

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Калоші Юлії Ігорівни «Керування багаточастотними коливаннями гібридних механічних систем» представленої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.01 — теоретична механіка

**Актуальність теми дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота “Керування багаточастотними коливаннями гібридних механічних систем” присвячена задачам стабілізації та спостереження математичних моделей руху гібридної механічної системи, яка містить пружні та абсолютно тверді елементи, а також дослідженню збіжності одного з методів апроксимації для моделі консольної пружної балки.

Задача стабілізації коливань пружних тіл є актуальною у сучасній теорії керування. Гасіння коливань є важливою проблемою при дослідженні різного роду механічних систем з розподіленими параметрами. З методами аналізу стійкості та стабілізації руху динамічних систем можна познайомитись в роботах М.М. Красовського, О.Л. Зуєва, В.І. Коробова, А.А. Мартинюка, J.E. Lagnese, G. Leugering, E.D. Sontag, W. Krabs, Г.М. Скляра та ін. Вкрай важливою є задача спостереження, яка полягає у відновленні інформації про стан системи за наявності обмежених вихідних даних. Отже, тематика дисертаційного дослідження є важливою і актуальною.

Тема роботи пов'язана з планами наукових досліджень відділу технічної механіки Інституту прикладної математики і механіки НАН України на 2011–2014 роки та відділу прикладної механіки Інституту прикладної математики і механіки НАН України на 2016–2023 роки.

**Огляд змісту та основних результатів роботи.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Дисертацію викладено на 165 сторінках друкованого тексту.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, відзначено наукову новизну, теоретичне та практичне значення отриманих результатів, надано інформацію щодо апробації результатів дисертації.

У першому розділі наведено аналіз літературних джерел та методик досліджень за темою дисертаційної роботи. Надано огляд основних результатів робіт, які стосуються стійкості руху механічних систем з розподіленими параметрами, задач спостереження динамічних систем та методів знаходження наближених розв'язків рівнянь руху пружних балок. Методика досліджень спирається на класичні методи аналітичної механіки: метод функцій Ляпунова для аналізу стійкості, принцип інваріантності ЛаСалля для отримання достатніх умов асимптотичної стійкості, метод Луенбергера синтезу динамічного спостерігача, метод Гальоркіна для апроксимації розв'язків, методи теорії напівгруп операторів у нескінченновимірних просторах для аналізу умов коректної постановки початкової задачі.

У другому розділі запропоновано нову математичну модель коливань гібридної системи, що складається з гнучкої балки, приєднаного твердого тіла та розподілених

механізмів керування. На основі методу Ляпунова отримано керування у вигляді зворотного зв'язку, яке забезпечує стійкість стану рівноваги такої системи (теорема 2.2). В результаті вивчення властивостей диференціального оператора доведено коректність абстрактної задачі Коші (теорема 2.1).

У третьому розділі досліджено спектральні властивості інфінітезимального генератора, проаналізовано асимптотичний розподіл власних частот коливань балкової системи. Показано, що за певних умов неколокації приводів стан рівноваги системи є асимптотично стійким. На основі вивчення властивостей резольвенти диференціального оператора четвертого порядку доведено властивість передкомпактності траєкторій системи зі зворотним зв'язком. Основним результатом даного розділу є теорема 3.3, у якій наведено достатні умови асимптотичної стійкості замкненої системи.

Четвертий розділ дисертації присвячено задачам спостереження динамічних систем з виходом. Запропоновано алгоритм побудови системи-спостерігача типу Луенбергера, яка дозволяє з високою точністю відновити вектор стану за умови наявності неповної вихідної інформації. Збіжність запропонованого спостерігача доведено на основі аналізу похибки спостережень для скінченновимірної та нескінченновимірної моделей. Показано, що тривіальний розв'язок системи в похибках є асимптотично стійким. Основний результат цього розділу сформульовано у вигляді теореми 4.6, у якій наведено умови збіжності спостерігача для нескінченновимірної системи з виходом. Цей результат є застосовним до широкого класу динамічних систем, у роботі показано його застосування до розглянутої моделі пружної балки з точковою масою.

У п'ятому розділі розглянуто задачу про коливання пружної балки з умовами консольного закріплення. За допомогою методу Гальоркіна побудовано систему наближених розв'язків відповідної початково-крайової задачі. Доведено збіжність отриманої системи до узагальненого розв'язку початково-крайової задачі.

Основні результати роботи проілюстровано за допомогою чисельного моделювання.

**Обґрунтованість і достовірність основних положень і висновків** забезпечується строгістю і коректністю математичних моделей і постановок задач і підтверджується узгодженістю результатів чисельного моделювання конкретних механічних систем з теоретичними висновками.

**Наукова новизна та практичне значення результатів дисертації.** Усі результати роботи є новими і мають насамперед теоретичне значення, вони представляють внесок у розвиток лінійної теорії систем керування і спостереження. Розроблені методи та алгоритми можуть бути застосовані при проєктуванні роботизованих маніпуляторів з гнучкими ланками, також для гасіння вібрацій у підвісках роботизованих транспортних засобів.

Результати дисертаційної роботи достатньо апробовані, вони доповідались на конференціях і семінарах в наукових установах України та за кордоном. За результатами роботи опубліковано 6 статей у фахових виданнях та 14 тез у матеріалах міжнародних наукових конференцій.

Автореферат повністю та правильно відображає зміст дисертації.

### Зауваження:

1. Назва дисертації вказує на дослідження руху широкого класу гібридних механічних систем, водночас в роботі розглядається тільки одна гібридна система.
2. У розділі 2 наводиться перевірка замкненості оператора системи (наслідок 2.1). Проте, ця властивість не є необхідною для застосування теореми Люмера-Філліпса про інфінітезимальний генератор.
3. Вибір керування у вигляді зворотного зв'язку (2.18), що містить вільні параметри  $\alpha_i$ , неоднозначний. Варто провести аналіз такого вибору з точки зору досягнення бажаних властивостей керованої системи (оптимізація). Аналогічна неоднозначність має місце при виборі вільних параметрів  $\gamma_i$  в задачі синтезу спостерігача (4.22) для системи (4.16), (4.17).
4. Умови збіжності спостерігача отримані в загальному вигляді для системи з довільною кількістю сенсорів. При цьому чисельні розрахунки проведено для системи з одним виходом. Для ілюстрації умов збіжності спостерігача доцільно було б розглянути, крім системи з одновимірним виходом, приклади моделі з декількома вихідними сигналами.
5. Наступні наукові праці мають безпосереднє відношення до досліджуваної в дисертації тематики, але не були згадані у переліку використаних джерел:
  - a. M. Tucsnak, G. Weiss, Observation and control for operator semigroups, Birkh"auser Advanced Texts, Birkh"auser Verlag, Basel, 2009.
  - b. E. Tr'elat, G. Wang, Y. Xu, Characterization by observability inequalities of controllability and stabilization properties, Pure and Applied Analysis 2 (2020), no. 1, 93–122.
  - c. Bao-Zhu Guo, Jun-Min Wang. Control of Wave and Beam PDEs: The Riesz Basis Approach Springer, 2019.

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

В цілому робота викладена послідовно і коректно. Дисертація написана українською мовою у відповідності до вимог МОН України про мову та стиль написання дисертацій. Форма викладення матеріалу відповідає прийнятій у науковій літературі. Тематика дисертаційної роботи повністю відповідає паспорту спеціальності 01.02.01 – теоретична механіка.

Враховуючи сказане, вважаю, що дисертація «Керування багаточастотними коливаннями гібридних механічних систем» є цілісною науковою працею, що задовольняє всі вимоги пп. 9, 11-14 «Порядку присудження наукових ступенів», постанова Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, внесеними Постановою КМУ №607 від 15.07.2020 р.) щодо кандидатських дисертацій, а її авторка Калоша Юлія Ігорівна заслуговує на присудження їй вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.01 — теоретична механіка.

Офіційний опонент  
член-кореспондент НАН України,  
доктор фізико-математичних наук, професор,  
провідний науковий співробітник  
Інституту математики НАН України

*Надійшло до докторської ради  
26.10.24 04.05.2024 р.  
сироту рад Н-1/Брїсмицько М.1*

