

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 зі спеціальності 01.02.01 – теоретична механіка.

Актуальність теми дисертації. Дисертаційна робота присвячена дослідженню класу механічних систем, математичними моделями яких є неточні різнотемпові системи диференціальних рівнянь. Такі моделі відображають наявність у механічній системі малих збурень, а також враховують неточності в параметрах, які можуть з'являтися при моделюванні. Нехтування впливом цих величин на якісну поведінку механічної системи може призвести до суттєвої відмінності прогнозованої поведінки системи від реальної. В роботі зроблено акцент на тих випадках, коли застосування звичайних методів дослідження таких моделей (як-то метод розділення змінних, що базується на класичних результатах А.М. Тихонова) суттєво ускладнене внаслідок, наприклад, нелінійності моделі. Для подолання цих складностей в роботі запропоновано використовувати метод функцій Ляпунова, що дозволяє без побудови розв'язків системи робити висновок про наявність певних її динамічних характеристик на нескінченному часовому інтервалі. Розроблено нові способи побудови допоміжних функцій та за їх допомогою отримано нові достатні умови параметричної стійкості для деяких класів неточних різнотемпових систем відносно певної області у просторі параметрів. Також вказані оцінки на величину малого параметра системи, що характеризує відношення швидкостей швидких та повільних рухів, при яких вказаний тип стійкості зберігається. Практичні застосування методів аналізу та синтезу механічних систем, що враховують наявність і вплив невизначених параметрів, а також різнотемповість підсистем, можуть підвищити 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. Зміст дисертації розділено на вступ, шість розділів та висновки. Загальний обсяг дисертації – 300 сторінок. Основні наукові результати, що викладені у дисертації, опубліковано в 31 науковій праці (із них 23 – без співавторів), із яких 17 у фахових виданнях України, 4 у провідних міжнародних наукових виданнях. Результати роботи пройшли достатньо широку апробацію на десяти міжнародних наукових конференціях та семінарах. Наведені публікації в повній мірі висвітлюють основний зміст роботи і були опубліковані після захисту кандидатської дисертації автора. Докторська дисертаційна робота не містить матеріалів, викладених у кандидатській дисертації здобувача.

Отримані наукові результати роботи отримані в рамках одного із основних напрямів наукових досліджень відділу стійкості процесів Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, її матеріали увійшли у звіти з трьох науково-дослідних робіт та підтримані трьома грантами.

У *першому* розділі викладено короткий огляд відомих робіт, присвячених дослідженню стійкості руху класів різношвидкових систем, систем з неточними значеннями параметрів та малошвидкових механічних систем. У *другому* розділі метод функцій Ляпунова застосовано для дослідження динамічних характеристик неточних різношвидкових систем типу Лур'є–Постнікова, які допускають виділення «швидкої» та «виродженої» підсистем. *Третій* розділ присвячено застосуванню методу функцій Ляпунова для дослідження динамічних характеристик неточних різношвидкових систем типу Лур'є–Постнікова, які не допускають виділення «швидкої» та «виродженої» підсистем у випадках, коли неможливо аналітично розв'язати відповідні алгебраїчні рівняння. Також розглядаються неточні різношвидкові системи типу Лур'є–Постнікова спеціального вигляду, які допускають виділення вказаних підсистем, але через відсутність необхідних динамічних характеристик не дозволяють побудувати векторну функцію Ляпунова способом, запропонованим у розділі 2. В даних випадках застосовано матричнозначну функцію Ляпунова. Зазначимо, що до систем, які розглядаються в даному розділі, не можна застосувати відомі результати А.М. Тихонова, тому розвиток методу функцій Ляпунова, який дозволяє встановити характер поведінки розв'язків систем таких класів, є актуальною та важливою задачею. *Четвертий* розділ присвячено застосуванню методу функцій Ляпунова для дослідження параметричної стійкості неточних різношвидкових систем більш загального вигляду, включаючи великомасштабні системи, та побудові стабілізуючого керування для таких систем. *П'ятий* розділ присвячено дослідженню динамічних характеристик неточних різношвидкових систем типу Такагі–Сугено. Розвинуто нові способи побудови скалярної та матричнозначної допоміжних функцій, а також спосіб побудови керування, що забезпечує асимптотичну стійкість нульового стану рівноваги системи при всіх значеннях параметру з деякої області, незалежно від вибору функцій приналежності. *Шостий* розділ присвячено застосуванню отриманих теоретичних результатів для дослідження конкретних механічних систем, математичні моделі яких подаються у вигляді різношвидкових систем диференціальних рівнянь. Розглянуто клас малошвидкових механічних систем, які характеризуються тим, що в них кількість входів керування менша кількості ступенів вільності. Розвинуто метод побудови керування, що

забезпечує стабілізацію малоприводних механічних систем, а також отримано нові закони керування для конкретних робототехнічних систем з цього класу.

Обґрунтованість результатів дисертації забезпечується коректними математичними постановками задач у рамках теорії диференціальних рівнянь та теоретичної механіки, використанням точних аналітичних методів розв'язання поставлених задач, строгим доведенням теорем та лем. Всі результати роботи проілюстровано числовими прикладами, більшість з яких є прикладами конкретних механічних систем. Це підтверджує відповідність отриманих теоретичних результатів фізичній суті відповідних задач.

Наукова новизна результатів роботи. Серед основних наукових результатів дисертаційної роботи можна виділити наступні. Запропоновано альтернативу стандартним методам дослідження різномішурних систем у вигляді методу функцій Ляпунова. Цей метод розвинуто та успішно застосовано для даного класу систем. Розроблено нові способи побудови функцій Ляпунова, за допомогою яких отримано нові достатні умови параметричної стійкості для ряду класів неточних різномішурних систем. Відповідні функції Ляпунова отримано в явному вигляді, а їх побудова не потребує знаходження стану рівноваги системи, що при наявності нелінійності та залежності від параметра є складною задачею. Розвинуто метод побудови керування, що забезпечує бажані динамічні характеристики класу малоприводних механічних систем. На основі цього методу отримано нові закони стабілізуючого керування для конкретних робототехнічних систем.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості підвищити точність прогнозування поведінки реальних механічних систем за умов наявності малих збурень та параметричних неточностей, ігнорування впливу яких на поведінку системи може суттєво впливати на точність прогнозу. Отримані достатні умови параметричної стійкості неточних різномішурних систем дозволяють робити висновок про якісну поведінку таких систем на нескінченному часовому інтервалі без знаходження розв'язків і застосування методу розділення рухів, реалізація якого у випадку сильної нелінійності системи може бути досить складною. Результати, отримані при дослідженні малоприводних механічних систем, можуть бути практично застосовані, наприклад, при побудові реальних робототехнічних систем, до яких вони входять як складові частини, а також при моделюванні поведінки супутника з подвійним обертанням та механізму активного гасіння вібрацій у випадку поступального осцилятора з обертним приводом (TORA).

Зауваження. 1. В роботі часто використовується термін «змінний стан рівноваги». Коректно було б говорити про невизначений стан рівноваги, оскільки розглядаються автономні системи з невизначеними параметрами.

Змінний в часі стан рівноваги може бути лише в неавтономних системах.

2. Основні результати роботи пов'язані із знаходженням областей параметричної стійкості досліджуваних класів систем. У більшості випадків ці області мають форму кулі у відповідному просторі. Для знаходження радіусів цих областей доцільно було б навести конкретні рекомендації та алгоритми.

3. Допоміжні теореми про існування розв'язків алгебраїчних систем, які визначають стани рівноваги відповідних диференціальних систем з невизначеними параметрами, доцільно було б помістити після формулювання основних задач і опису класів систем, які досліджуються, і сформулювати у вигляді лем.

4. У аналітичних викладках є деякі неточності та некоректності. Наприклад, на с. 47, 48 і далі зайве уточнення похідної в точці $\frac{d\varphi(u)}{du}|_u$ у правій частині нерівності (2.11) повинно бути p^* , а не p тощо. В роботі також є ряд граматичних помилок та некоректних словосполучень («задовольняє рівнянню», «згідно теореми», «швидко-повільний вигляд», «відкидаємий доданок» тощо).

Вказані зауваження та побажання не впливають на загальну позитивну оцінку отриманих в дисертації результатів і не знижують її наукове та практичне значення.

В цілому, дисертаційна робота А.С. Хорошуна є закінченою науково-дослідною роботою, яка виконана на високому науковому рівні, а сукупність отриманих результатів можна кваліфікувати як вагоме досягнення в розвитку важливого розділу теоретичної механіки – теорії стійкості руху. Тема, зміст та результати дисертації відповідають паспорту спеціальності 01.02.01 – теоретична механіка (фізико-математичні науки). Автореферат відповідає темі та змісту роботи.

На підставі наведеного вважаю, що дисертаційна робота «Метод функцій Ляпунова в задачах стійкості, керування та стабілізації неточних різнотемпових механічних систем» відповідає вимогам Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів» № 567 від 24 липня 2013 р., а її автор, Хорошун Анатолій Сергійович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.02.01 – теоретична механіка.

Офіційний опонент
провідний науковий співробітник
Інституту математики НАН України
доктор фіз.-мат. наук, професор

