ютерної техніки.

Автореферат дисертації правильно відображає основний зміст роботи. Основні результати дисертації опубліковано у п'яти наукових роботах у фахових виданнях, дві із яких журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus. Вони достатньо апробовані на семінарах та міжнародних конференціях. Дисертацію та автореферат оформлено відповідно до встановлених вимог.

#### **Зауваження.**

1) Задачу досягнення бажаної оцінки зваженого рівня гасіння обмежених збурень, які присутні лише в рівняннях регулятора можна сформулювати у вигляді аналогічної задачі для системи з керованими і спостережуваними виходами. Тому твердження теорем 3.1 і 3.2 можна сформулювати як наслідки відповідних теорем 3.3 і 3.4.

2) Викладення результатів для систем з керованими і спостережуваними виходами типу (3.30) можна спростити, припустивши, що матричний коефіцієнт  $D_{22}$  нульовий. Дане припущення використовувалось, наприклад, у роботах Д.В. Баландіна і М.М. Когана, оскільки воно суттєво не впливає на складність доведення основних тверджень.

3) В роботі часто використовуються нерівності з матричними виразами. Наприклад, співвідношення  $X \geq X_0 > 0$  на с.17 означає, що  $X_0$  є додатно визначеною матрицею, а різниця  $X - X_0$  невід'ємно визначена. Але ті ж самі знаки нерівностей зазвичай в науковій літературі використовуються для позначення позитивності (негативності) матриць. Тому всі відповідні знаки матричних нерівностей необхідно було б внести у перелік умовних позначень на с.9.

4) У викладках та тексті роботи зустрічаються деякі описки, наприклад, на с.41 у формулі першої строчки пропущено знак транспонування над матрицею.

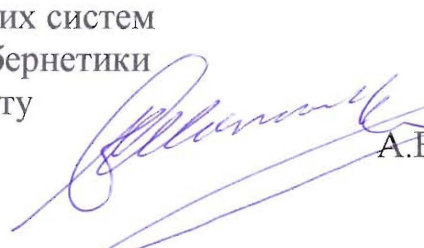
5) У авторефераті бажано було б означити поняття інерції матриці, а також використані знаки матричних нерівностей.

Наведені зауваження не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи і не понижують її теоретичне і практичне значення.

В цілому робота викладена послідовно і коректно.

На основі 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.

Кандидат фіз.-мат. наук, доцент,  
доцент кафедри моделювання складних систем  
факультету комп'ютерних наук та кібернетики  
Київського національного університету  
імені Тараса Шевченка

  
А.В. Шатирко

26.12  
  


Надійшов до спеціалізованої  
вченої ради Д.26.206.02 26.12.2017р.  
секретар ради  Артемчук А.В.1