

Відгук офіційного опонента
на дисертаційну роботу Хорошуна Анатолія Сергійовича
«Метод функцій Ляпунова в задачах стійкості, керування та стабілізації неточних
різнотемпових механічних систем», подану на здобуття наукового ступеня доктора
фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.01 – теоретична механіка

Деякі механічні системи настільки складні, що їх точний аналіз за допомогою існуючого математичного апарату пов'язаний із значними обчислювальними труднощами. Тому, при побудові математичних моделей таких систем, вони спрощуються шляхом виключення або заміни (зазвичай, лінеаризації) деяких характеристик. Такі спрощення можуть призводити не тільки до кількісних, а й до якісних відмінностей в поведінці моделі і заданої системи, оцінити які може виявитися неможливо. Зокрема, до таких задач відноситься дослідження якісної поведінки систем з "швидкими" і "повільними" змінними. Хоча, існують різні методи аналізу таких систем, більшість із них присвячено побудові розв'язків на скінченному інтервалі часу, тому вони непридатні для дослідження стійкості руху. Іншою проблемою, яка відносно маловивчена, але часто зустрічається на практиці, є наявність в системі неточно заданих параметрів. Близькі задачі розглядаються в теорії абсолютної стійкості, де неточно заданими є деякі функції, варіації яких не змінюють положення рівноваги системи. В той же час, при зміні параметрів, стан рівноваги, зазвичай, також змінюється, що призводить до ускладнення задачі. Для вирішення таких проблем, одним з найбільш ефективних методів є метод функцій Ляпунова. Він не вимагає детальної інформації про систему (що особливо важливо в задачах з неточно заданими функціями і параметрами), а також дозволяє робити висновок про стійкість, не інтегруючи рівняння руху системи. Концепція параметричної стійкості та метод функцій Ляпунова є основними інструментами розв'язання сформульованих в роботі задач. Підсумовуючи сказане, вважаю, що дисертаційна робота Хорошуна А.С. «Метод функцій Ляпунова в задачах стійкості, керування та стабілізації неточних різнотемпових механічних систем», яка присвячена побудові нових і розвитку відомих методів дослідження математичних моделей механічних систем, безсумнівно, присвячена **актуальній** проблемі сучасної теоретичної механіки.

Наведемо короткий огляд досліджень, проведених в даній дисертаційній роботі, та їх результатів.

В **першому** розділі наведено детальний аналіз публікацій за тематикою дисертації. При цьому автор показав широку ерудицію не тільки в російськомовній, а й у світовій науковій літературі щодо математичних методів аналізу динамічних систем. Відповідні публікації проаналізовані з точки зору тематики дисертації. Обґрунтовано актуальність розробки нових і вдосконалення існуючих методів дослідження стійкості та побудови керування для неточних різнотемпових механічних систем.

У **другому** розділі розглядається узагальнена система типу Лур'є–Постнікова, яка допускає виділення "швидких" та "повільних" рухів і містить, разом з невідомою обмеженою функцією, невизначений векторний параметр, що належить деякій області. Система має положення рівноваги, яке неперервно залежить від зазначеного параметра. Запропоновано

новий підхід, що дозволяє знайти достатні умови глобальної асимптотичної параметричної стійкості. Крім того, в явному вигляді знайдені функції Ляпунова для "швидкої" та "виродженої" підсистем, що дозволяють оцінити співвідношення швидких і повільних рухів. Показано, що розвинутий підхід має істотні переваги в порівнянні з відомими результатами такого роду. Отримано також достатні умови параметричної нестійкості відносно певної області у просторі параметрів (для зазначених систем такий результат встановлено вперше).

У **третьому** розділі досліджено неточні різнотемпові системи типу Лур'є–Постнікова, що не допускають виділення "швидкої" та "повільної" підсистем і, отже, застосування розвинутого у розділі 2 підходу неможливе. Для таких систем побудована матричнозначна функція Ляпунова, за допомогою якої отримані достатні умови глобальної параметричної асимптотичної стійкості. Зауважимо, що результати, отримані в третьому розділі, мають самостійне значення, так як для таких систем непридатний метод Тихонова аналізу систем з "швидкими" і "повільними" рухами.

У **четвертому** розділі розглядається стійкість і побудова керування для неточних різнотемпових систем в загальному вигляді, для яких неможливо застосувати метод Тихонова поділу рухів на "швидкі" і "повільні". Крім того, відсутність інформації про стійкість лінеаризованої системи (і, отже, неможливість побудови відповідних лінійних компонент векторної функцій Ляпунова) заважає використати матричнозначну функцію Ляпунова для аналізу параметричної стійкості. Також розглянуто систему у вигляді зв'язаних підсистем, для кожної з яких часові шкали вважаються різними. Побудовано окремі функції Ляпунова для кожної з підсистем і результуючу функцію для всієї системи, що дає змогу встановити для неї достатні умови глобальної асимптотичної параметричної стійкості. Для параметрично нестійкої системи розглянуто проблему стабілізації стану рівноваги. Запропоновано спосіб вибору матриць керування і методу побудови відповідної функції Ляпунова, що дозволяє встановити достатні умови стабілізації.

У **п'ятому** розділі розглядається новий тип математичних моделей – нечітка модель – що вимагає використання принципово нового математичного апарату. Такі моделі зазвичай використовуються в задачах керування та ідентифікації. В дисертації метод функцій Ляпунова вперше застосовано до нечітких різнотемпових систем з неточними параметрами. Отримано достатні умови асимптотичної стійкості нульового положення рівноваги моделі Такагі–Сугено і знайдена область стійкості в просторі параметрів. Побудовано керування, яке стабілізує нульове положення рівноваги зазначеної системи.

Отримані результати використовуються у **шостому** розділі для аналізу конкретних механічних систем, до складу математичних моделей яких входять диференціальні рівняння зі "швидкими" та "повільними" змінними. Запропоновано закон керування напругою двигуна постійного струму послідовного збудження, який забезпечує прямування його кутової швидкості обертання до заданої величини. Побудовані закони керування «малоприводними» роботами, зокрема, обертанням маховика для стабілізації маятника у верхньому положенні рівноваги, обертанням ексцентрикового маховика для стабілізації положення рівноваги TORA, обертанням валу електродвигуна для стабілізації верхнього стану рівноваги маніпулятора із пружним зчленуванням.

Наукова новизна результатів роботи. В дисертаційній роботі Хорошуна А.С. розв'язано ряд нових принципових проблем стійкості, керування та стабілізації неточних різнотемпових механічних систем, побудовано нові методи дослідження математичних моделей механічних систем. Виявлено основні закономірності впливу параметрів, що входять до складу моделі, на її динаміку. Запропоновано способи оцінки областей у просторі параметрів, для значень параметрів з яких динамічні характеристики таких систем зберігаються. Зауважимо також, що результати, отримані в третьому розділі, мають самостійне значення для теорії систем з "швидкими" і "повільними" рухами. Розвинуто спосіб побудови керування для «малоприводних» роботів із урахуванням можливої неточності при моделюванні та запропоновано нові закони керування для стабілізації стаціонарних станів конкретних механічних систем з цього класу.

Практичне значення отриманих у дисертаційній роботі результатів полягає в можливості підвищення надійності та ефективності функціонування механічних систем, які моделюються різнотемповими системами диференціальних рівнянь, завдяки тому, що враховано неточності при моделюванні і розглянуто наявність малого параметра, а також вивчено вплив варіації цих параметрів на динаміку системи.

Теоретичне значення отриманих в роботі результатів полягає в розробці нових способів побудови функцій Ляпунова для аналізу стійкості різних класів неточних різнотемпових систем диференціальних рівнянь. Запропоновані методики можуть застосовуватись у подальшому для розв'язання широкого кола інших задач, що виникають при проектуванні реальних механічних систем.

Застосування коректної постановки вивчених у роботі задач, розробка нових методик аналізу динаміки систем на основі відомих із літератури ефективних методів, порівняння отриманих результатів із аналогічними для більш простих частинних випадків забезпечують **обґрунтованість** та **достовірність** отриманих у роботі результатів. Автором проаналізовано широкий клас реальних механічних систем за допомогою розвинених в дисертації методів. Результати, отримані при цьому, не суперечать фізичній суті задач, що свідчить про їх ефективність і значне прикладне значення.

Структура дисертації, публікації за темою дисертації, оцінка змісту і завершеності та висновки щодо відповідності дисертації встановленим вимогам МОН України. Робота складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаної літератури. Загальний обсяг роботи становить 300 сторінок тексту. Результати дисертаційної роботи з достатньою повнотою відображено у 31 науковій праці, серед яких 21 стаття опублікована у фахових наукометричних виданнях. Результати дисертації достатньо повно пройшли апробацію на конференціях і семінарах. Оформлення, структура і обсяг роботи відповідають вимогам МОН України до докторських дисертацій.

В цілому дисертаційна робота Хорошуна А.С. виконана на досить високому науковому рівні і є цілісним завершеним науковим дослідженням, в якому одержані нові наукові результати, що в сукупності є вагомим внеском у вирішення актуальної наукової проблеми – аналіз та прогнозування якісної поведінки математичних моделей механічних систем та дослідження стійкості руху. Результати та висновки роботи повністю відповідають сформульованій меті та завданням, а автореферат є ідентичним основним положенням

дисертації і у повній мірі відображає її основний зміст. Тема, зміст та результати дисертаційної роботи відповідають паспорту спеціальності 01.02.01 – теоретична механіка.

Зауваження.

1. Деякі розглянуті в дисертації задачі з фіксованим положенням рівноваги можна також розв'язати методами теорії абсолютної стійкості. Було б цікаво відомі результати такого роду одержати запропонованими в дисертації методами та порівняти їх.
2. Окремі терміни, які використано в дисертації, вважаю неточними. Так, положення рівноваги системи, яке залежить від неточно заданих параметрів, природно було б називати не "рухомим", а "неточним" положенням рівноваги. Також термін "великомасштабна" система при наявності відомих понять "багатомірна" або "пов'язана" система здається зайвим.

Наведені зауваження не відносяться до суті отриманих результатів і не впливають на високу оцінку роботи

Висновок. За актуальністю теми, новизною, обсягом виконаних досліджень, практичною та теоретичною цінністю результатів, дисертаційна робота «Метод функцій Ляпунова в задачах стійкості, керування та стабілізації неточних різнометрових механічних систем» відповідає вимогам п.п. 9,10,12,13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19 серпня 2015 р., № 1159 від 30 грудня 2015 р та № 567 від 27 липня 2016 р.), а її автор, Хорошун Анатолій Сергійович, за вирішення актуальної проблеми теоретичної механіки заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.01 – теоретична механіка.

Офіційний опонент,
провідний науковий співробітник відділу
динаміки та міцності нових видів транспорту
Інституту транспортних систем і технологій
НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор

О.А.Зевін

Засвідчую
Зев. відділом кадрів

