

ВІДГУК

офіційного опонента Стеблянка Павла Олексійовича, доктора фізико-математичних наук, професора, на дисертаційну роботу

Бейцуна Віктора Сергійовича

на тему: *«Математичне моделювання механічних процесів*

функціонування маніпулятора космічного призначення»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

зі спеціальності 113 Прикладна математика

Дисертаційна робота Бейцуна Віктора Сергійовича «Математичне моделювання механічних процесів функціонування маніпулятора космічного призначення» присвячена актуальним проблемам моделювання механічних характеристик багатоланкових маніпуляторів космічного призначення з урахуванням податливості їх елементів. Дослідження присвячене вдосконаленню конструктивних параметрів та алгоритмів виконання програмних рухів космічного маніпулятора з метою забезпечення його високоточного позиціонування в умовах космосу.

Актуальність обраної теми дисертації, її зв'язок з науковими програмами

У сучасних умовах стрімкого розвитку космічних технологій особливу увагу приділяють забезпеченню надійності та точності функціонування складних механізмів в умовах зниженої сили тяжіння. Багатоланкові маніпулятори, що є ключовими елементами технічного оснащення космічних апаратів, використовуються для обслуговування орбітальних станцій, монтажу конструкцій, захоплення і переміщення об'єктів. Однією з основних вимог до таких систем є здатність до високоточного позиціонування робочого устаткування при наявності зовнішніх збурень, гнучкості конструктивних елементів та внутрішніх нелінійних ефектів. У цьому контексті вивчення впливу податливості шарнірних і фланцевих з'єднань на

поведінку маніпулятора має важливе значення для проєктування та керування такими системами.

Додаткову актуальність роботі надає складність моделювання та верифікації цих ефектів, що часто мають локальний характер і виявляються лише за певних динамічних умов. На сьогодні відчувається нестача комплексних методик, які б дозволяли одночасно враховувати континуальні й локальні властивості механізмів та мали б прикладне значення для проєктування нових конструкцій. Запропоноване в дисертації поєднання чисельного та експериментального аналізу направлене на вирішення саме цих проблем.

Зазначені проблеми розглядаються у межах науково-дослідних тем кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара: НДР № 0121U109768 «Розробка методів прогнозування несучої здатності елементів конструкцій ракетної техніки без використання руйнуючих випробувань і вибір їх раціональних параметрів», 2021-2023 рр., і НДР № 0124U000328 «Експериментальні і числові дослідження процесів руйнування та живучості оболонкових конструкцій з пошкодженнями при екстремальному статичному, локальному ударному і тепловому навантаженні», 2024-2026 рр., а також у співпраці з Інститутом транспортних систем і технологій НАН України - НДР № 0121U108602 «Розробки та прикладні дослідження магнітолевітуючих транспортних і інноваційних енергетичних систем», 2021-2023 рр., що підтверджує актуальність і практичну спрямованість дослідження.

Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів, наданих у дисертаційній роботі

Аналіз змісту дисертації та публікацій автора свідчить про його провідну роль у формуванні методології дослідження, розробці моделей механічної податливості, проведенні розрахункових і натурних експериментів, обробці результатів та їх інтерпретації. Усі ключові етапи

роботи — від постановки задачі до обґрунтування прикладних рекомендацій — реалізовано здобувачем самостійно.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій

Запропоновані підходи базуються на сучасних концепціях прикладної механіки, числового моделювання та методів експериментальної механіки. Узгодження теоретичних і практичних результатів, їх підтвердження в умовах математичного моделювання та реальних експериментів забезпечують високий рівень достовірності та вірогідності висновків. Обґрунтування математичних моделей проведено належним чином.

Ступінь новизни результатів, їх теоретичне та практичне значення

Дисертаційна робота містить сукупність наукових положень і технічних рішень, що є новими та значущими для розвитку напрямів прикладної механіки і математичного моделювання багатоланкових систем. Зокрема, автором *запропоновано* удосконалений підхід до врахування податливості шарнірних та фланцевих з'єднань у складі механічної структури космічного маніпулятора. Ці з'єднання розглянуто як джерела потенційної нестабільності в динаміці системи, що значно впливає на точність просторового позиціонування.

Наукова новизна полягає, насамперед, у побудові нелінійних моделей з урахуванням контактних ефектів, локальних деформацій і механічних люфтів, які досі не мали комплексного відображення в подібних дослідженнях. *Вперше* встановлено аналітичні та числові залежності між характеристиками податливості окремих вузлів конструкції й відхиленнями кінематичних траєкторій під час виконання програмного руху в умовах орбітальних збурень. Також *запропоновано* ефективну процедуру узгодження таких моделей за допомогою експериментальних даних.

Іншою важливою складовою новизни є *впровадження* фотограмметричного підходу до вимірювання переміщень і малих деформацій у важкодоступних вузлах маніпуляторів. Такий підхід дозволяє

досягти високої точності при верифікації числових моделей, що особливо важливо для складних технічних систем, які функціонують у реальних умовах зниженої сили тяжіння. *Запропоновано* спосіб інтеграції результатів експерименту до процесу моделювання з урахуванням невизначеностей, притаманних практичним вимірюванням.

Практична цінність дослідження полягає у можливості застосування його результатів для підвищення точності керування маніпуляторними системами космічного призначення, а також для вдосконалення програмно-апаратного забезпечення, яке виконує позиціювання робочих органів. Отримані методики можуть бути використані в системах автоматизованого проєктування як окремих елементів, так і повнофункціональних моделей маніпуляторів, що працюють в умовах обмеженого доступу до елементів для контролю або налаштування. Крім того, результати дослідження мають перспективу застосування у наземних технічних системах, де присутні подібні задачі точного керування з урахуванням конструктивної гнучкості.

Також слід зазначити, що одержані автором результати знайшли застосування в Інституті транспортних систем і технологій НАН України (Довідка про впровадження, 2025 р., див. Додаток Г) та впроваджені в освітній процес спеціальності 113 Прикладна математика Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара МОН України (Акт впровадження, 2025 р., див. Додаток В).

Висновок про повноту опублікування основних положень дисертації

Наукові результати, отримані автором у межах дисертаційного дослідження, висвітлено у повному обсязі в опублікованих працях. Загальна кількість наукових публікацій становить сім, серед яких три статті надруковано у фахових виданнях, що входять до переліку наукових видань України. У статтях наведено основні теоретичні положення, числові та експериментальні результати, а також прикладні рекомендації щодо конструктивного вдосконалення маніпуляторних систем. Інші публікації

представлені у вигляді матеріалів доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях, де результати дослідження пройшли апробацію серед фахової спільноти. Такий рівень публікаційної активності підтверджує достовірність і завершеність представленої роботи.

Аналіз основного змісту роботи

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет, наукову новизну, практичне значення роботи, а також відображено структуру дисертації.

У *першому розділі* здійснено аналітичний огляд сучасного стану моделювання космічних маніпуляторів, їх конструктивних особливостей, а також методів опису динаміки та податливості таких систем. Окрему увагу приділено фотограмметричному методу як перспективному інструменту для дослідження деформацій шарнірних вузлів.

Другий розділ присвячено побудові математичної моделі маніпулятора із застосуванням теорії пружності, коливань стрижнів та методу скінченних елементів. Наведено розрахункову схему, визначено силові фактори в шарнірних з'єднаннях і проаналізовано вплив податливості ланок на точність програмного руху.

У *третьому розділі* запропоновано методику експериментального оцінювання люфтів у шарнірах маніпулятора на основі фотограмметричного спостереження. Зіставлення експериментальних та розрахункових траєкторій дозволяє кількісно оцінити відхилення, спричинені конструктивними люфтами, та врахувати їх у системі керування.

Четвертий розділ присвячено дослідженню впливу податливості фланцевого з'єднання на динаміку маніпулятора під дією механічних навантажень. Проведено серію експериментів і здійснено порівняльний аналіз результатів із числовою моделлю, що дозволило підтвердити ефективність розробленого підходу.

Висновки роботи узагальнюють результати, що були отримані в процесі виконання дослідження, і підтверджують досягнення поставленої мети та виконання всіх завдань.

Оцінка структури дисертації, мови та стилю викладення

Дисертаційна робота написана державною мовою з дотриманням наукового стилю викладу. Структура роботи є чітко організованою: текст поділено на вступ, чотири основні розділи, висновки, список використаних джерел і додатки.

Загальний обсяг дисертації становить 131 сторінку, включає 35 рисунків, 3 таблиці, 145 бібліографічних джерел та 4 додатки. Список літератури охоплює як класичні праці, так і сучасні публікації останніх років, у тому числі англomовні джерела, що свідчить про обізнаність здобувача з поточним станом досліджень у відповідній галузі. Загалом оформлення відповідає чинним вимогам до дисертаційних робіт і є свідченням належного рівня академічної культури автора.

Зауваження щодо змісту дисертації

Як зауваження слід зазначити, що:

1. При описі експериментальних установок і процесу проведення досліджень у четвертому розділі, не зазначено момент затягування кріпильних елементів (гвинтів, з'єднувальних блоків тощо), що обмежує можливість повного відтворення експерименту.

2. У розділах 3 та 4, присвячених експериментальним дослідженням, відсутнє обговорення можливостей їх узагальнення на інші типи з'єднань або подібні механічні системи, оскільки результати представлені тільки для окремих конструкцій.

3. На рис. 2.1 відсутнє позначення напряму відліку кута φ_1 , що ускладнює однозначне трактування наведених графічних даних.

Однак, суттєвих недоліків, які зменшували б цінність роботи, не виявлено. Зроблені зауваження і побажання не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальні висновки

Представлені в дисертації матеріали свідчать про її завершений і самостійний характер. Робота відзначається актуальністю обраної проблематики, науковою новизною, обґрунтованістю та достовірністю отриманих результатів, а також чіткістю сформульованих висновків. Дисертація має як теоретичну, так і прикладну значущість, а її зміст повною мірою відповідає спеціальності 113 Прикладна математика.

Вважаю, що дисертаційна робота Бейцуна Віктора Сергійовича «Математичне моделювання механічних процесів функціонування маніпулятора космічного призначення», що представлена на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика відповідає вимогам, що висуваються до кваліфікаційних наукових робіт, які встановлені відповідно наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів № 44 від 12 січня 2022 р. зі змінами від 21.03.2022 р.), а її автор Бейцун Віктор Сергійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу термопластичності Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України



Павло СТЕБЛЯНКО

Підпис професора Стеблянка П. О. засвідчую:

Вчений секретар Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України



Юрій СКОСАРЕНКО

