

ВІДГУК

офіційного опонента Пошивалова Володимира Павловича, члена-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора, на дисертаційну роботу Бейцуна Віктора Сергійовича на тему: *«Математичне моделювання механічних процесів функціонування маніпулятора космічного призначення»*, подану на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика

Актуальність теми дисертації. Стрімкий розвиток ракетно-космічних технологій зумовив зростання вимог до багатоланкових маніпуляторів, які відіграють ключову роль у функціонуванні космічних апаратів. Особливо важливою є здатність таких систем забезпечувати високу точність позиціонування корисного навантаження.

Податливість конструкції, зокрема деформації у шарнірних з'єднаннях, істотно впливають на точність і динаміку руху маніпулятора. Люфти та коливання, що виникають у процесі роботи, можуть суттєво змінювати поведінку системи. У той же час, вони залишаються недостатньо дослідженими.

Поєднання числового моделювання з експериментальними дослідженнями, реалізоване в дисертаційній роботі, значною мірою сприяє поглибленому аналізу складних багатоланкових систем, таких як маніпулятори космічного призначення. Такий підхід не лише забезпечує верифікацію теоретичних моделей, але й підвищує надійність прогнозування динамічних характеристик систем, що функціонують в умовах змінного навантаження та обмеженого доступу до реальних випробувань.

Яскравим прикладом ефективної інтеграції обчислювальних та експериментальних методів виступає застосування фотограмметричного підходу, запропонованого у дисертаційній роботі. Фотограмметрія, як безконтактний засіб високоточного вимірювання переміщень і деформацій, дозволяє фіксувати мінімальні відхилення у шарнірних та фланцевих з'єднаннях, що в іншому випадку є вкрай складними для ідентифікації. Її використання дає змогу в режимі реального часу оцінювати технічний стан механізмів та адаптувати алгоритми керування відповідно до змін у конструкції.

Урахування таких чинників під час проєктування і керування маніпуляторними системами сприяє покращенню точності їхнього позиціонування, підвищенню надійності експлуатації, а також зниженню ризиків, пов'язаних із механічними пошкодженнями під час виконання місій. Саме такий системний підхід, представлений у роботі, підкреслює її *актуальність і практичну цінність* у вирішенні сучасних інженерно-наукових завдань у галузі ракетно-космічної техніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з планами наукових досліджень у проблемній науково-дослідній лабораторії міцності і надійності конструкцій кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара в рамках держбюджетних тем 1-657-21, НДР № 0121U109768 «Розробка методів прогнозування несучої здатності елементів конструкцій ракетної техніки без використання руйнуючих випробувань і вибір їх раціональних параметрів», 2021-2023 рр. та 1-676-24, 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 - тема 1.3.6.19 (прикладні дослідження), НДР № 0121U108602 «Розробки та прикладні дослідження магнітолевітуючих транспортних і інноваційних енергетичних систем», 2021-2023 рр.

Формулювання наукової задачі, розв'язання якої одержане в дисертації. *Мета дисертаційної роботи* полягає у розробці методології удосконалення параметрів конструкції та процесів виконання програмних рухів космічного маніпулятора для забезпечення його високоточного позиціонування в просторі.

Для досягнення цієї мети автором були вирішені такі *задачі*:

- здійснено аналітичний огляд методів моделювання конструкцій маніпуляторів;
- побудовано математичну модель програмних рухів дволанкової системи з урахуванням динаміки її елементів;
- досліджено вплив континуальної та локальної податливості на кінематичні характеристики маніпулятора;
- розроблено та реалізовано експериментальні методики оцінювання люфтів у шарнірних вузлах із використанням фотограмметрії;
- визначено вплив пружних деформацій фланцевих з'єднань на динаміку системи під дією різних типів навантаження;
- проведено порівняльний аналіз результатів числового та експериментального моделювання для формування практичних рекомендацій із проектування космічних маніпуляторів.

Наукова новизна результатів, отриманих автором. Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у побудові комплексного підходу до аналізу механічних характеристик космічних маніпуляторів, що об'єднує теоретичне моделювання, числові розрахунки та експериментальні дослідження. *Вперше* системно досліджено динамічні прояви податливості в умовах руху маніпулятора, побудовано *оригінальну* методику оцінки люфтів, а також *отримано нові залежності* між параметрами руху та силовими навантаженнями в шарнірах.

Практичне значення одержаних результатів. *Практична цінність* роботи полягає в можливості використання запропонованих методик у процесі конструювання і вдосконалення маніпуляторних систем для аерокосмічної техніки. Отримані результати можуть бути безпосередньо впроваджені у діяльність конструкторських та науково-дослідних організацій, що займаються розрахунками та випробуванням багатоланкових механізмів. Важливим також є факт апробації розробок у провідних наукових установах та використання їх в освітньому процесі, що свідчить про прикладну значущість дослідження.

Особистий внесок здобувача. У дисертації представлено узагальнену математичну модель, яка дозволяє прогнозувати поведінку конструкцій із врахуванням локальних деформаційних властивостей, що є вагомим внеском у розвиток прикладної механіки та математичного моделювання. Всі основні результати отримано здобувачем особисто, що підтверджено структурою публікацій та описом особистого внеску в наукові роботи.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються. Дисертаційну роботу виконано на високому науковому рівні, з дотриманням вимог, що ставляться до кваліфікаційних досліджень. Представлені в роботі результати є достатньо обґрунтованими, внутрішньо узгодженими та достовірними, що підтверджується використанням апробованих методів прикладної механіки, теорії пружності, динаміки твердих тіл, а також числових підходів, зокрема, методу скінченних елементів.

Коректність математичних постановок задач забезпечена як з боку аналітичної побудови моделей, так і за рахунок порівняння результатів обчислень з відомими теоретичними рішеннями та результатами числових експериментів. Окремо варто підкреслити, що числові результати верифіковані за допомогою фізичних експериментів, зокрема, на базі фотограмметричного підходу, який виступає точним інструментом безконтактного контролю малих деформацій і люфтів у з'єднаннях.

Обґрунтованість отриманих висновків також підтверджується апробацією розроблених методик на тестових прикладах, узгодженістю результатів із фізичною природою процесів, що досліджуються, а також порівнянням із результатами інших авторів, наведеними в науковій літературі. Такий багаторівневий підхід до перевірки достовірності гарантує надійність і практичну застосовність отриманих у дисертації результатів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів основного тексту, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний зміст проілюстровано 35 рисунками та представлено у 3 таблицях. Список використаних джерел містить 145 найменувань на 16 сторінках.

У *вступі* дисертаційної роботи обґрунтовано наукову новизну, мету, задачі, а також актуальність дослідження. Автор вказує на недостатню розробленість питань, пов'язаних із локальною податливістю вузлів конструкції, а також з неідентифікованими коливальними явищами, спричиненими люфтами. З огляду на потреби точного керування маніпуляторами в умовах невагомості, означена проблематика є актуальною.

У *першому розділі* подано ретельний аналітичний огляд сучасного стану досліджень у галузі моделювання конструкцій космічних маніпуляторів. Наведено класифікацію конструктивних схем і типів систем, розглянуто існуючі підходи до математичного опису їхньої роботи, включаючи методи числового моделювання та безконтактного контролю положення. Особливу увагу приділено фотограмметричному методу, який позиціонується як перспективний інструмент для експериментального аналізу деформацій у реальних умовах.

Другий розділ дисертації присвячено побудові математичної моделі космічного маніпулятора, заснованої на положеннях теорії пружності, динаміки твердих тіл та методу скінченних елементів. Автором розроблено нову імітаційну модель для аналізу програмних рухів та обчислення зусиль у шарнірних вузлах, що дозволяє визначати силові навантаження з урахуванням динаміки системи «космічний апарат – маніпулятор – корисне навантаження». У моделі враховано вплив континуальної податливості елементів, результати верифіковано з використанням аналітичних рішень, що забезпечує високу достовірність обчислень.

У *третьому розділі* розроблено та реалізовано методику експериментального виявлення люфтів у шарнірних вузлах. Автором запропоновано ефективний підхід на базі фотограмметричного методу, який дозволяє з високою точністю фіксувати траєкторію руху окремих ланок маніпулятора та кількісно оцінювати відхилення від заданих параметрів. Результати аналізу свідчать про суттєвий вплив люфтів на якість реалізації програмних рухів, що підтверджує важливість врахування подібних ефектів на етапі проектування та налаштування системи керування.

У *четвертому розділі* дисертації описано методику експериментального визначення жорсткісних характеристик фланцевих з'єднань під дією основних механічних навантажень. Автор провів серію випробувань для оцінки впливу згинання, кручення та осьових зусиль на пружну деформацію конструкційного вузла, що дало змогу отримати нові дані про локальні податливості та порівняти їх з розрахунковими моделями. Запропонована методика має прикладне значення для подальшої оптимізації структури з'єднувальних елементів маніпуляторів.

У *висновках* узагальнено результати проведених теоретичних і експериментальних досліджень, сформульовано основні наукові положення та практичні рекомендації щодо підвищення точності й надійності функціонування багатоланкових маніпуляторів космічного призначення.

У *додатках* наведено список наукових праць за темою дисертації, довідку про впровадження результатів дослідження в Інституті транспортних

систем і технологій НАН України (2025 р.), а також акт про впровадження в освітній процес спеціальності 113 Прикладна математика у Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара (2025 р.). Загальний обсяг дисертації становить 131 сторінку.

Зауваження по роботі. У роботі присутні наступні недоліки:

1. У висновках до другого розділу наведено значення відносного відхилення, що становить менше 4%, між аналітичним та числовим розв'язанням оберненої задачі динаміки для обраної моделі маніпулятора. При цьому у тексті дисертаційної роботи відсутній детальний відповідний аналіз. Невідповідність між основним змістом і висновками потребує усунення.

2. У дисертаційній роботі бракує порівняльного аналізу у вигляді таблиць або графіків відхилень основних параметрів залежно від довжини маніпулятора, маси навантаження, швидкості повороту супутника, а також динамічних ефектів, що виникають при різкому старті або гальмуванні. Включення такого матеріалу, що висвітлює вплив конструктивних та експлуатаційних параметрів на точність позиціонування кінця маніпулятора з корисним навантаженням, дозволило б надати роботі додаткової практичної значущості.

3. Відсутність у тексті дисертаційної роботи більш детальних пояснень щодо конкретних числових співвідношень між масами космічного апарата, маніпулятора та корисного навантаження, а також вказівок на жорсткісні характеристики шарнірних з'єднань ускладнює оцінку результатів моделювання та узагальнення отриманих висновків. Зазначені параметри є критично важливими для аналізу впливу податливості на динаміку системи.

4. Подана на рис. 2.7 блок-схема програми має високу щільність графічних елементів, що ускладнює сприйняття та розпізнавання підписів. Такі великогабаритні ілюстративні матеріали доцільно було б винести до додатків, залишаючи в основному тексті узагальнений або спрощений варіант.

Наведені зауваження *не впливають* на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок по дисертаційній роботі

З огляду на актуальність дослідження, його наукову новизну, значущість отриманих результатів, їх обґрунтованість і достовірність, а також практичну й теоретичну цінність сформульованих положень, висновків і рекомендацій, *вважаю*, що дисертаційна робота Бейцуна Віктора Сергійовича «Математичне моделювання механічних процесів функціонування маніпулятора космічного призначення», 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

Директор Інституту технічної механіки
НАН України і ДКА України,
член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор




Володимир ПОШИВАЛОВ