

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара
Олег МАРЕНКОВ
« 28 » 04 2025 р.



ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації
Бейцуна Віктора Сергійовича на тему «Математичне моделювання механічних
процесів функціонування маніпулятора космічного призначення»,
представленої на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності
113 Прикладна математика

ВИТЯГ

з протоколу № 1 міжкафедрального семінару
«Математичні проблеми механіки»
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
від 15 квітня 2025 року

ПРИСУТНІ: 14 з 14 членів наукового семінару.

ГОЛОВУЮЧИЙ: д-р фіз.-мат. наук, проф. Лобода В. В. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

СЕКРЕТАР ЗАСІДАННЯ: канд. фіз.-мат. наук, доц. Ходанен Т. В. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

Члени наукового семінару:

д-р фіз.-мат. наук, проф. Гарт Е. Л. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р фіз.-мат. наук, проф. Гук Н. А. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), в. о. проректора з науково-педагогічної роботи, професор кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р техн. наук, проф. Дзюба А. П. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

д-р техн. наук, проф. Дреус А. Ю. (05. 15. 09 - геотехнічна та гірнича механіка), завідувач кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р фіз.-мат. наук, проф. Кузьменко В. І. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), професор кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

д-р фіз.-мат. наук, проф. Шевельова А. С. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), професор кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, с.н.с. Адлуцький В. Я. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), старший науковий співробітник НДЛ механіки руйнування та пластичного деформування матеріалів кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Гергель І. Ю. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Комаров О. В. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), в. о. завідувача кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Панін К. В. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. фіз.-мат. наук, доц. Чернецький С. О. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

канд. тех. наук Дзюба П. А. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

ЗАПРОШЕНІ ФАХІВЦІ (5 осіб, з правом голосу):

чл.-кор., д-р техн. наук, проф. Пошивалов В. П. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), директор Інституту технічної механіки НАН України і ДКА;

д-р техн. наук, проф. Сохаський А. В. (05.07.01 - аеродинаміка та газодинаміка літальних апаратів), професор кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики Університету митної справи та фінансів;

д-р фіз.-мат. наук, проф. Стеблянка П. О. (01.02.04 — механіка деформівного твердого тіла), провідний науковий співробітник відділу термопластичності Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України;

канд. тех. наук, с.н.с. Тарасов С. В. (05.07.09 - Динаміка, балістика та керування рухом літальних апаратів), заступник директора з наукової роботи Інституту транспортних систем і технологій НАН України;

канд. тех. наук, доц. Ащепкова Н. С. (05.13.03 – системи та процеси керування), доцент кафедри механотроніки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

На засіданні присутній аспірант кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Бейцун В. С.

Аспірант участі в голосуванні не брав.

Порядок денний: розгляд і обговорення дисертаційної роботи Бейцуна Віктора Сергійовича на тему «Математичне моделювання механічних процесів функціонування маніпулятора космічного призначення», поданої на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика.

Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, протокол № 4 від 18 листопада 2021 р. Науковими керівниками призначено д-ра тех. наук, проф. Дзюбу Анатолія Петровича, канд. тех. наук, ст. наук. співр. Тарасова Сергія Васильовича.

Підготовка здобувача третього рівня вищої освіти здійснюється за акредитованою освітньо-науковою програмою «Прикладна математика» зі спеціальності 113 Прикладна математика (сертифікат про акредитацію освітньої програми 2068, дійсний до 01.07.2027 р.).

СЛУХАЛИ:

Обговорення дисертації аспіранта 4 року навчання Бейцуна Віктора Сергійовича на тему «Математичне моделювання механічних процесів функціонування маніпулятора космічного призначення» на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика.

Перевірку на плагіат здійснювала комісія у складі: канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Комаров О. В., канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Ходанен Т. В., канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Панін К. В.

За результатами перевірки дисертаційної роботи на плагіат програмою «Strikeplagiarism» зроблено висновок: дисертаційна робота має високий рівень унікальності (99,54%) і може бути допущена до захисту.

Робота виконана на 131 сторінці і містить такі складові частини: анотація, зміст, вступ, основна частина з чотирьох розділів, висновки, список використаної літератури, чотири додатки.

Слово надається аспіранту Бейцуну Віктору Сергійовичу. Будь ласка, регламент виступу 30 хвилин.

Аспірант Бейцун В. С.

Доброго дня, шановний голову та присутні!

Тема моєї дисертаційної роботи: «Математичне моделювання механічних процесів функціонування маніпулятора космічного призначення».

Актуальність теми зумовлена потребами ракетно-космічної галузі в створенні досконалих маніпуляторів для високоточного позиціонування,

розміщених на супутниках, приладів в космічному просторі. У дисертації пропонується методологія удосконалення параметрів даних конструкцій шляхом визначення та врахування пружних податливостей як континуальної, так і локальних. Це дасть змогу більш точно контролювати динамічний процес транспортування та позиціонування корисного навантаження, або враховувати на етапі проектування конструкцій пружні податливості елементів, адаптуючи відповідним чином систему керування.

Мета і завдання дослідження. *Мета* роботи полягає у розробці методології удосконалення параметрів конструкції космічного маніпулятора та процесів виконання програмних рухів для забезпечення ефективності його функціонування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *завдання*:

- провести аналітичний огляд існуючих методів моделювання робочих процесів космічних маніпуляторів та їх конструктивних схем;
- розробити математичну модель маніпулятора для імітаційного моделювання процесів виконання програмних рухів та визначення силових факторів в шарнірних вузлах та інших елементах конструкції. Встановити залежності силових факторів від часу виконання програмних рухів маніпулятора космічного призначення в складі системи космічний апарат-маніпулятор-корисне навантаження;
- розробити розрахункову кінематичну схему, що відтворює виконання основних програмних рухів маніпулятора;
- провести числові дослідження впливу континуальної податливості маніпулятора на параметри коливальних процесів його ланок методом скінченних елементів; верифікувати результати обчислень з відомими аналітичними співвідношеннями;
- розробити методику та провести експериментальні дослідження для визначення люфтів та пружних податливостей в шарнірних вузлах маніпуляторів і штанг космічних апаратів з використанням фотограмметричного методу;
- розробити методику та провести експериментальні дослідження впливу податливості фланцевих з'єднань ланок маніпулятора на динаміку програмних рухів шляхом проведення випробувань на основні види механічних навантажень: згинання, кручення та розтяг-стиск;
- здійснити порівняльний аналіз результатів обчислень досліджуваного вузла з'єднання маніпулятора методом скінченних елементів та експериментальних досліджень;
- на основі результатів імітаційного моделювання процесів переміщення корисного навантаження та експериментальних досліджень деформованого стану його конструкції провести аналіз впливу податливості елементів маніпулятора на його програмні рухи. Сформулювати практичні рекомендації щодо вибору основних жорсткісних та масових параметрів маніпулятора на етапі ескізного проектування.

Об'єкт дослідження – математичне та експериментальне моделювання процесів функціонування стрижневих високоточних маніпуляторів

космічного призначення.

Предмет дослідження – стрижневі системи та елементи конструкцій, з'єднані за допомогою шарнірних вузлів та фланцевих з'єднань, що утворюють маніпулятор спеціального призначення.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використовувались методи механіки деформівного твердого тіла, динаміки стрижнів та систем твердих тіл, теорії коливань та обчислювальної математики. Для розробки методики експериментального визначення люфтів та пружних податливостей в шарнірних вузлах маніпуляторів і штанг космічних апаратів використовувався фотограмметричний метод. Визначення впливу фланцевого з'єднання на локальну жорсткість маніпулятора проводилось за допомогою експериментальних методів механіки деформівного твердого тіла. Для дослідження впливу континуальної податливості маніпулятора на точність програмних рухів застосовано метод скінченних елементів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- **вперше** отримані результати системних теоретико-експериментальних досліджень податливості секцій маніпулятора, шарнірних та фланцевих вузлів маніпулятора космічного призначення;
- виконано обчислювальні експерименти для аналізу динамічних характеристик і зусиль у шарнірному вузлі дволанкової маніпуляторної системи; отримано **нові** залежності величини моменту в шарнірі від часу розвороту однієї секції маніпулятора, а також від врахування моделей основного тіла та корисного навантаження;
- розроблена та апробована **оригінальна** методика експериментальних досліджень для визначення люфтів та пружних податливостей в шарнірних вузлах маніпуляторів і штанг космічних апаратів, що базується на фотограмметричному методі;
- побудована **авторська** методика експериментальних випробувань та отримані нові дані досліджень впливу податливості фланцевого з'єднання на моделювання динаміки робочих процесів з'єднувального вузла космічного маніпулятора, призначеного для керування розташуванням у просторі спеціального обладнання;
- отримані **нові** дані випробувань податливості фланцевого з'єднання досліджуваного зразка штанги маніпулятора на основні види механічних навантажень: згинання, кручення та розтяг-стиск.

Обґрунтованість і достовірність одержаних результатів забезпечується коректним застосуванням відомих методів аналітичної динаміки, положень лінійної теорії пружності, апробованих математичних моделей і числових алгоритмів розрахунків, а також наукових положень фотограмметричного методу при експериментальних дослідженнях. Додатково, достовірність підтверджується коректним вибором розрахункових схем, зіставленням отриманих результатів у часткових випадках із відомими розв'язками інших авторів, відповідністю результатів розв'язання нових задач фізичній суті досліджуваних явищ і результатами експериментальних

досліджень.

Теоретичне і практичне значення одержаних результатів.

Побудована в дисертаційній роботі нова математична модель кінематики та динаміки космічного маніпулятора з урахуванням конструктивних та функціональних особливостей може служити науковим підґрунтям для створення нових, більш досконалих конструкцій. Розроблена методика експериментального визначення пружних податливостей і люфтів у шарнірних вузлах багатоланкових конструкцій та механізмів за допомогою фотограмметричного методу може бути корисною для підвищення точності динамічного моделювання, вдосконалення алгоритмів керування та оптимізації конструкцій роботизованих систем. Запропонована методика експериментального дослідження дії основних механічних навантажень може слугувати методичною основою для оцінювання локальних податливостей у фланцевих з'єднаннях. Результати досліджень впливу часу розкладання частини маніпулятора на силові параметри поворотних вузлів становлять важливу основу для оптимізації програмних рухів та підвищення точності керування маніпулятором у реальних умовах експлуатації.

У цілому, використання результатів дисертаційної роботи дозволить підвищити достовірність моделювання робочих режимів маніпуляторних систем, що сприяє їх довговічності та безпеці роботи.

Представлені методики можуть бути застосовані при створенні реальних конструкцій чи об'єктів ракетно-космічної техніки. Основні результати можуть бути застосовані у конструкторських організаціях, що займаються проєктуванням, розрахунком, виготовленням та оптимізацією багатоланкових конструкцій.

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

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми дисертації; окреслено зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами; сформульовано мету й задачі дослідження; відзначено наукову новизну, достовірність і практичне значення одержаних результатів; наведено відомості про апробацію результатів роботи, публікації та особистий внесок автора, структуру та обсяг дисертації.

У **першому розділі** подано аналітичний огляд сучасного стану моделювання процесів функціонування космічних маніпуляторів. Наведено класифікацію даних систем за конструктивними особливостями та їх призначенням. Проаналізовано методи моделювання як самих конструкцій маніпуляторів, так і задач, пов'язаних з їх робочими процесами. Проведено огляд наукових публікацій стосовно застосування фотограмметричного методу як безконтактної системи стеження за об'єктами у різних галузях, що може слугувати інструментом для дослідження пружної податливості

шарнірних вузлів.

У **другому розділі** роботи для побудови математичної моделі маніпулятора наведено необхідні співвідношення теорії пружності та теорії коливань стрижнів, а також основні положення та аспекти методу скінченних елементів. Описано вихідні параметри досліджуваної моделі та її розрахункову схему. Розроблено нову математичну модель маніпулятора для імітаційного моделювання процесів виконання програмних рухів та визначення силових факторів в шарнірних вузлах конструкції. Встановлено залежності силових факторів від часу виконання програмних рухів маніпулятора космічного призначення в складі системи космічний апарат-маніпулятор-корисне навантаження. Визначено вплив континуальної податливості ланок маніпулятора на точність програмних рухів за допомогою метода скінченних елементів, де отримані результати обчислень верифіковані за допомогою відомих аналітичних співвідношень.

У **третьому розділі** розроблено нову методику експериментального оцінювання люфтів та впливу податливості шарнірних вузлів бортових маніпуляторів на їх динамічні характеристики. Запропонований підхід ґрунтується на застосуванні фотограмметрії як безконтактного методу моніторингу руху конструкції та її складових. Аналіз траєкторій руху шарнірів, шляхом порівняння експериментальних даних із запрограмованими параметрами, дозволяє визначати відхилення та кількісно оцінювати величину люфтів. Врахування цих факторів сприяє підвищенню точності налаштування системи керування космічного апарата. Проведено чисельне моделювання впливу люфту у шарнірному вузлі на траєкторію його руху.

У **четвертому розділі** розроблено методику експериментального визначення впливу пружної податливості фланцевого з'єднання маніпулятора космічного призначення від дії основних видів механічних навантажень. Проаналізовано існуючі методи розрахунку міцності фланцевих з'єднань. Отримано широкий спектр експериментальних даних та проведено порівняння результатів випробувань з обчисленою моделлю секції маніпулятора, що не має локальних знижень жорсткості у вигляді вузла кріплення.

За результатами досліджень зроблені наступні **ВИСНОВКИ**. В результаті проведеного системного комп'ютерного моделювання та аналізу експериментальних випробувань розроблено методологію удосконалення параметрів конструкції космічного маніпулятора та процесу виконання програмних рухів для забезпечення ефективності його функціонування. Одержано нові наукові результати, а саме:

1. **вперше** розроблено методику комплексного теоретико-експериментального дослідження податливості секцій, шарнірних та фланцевих вузлів космічних маніпуляторів;
2. отримані **нові** дані обчислювальних експериментів для аналізу динамічних характеристик і силових навантажень у шарнірному вузлі дволанкової маніпуляторної системи, що дозволяє отримати

залежності розрахованого моменту від часу розвороту однієї з секцій маніпулятора з урахуванням моделей основного тіла та корисного навантаження;

3. розроблено **нову** методику та проведено експериментальні дослідження люфтів та пружних податливостей у шарнірних вузлах маніпуляторів і штанг космічних апаратів із застосуванням фотограмметричного методу;
4. запропоновано методику та отримано експериментальні дані щодо впливу податливості фланцевого з'єднання на моделювання динаміки робочих процесів з'єднувального вузла космічного маніпулятора, призначеного для просторового керування сітчастими антенами або науковими приладами. Отримані нові дані системних експериментальних випробувань податливості фланцевого з'єднання досліджуваного зразка маніпуляторної конструкції під впливом основних видів механічних навантажень, зокрема згинання, кручення та розтягу-стиску, які можуть бути корисними при проектуванні та створенні таких конструктивних елементів;
5. показано, що суттєвий вплив на точність функціонування розглянутої конструктивної схеми космічного маніпулятора мають пружні податливості шарнірних вузлів, включаючи люфти, континуальна податливість всієї конструкції та податливість у фланцевих з'єднаннях;
6. за результатами числових і експериментальних моделювань механічних процесів функціонування маніпулятора встановлено:
 - люфт у шарнірних вузлах та їх локальна податливість є найбільш критичними факторами, що суттєво погіршують точність позиціонування маніпулятора, який транспортує сітчасту параболічну антену;
 - континуальна податливість конструкції впливає на точність позиціонування у кілька разів менше, ніж податливість у шарнірних вузлах, однак все ж може зумовлювати відхилення у положенні корисного навантаження;
 - податливістю у фланцевих з'єднаннях можна знехтувати, оскільки її вплив на загальну жорсткість маніпулятора є незначним;
7. напрацьовані **рекомендації** щодо вибору основних жорсткісних та масових параметрів маніпулятора на етапі ескізного проектування, які пов'язані:
 - з підвищенням континуальної жорсткості конструкції - рекомендується використовувати матеріали з вищими жорсткісними характеристиками та оптимізувати перерізи елементів для збільшення жорсткісного параметра EI (добуток модуля пружності на момент інерції перерізу);
 - зі зменшенням люфтів у шарнірах та локальних податливостей у фланцевих з'єднаннях - необхідно висувати жорсткіші вимоги до вибору матеріалів, конструктивних компонентів з'єднань, а

також оптимізувати механічні вузли (зубчасті передачі, муфти, вали) для зменшення деформацій та підвищення міцності;

- із застосуванням розробленої та апробованої методики дослідження шарнірних вузлів за допомогою фотограмметричного методу - для моніторингу та локалізації люфтів. Цей метод має низьку похибку вимірювань, високу швидкість збору та обробки даних, економічну ефективність та безконтактність. Показано, що розроблена методика може бути використана при аналізі пружних податливостей у механічних системах із високими вимогами до точності позиціонування, а також застосована при проєктуванні багатоланкових конструкцій;

8. отримані результати можуть бути використані конструкторами та інженерами при проєктуванні космічних маніпуляторів, моніторингу експлуатаційних характеристик механізмів, в процесі модернізації та оптимізації конструкцій, що дозволить підвищити точність, надійність і довговічність таких систем, а також в навчальному процесі підготовки фахівців у галузі механіки та робототехніки, забезпечуючи ґрунтовне розуміння принципів проєктування та оптимізації конструкцій космічної техніки.

ЗАПИТАННЯ ТА ВІДПОВІДІ

Д-р фіз.-мат. наук, проф. Лобода В. В., професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Ви використовували метод скінченних елементів. Зокрема, для розрахунку фланцевого з'єднання Ви застосовували 20-вузлові скінченні елементи, як для тривимірного тіла. Чи не зручніше б було використовувати оболонкові СЕ? Чи у фланців була досить тонка стінка?

Бейцун В. С.:

Саме моделі фланців були в експериментальних дослідженнях. При числовому розрахунку отримані дані порівнювалися з частиною маніпулятора без фланцевого з'єднання. Можливо, застосування оболонкових СЕ дасть кращий результат по точності. Проте 20-вузлові квадратичні гексагональні СЕ дали високу точність розрахунків.

Канд. тех. наук, доц. Ащепкова Н. С., доцент кафедри механотроніки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Доброго дня! Шановний здобувач, таке питання: яким чином відносяться маси корпусу космічного апарата (КА), конструкції маніпулятора, корисного навантаження (КВ) у обраній моделі? Хоча б, у відсотковому відношенні.

Бейцун В. С.:

Маса моделей КА бралася 330 кг, КН у вигляді складеної параболічної антени мало масу близько 10 кг, а маніпулятора, який складається з двох ланок, - близько 3 кг. Кожна ланка мала 1,47 кг.

Канд. тех. наук, доц. Ащепкова Н. С., доцент кафедри механотроніки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Добре. Проте при моделюванні КА з маніпуляторами, якщо маса маніпулятора з навантаженням менше, ніж 10% від маси КА, то всіма процесами, що протікають у конструкції нехтують.

Бейцун В. С.:

Я зрозумів, дякую. Обрана модель маніпулятора була використана для прикладу та відпрацювання алгоритму, програми та методики, в цілому. Вхідні дані були застосовані такими, оскільки вони взяті з реальної конструкції та описані у наукових публікаціях. В якості вхідних параметрів можна вводити і більші значення, які будуть перераховані програмою.

Чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф. Пошивалов В.П., директор Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України:

В мене є декілька запитань. Спочатку таке питання: чому Ви не зауважили, чи хтось такими питаннями, про які йде мова в дисертаційній роботі, ще в науці цікавився і розробляв?

Бейцун В. С.:

Так, багато вчених займаються проблемами космічних маніпуляторів, як вітчизняних, так і закордонних. Дякую за зауваження. Врахую його в подальших виступах.

Чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф. Пошивалов В.П., директор Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України:

Це на майбутнє. А зараз по суті, з точки зору математики. Який тип СЕ було застосовано під час моделювання методом скінченних елементів?

Бейцун В. С.:

В цілому, використовувалися 2 типи СЕ. Для моделей маніпулятора, коли проводився модальний аналіз та порівняння з експериментальним визначенням податливості фланцевого з'єднання, використовувались 20-вузлові квадратичні гексагональні лагранжеві СЕ з трьома ступенями свободи.

Для моделі шарніра, при визначенні величини люфту у з'єднанні, використовувались 10-вузлові квадратичні тетраедричні лагранжеві скінченні елементи з трьома ступенями свободи.

Чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф. Пошивалов В.П.,

директор Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України:

А яка кількість цих елементів була?

Бейцун В. С.:

В першому випадку, для моделі маніпулятора кількість СЕ була 13055 елементів. Для моделі шарніра було вже 39,5 тисяч СЕ. Для випадку порівняння з фланцевим з'єднанням – 47 тисяч елементів.

Чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф. Пошивалов В.П., директор Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України:

Яким чином здійснювалась перевірка достовірності результатів експериментальних досліджень фланцевого з'єднання?

Бейцун В. С.:

В середньому проводилося по 15 досліджень кожного типу для моделі вузла маніпулятора. Показання тензодатчиків при перших трьох навантаженнях-розвантаженнях не враховувалися, оскільки тоді мінімізовувався вплив нелінійних складових (затяжка гвинтів, видовження тросів та ін.).

Перевірка достовірності результатів експериментальних досліджень податливості фланцевого з'єднання здійснювалась шляхом контролю зворотності деформацій під час навантаження та розвантаження. При поступовому прикладенні навантаження фіксувались покази тензодатчика, а після повного зняття навантаження значення тензодатчика повертались до початкового рівня, що відповідало нульовому навантаженню. Це свідчило про відсутність залишкових деформацій і підтверджувало пружну поведінку з'єднання в умовах експериментального навантаження.

Чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф. Пошивалов В.П., директор Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України:

Ви розглядаєте транспортування та орієнтацію антени відносно космічного апарата. Чи можливе використання Вашого підходу для інших космічних технологічних операцій?

Бейцун В. С.:

Насправді, застосування конструкції маніпулятора не обмежується лише функціями транспортування та орієнтації антени відносно космічного апарата. Цей приклад був наведений як один із найбільш актуальних і показових на сьогодні. Основна увага в роботі приділялася розробці методології для проектування маніпуляторів космічного призначення з оптимальними параметрами, з урахуванням їхньої податливості, кінематичних характеристик і динаміки. Запропонована методика є універсальною і може бути адаптована до будь-якої конструкції, що включає шарнірні та фланцеві з'єднання, а її ланки виконані у вигляді стрижнів. Якщо розглянута конструкція задовольняє вимогам щодо кількості ступенів свободи, рухливості та жорсткісних

характеристик, то вона цілком може бути використана для інших космічних технологічних операцій.

Чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф. Пошивалов В.П., директор Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України:

І останнє запитання. Ви захищаєтесь за спеціальністю «Прикладна математика», і в назві роботи вказаний термін «математичне моделювання». Які саме математичні моделі були використані в дослідженні? Та яку роль вони відіграли при аналізі вашої конструкції?

Бейцун В. С.:

У роботі було використано кілька типів математичних моделей, які в сукупності забезпечили всебічний аналіз конструкції маніпулятора. Основною є модель системи з розподіленими параметрами, яка враховує податливість кожного елемента — як континуальну, вздовж стрижневих ланок, так і локальну: в зоні шарнірних і фланцевих з'єднань. Для аналізу динаміки застосовувалась математична модель руху багатоланкової системи, що доповнювалась імітаційною моделлю кінематичного керування та функціональною моделлю для відображення структурних взаємозв'язків. Також використовувались аналітичні та алгоритмічні моделі для обчислень силових параметрів, а для уточнення числових розрахунків — індуктивна модель, побудована на основі експериментальних даних. Сукупність цих підходів дозволила забезпечити точність моделювання й адекватність відображення фізичних процесів у конструкції маніпулятора.

Д-р техн. наук, проф. Сохацький А. В., професор кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики Університету митної справи та фінансів:

В мене є питання. Цікавить вплив температур на конструкцію маніпулятора, її елементи, шарнірні вузли, тощо. Як це враховується у Вашій математичній моделі?

Бейцун В. С.:

Дякую за запитання. Вплив температурних навантажень у даній роботі не проводився. Тільки податливість.

Д-р техн. наук, проф. Сохацький А. В., професор кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики Університету митної справи та фінансів:

Зрозумів. Тоді у мене ще одне питання. А що Ви розумієте під терміном «імітаційне моделювання»? Тому що я знаю, що імітаційне моделювання — це коли один фізичний процес замінюється іншим, у якому моделюються певні фактори.

Бейцун В. С.:

Так, дійсно. Наприклад, імітаційне моделювання в даній роботі – це наближене моделювання процесу розкладання маніпулятора в умовах невагомості на стенді компенсації ваги.

Д-р техн. наук, проф. Дреус А. Ю., завідувач кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Не дуже чітко з Вашої презентації зрозуміло про висновки та наукову новизну. Раджу більше зробити наголос на математичному моделюванні, а не технічних питаннях. В мене є питання. Ви постійно оперуєте похибками. Як Ви визначаєте похибки?

Бейцун В. С.:

Дякую за зауваження. Я відредагую доповідь та презентацію на майбутнє. Дійсно, в роботі наведено декілька похибок: при фотограмметричному експерименті, при порівнянні модального аналізу.

Стосовно фотограмметричного експерименту. Тут похибка є як при калібруванні самої камери, так і при отриманні даних з фотознімків. Перед початком фотограмметричного експерименту проводиться калібрування камери на основі кодованих мішеней. Чим більше відсоток розпізнавання камерою міток, тим нижчою буде похибка. Похибка вимірювання визначається через порівняння еталонної відстані, розміщеної на області зйомки, та тими значеннями, що видає програма після аналізу знімків.

Після модального аналізу приводиться відносна похибка отриманих значень першої форми власних коливань консольної балки за допомогою МСЕ, що порівнюються з емпіричною формулою Ірвіна.

Д-р техн. наук, проф. Дреус А. Ю., завідувач кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Зрозумів. Тут трошки не вистачає висновку, що визначення похибок, на перший погляд, – непроста задача. Важко швидко пояснити всі значення похибок та природу їх виникнення. Проте хоча б десь на слайді було б непогано розмістити таку інформацію.

Бейцун В. С.:

Добре, дякую за рекомендацію. Врахую при подальшій підготовці.

Д-р техн. наук, проф. Дреус А. Ю., завідувач кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

І останнє запитання. У Вас і в назві, і по змісту роботи постійно Ви використовуєте, що це космічний маніпулятор. Але наскільки тут «космічність» важлива? Де Ваша математика, а де «космічність»? Мені

здається, що тут можна було б оцю «космічність» в якості прикладу застосування Вашої методології використати. Як Ви гадаєте?

Бейцун В. С.:

В самій роботі, у другому розділі, розрахована обернена задача динаміки і отримані результати для даного маніпулятора в умовах космічного простору.

Вибір саме космічного маніпулятора як прикладу реалізації обумовлений актуальністю задач для галузі ракетно-космічної техніки, де вимоги до точності, мінімізації похибок, податливості та динамічного навантаження є особливо критичними. «Космічність» не є обмеженням, а радше — прикладом практичного застосування розробленої методології в умовах підвищених експлуатаційних вимог.

З математичної точки зору підхід є загальним, але апробація його на прикладі космічного маніпулятора забезпечила підвищену значущість та прикладну цінність отриманих результатів.

Канд. фіз.-мат. наук, доц. Чернецький С. О., доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Вікторе Сергійовичу, в мене таке питання. Почнемо з матеріалів. Ви говорите про космічний маніпулятор. Умови космосу – це температура, це особливі механічні характеристики, агресивне середовище. Які матеріали Ви заклали у математичні моделі?

Бейцун В. С.:

Дякую за запитання. Використовувались такі ж матеріали, що застосовуються у ракетно-космічній техніці. Для моделі маніпулятора – тонкостінної труби застосовувався матеріал вуглепластик CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer); матеріал шарніра - алюміній АА 2014, матеріал фланців - алюміній Д16Т, для натурної моделі маніпулятора - алюміній АД31Т5.

Канд. фіз.-мат. наук, доц. Чернецький С. О., доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Як вони реагують на космічне середовище? Як дані умови впливають на коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга?

Бейцун В. С.:

Я вважаю, що це потребує більш детального вивчення. Особливо того, як впливає на дані матеріали космічне середовище.

Головуючий, д-р фіз.-мат. наук, проф. Лобода В. В., професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Запитань більш немає. Переходимо до обговорення дисертаційної

роботи. Слово надається науковим керівникам.

ВИСТУПИ НАУКОВИХ КЕРІВНИКІВ:

Тарасов С. В., канд. техн. наук, ст. наук. співр., заступник директора з наукової роботи Інституту транспортних систем і технологій НАН України:

У процесі підготовки дисертації відповідно з індивідуальним планом наукової роботи Віктор Сергійович показав свою високу кваліфікацію як науковець, ґрунтовні знання фундаментальних та фахових дисциплін, вміння самостійно проводити наукові дослідження. Проявив творчий підхід до розв'язання наукових задач, що були поставлені. Дисципліновано і ретельно підійшов до навчального процесу.

Актуальність теми дослідження зумовлена підвищенням конструктивної складності сучасних просторово розвинених механічних систем таких, як космічні транспортні маніпулятори та вітроустановки зі змінною в процесі роботи конфігурацією ротора. Складні динамічні процеси, що мають місце при їх роботі потребують попереднього імітаційного моделювання з метою пошуку таких конструктивних рішень, які би забезпечили високу точність їх програмних рухів і прийнятні навантаження. Етап ескізного проектування таких систем потребує великого комплексу аналітичних та чисельних досліджень за допомогою сучасних теоретичних та експериментальних методів моделювання динаміки. Вибір раціональних конструктивних рішень при проектуванні в значній мірі залежить від знання та врахування в розрахунках основних чинників, що впливають на точність відпрацювання програмних рухів та навантаженість конструкції, а саме розподілених податливостей елементів, податливості фланцевих з'єднань та пружності шарнірних вузлів. Саме на вирішенні цих питань і зосереджена дисертаційна робота.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості їхнього використання при дослідженні механічних систем зі змінним тензором інерції. Типовими прикладами таких систем є просторово розвинуті механічні системи, такі як транспортні космічні маніпулятори та ротори вертикально і горизонтально осьових вітроустановок зі змінною в процесі роботи конфігурацією. Методологічні наробки, отримані в дисертаційній роботі, дозволять підвищити точність моделювання робочих режимів таких систем, що сприяє їх довговічності та безпеці роботи.

Дисертаційна робота Бейцуна В. С. тісно пов'язана з роботами, що проводились в відділі технічної механіки та енергетичних систем Інституту транспортних систем і технологій НАН України в рамках держбюджетної теми № 1.3.6.19 (прикладні дослідження) «Розробки та прикладні дослідження магнітолевітуючих транспортних і інноваційних енергетичних систем», номер державної реєстрації № 0121U108602, 2021–2023 рр.

Вважаю, що аспірант Бейцун В. С. успішно впорався з виконанням індивідуального навчального плану у повному обсязі. Дисертаційна робота є самостійно виконаною на належному науковому рівні роботою, що відповідає

вимогам чинного Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії та може бути допущена до захисту у спеціалізованій разовій раді.

Дзюба А. П., д-р техн. наук, професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Аспірант 4 року навчання Бейцун Віктор Сергійович закінчив бакалаврат механіко-математичного факультету у 2019 році та магістратуру у 2021 році за спеціальністю «Прикладна математика». Обидва дипломи він захистив з відзнакою. Навчається в аспірантурі на кафедрі теоретичної та комп'ютерної механіки з 2021 року до теперішнього часу.

Протягом навчання Віктор Сергійович повністю і своєчасно виконав освітню складову індивідуального навчального плану.

У процесі підготовки дисертації та виконання індивідуального плану наукової роботи аспірант працював систематично, сумлінно і творчо.

Актуальність теми дослідження зумовлена потребами ракетно-космічної галузі в створенні досконалих маніпуляторів для високоточної орієнтації розміщених на супутниках приладів (антен) в космічному просторі.

Основні результати дисертації отримано аспірантом самостійно та висвітлені у 3 статтях фахових видань України категорії Б. Апробацію одержаних наукових результатів дисертаційного дослідження проведено на 4 міжнародних наукових конференціях. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на підсумкових наукових конференціях Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара протягом 2022-2025 років. Таким чином, відповідно до чинного Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. (зі змінами), вимоги до кількості публікацій є виконаними.

Результати дисертаційної роботи Віктора Сергійовича тісно пов'язані з науковими дослідженнями, що проводились у Проблемній науково-дослідній лабораторії міцності і надійності конструкцій кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки механіко-математичного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара в рамках держбюджетної теми № 1-657-21 «Розробка методів прогнозування несучої здатності елементів конструкцій ракетної техніки без використання руйнуючих випробувань і вибір їх раціональних параметрів» та держбюджетної теми № 1-676-24 «Експериментальні і числові дослідження процесів руйнування та живучості оболонкових конструкцій з пошкодженнями при екстремальному статичному, локальному ударному і тепловому навантаженні».

Отримані в дисертаційному дослідженні Віктора Сергійовича результати можуть бути використані при створенні сучасних конструкцій

високоточних маніпуляторів космічного призначення.

Вважаю, що аспірант успішно впорався з виконанням індивідуального навчального плану у повному обсязі. Дисертаційна робота на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика є самостійно виконаною науковою роботою на актуальну тему, отримані аспірантом результати є новими, мають теоретичне й практичне значення у галузі механіки деформівного твердого тіла. Я рекомендую дисертаційну роботу до захисту у спеціалізованій разовій раді.

ВИСТУПИ ЧЛЕНІВ СЕМІНАРУ:

Д-р техн. наук, проф. Дреус А. Ю., завідувач кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Шановні колеги! Згідно з сучасними поглядами на підготовку докторів філософії, ми слухаємо з вами кваліфікаційну роботу. Вона навіть не наукова, а освітньо-наукова. І, на мою думку, безумовно, тут кваліфікацію продемонстровано. Як сказали керівники, людина дуже багато працювала над дисертацією; і вони підтверджують самостійність роботи і внесок здобувача в науку. Зауваження я би зробив такі: треба звернути увагу на термінологію, більш чітко сформулювати наукову новизну та висновки. Я бажаю Вам успіхів. Дякую!

Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гарт Е. Л., професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Здобувача я знаю багато часу. Віктор один із найкращих випускників наших бакалаврата і магістратури. Це мій дипломник, курсовик. Ми з ним багато років працювали, і можу сказати, що це дуже талановита людина. У нього ще в магістратурі була опублікована фахова стаття за його результатами наукових досліджень. Були доповіді на наукових міжнародних конференціях. Вважаю, що ми заслухали сьогодні хорошу роботу, яка має практичну спрямованість та сприятиме розвитку, зокрема, ракетно-космічної техніки. Це якраз на часі для посилення обороноспроможності нашої держави. Роботу я підтримую, здобувача особливо підтримую, і рекомендую кваліфікаційну роботу до захисту у спецраді.

Канд. тех. наук, доц. Ащепкова Н. С., доцент кафедри механотроніки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Тема дисертації, дійсно, дуже цікава, дуже актуальна. Щодо здобувача – у мене лише приємне враження. Дійсно, дуже серйозна молода людина, дуже фахова. Звісно, я підтримую цю роботу. І я вже казала, що в мене немає сумніву, що це добре виконана професійна робота. Лише треба трохи доопрацювати представлення наукових результатів та висновків, щоб вони набули більшої значущості та вагомості. Я вважаю, що ця робота має бути

рекомендована до захисту у фаховій спецраді.

Д-р фіз.-мат. наук, проф. Гук Н. А., в. о. проректора з науково-педагогічної роботи, професор кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Сьогодні я почувала чудову доповідь на дуже цікаву, актуальну тему. Здобувачем було продемонстровано, що він вдало опанував методику математичного моделювання, методику застосування обчислювальних методів і методику аналізу результатів. Також хочу відміти, що здобувач показав добрі навички м'якої комунікації. Зараз відбувалась така наукова дискусія, де спочатку він представив результати своєї дослідження, а потім відповідав на доволі такі гострі питання від провідних фахівців, від такої поважної аудиторії: професорів та доцентів. Саме тут він також показав, що він здатний вести наукову дискусію. За результатами представлення цієї дисертації також прошу рекомендувати цю роботу для подальших процедур проходження і підготовки до захисту.

Канд. фіз.-мат. наук, доц. Ходанен Т. В., доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Я також хочу підтримати дану роботу. Хочу засвідчити, що вона оформлена дуже ретельно. В роботі присутні майже всі складові освітньо-наукової програми «Прикладна математика»: питання теоретичної механіки і опору матеріалів, розрахункові моделі в скінченно-елементному пакеті. Тобто своєю роботою автор дійсно продемонстрував свої теоретичні та практичні навички, а саме – проведення наукових досліджень. Робота опублікована достатньо – три статті у фахових виданнях. Статті опубліковані разом із співавторами, якими є наукові керівники. Я вважаю, що здобувача та його роботу обов'язково треба нам підтримати.

Канд. фіз.-мат. наук, доц. Комаров О.В., в. о. завідувача кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Я знаю Віктора дуже давно, з часів бакалаврату. Пам'ятаю його, як сумлінного, дуже відповідального студента. Перш за все, що заслуговує на увагу, – це комплексність цієї роботи. Мені було дуже приємно побачити підрозділ, в якому наведений розв'язок задачі аналітичної механіки, рівняння Лагранжа другого роду. Це зараз достатньо рідкісний випадок в наших дисертаціях. Також проведені дослідження в рамках теорії коливань, теорії пружності. Мабуть, одне з головних, позитивних моментів цієї дисертації – це експерименти. Експерименти, які він провів, – це доволі трудомістка річ. Вважаю, що робота має достатню наукову новизну. Я підтримую роботу та рекомендую її до захисту.

Канд. фіз.-мат. наук, доц. Панін К.В., доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Я знаю Віктора Сергійовича давно. Хочу сказати, що яким він був студентом і якою він є людиною, цілком відображає те, яким він є дослідником. Тобто, можна довіряти результатам, які викладені в його роботі. Можливо, є якісь недоліки у формулюваннях. Проте їх можна виправити. Представлена сьогодні дисертація вирізняється серед інших робіт практичною цінністю та значним обсягом експериментальних досліджень. Тому я хочу підтримати Віктора Сергійовича, його роботу і побажати йому всього найкращого.

Головуючий, д-р фіз.-мат. наук, проф. Лобода В. В., професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара:

Сьогодні на нашому семінарі дисертаційна робота була всебічно проаналізована та одностайно підтримана. Я також цілком підтримую як представлену роботу, так і здобувача. Особливо приємно відзначити наявність експериментальних досліджень, що є доволі рідкісним для нашої кафедри через складність таких робіт. Поєднання експерименту з теоретичними розрахунками методом скінченних елементів підвищує достовірність отриманих результатів. Вважаю, що дисертація відповідає всім необхідним вимогам, зокрема щодо актуальності та практичної значущості, і заслуговує на підтримку.

ВИСНОВОК

Актуальність теми зумовлена потребами ракетно-космічної галузі в створенні досконалих маніпуляторів для високоточного позиціонування, розміщених на супутниках, приладів в космічному просторі. У дисертації пропонується методологія удосконалення параметрів даних конструкцій шляхом визначення та врахування пружних податливостей як континуальної, так і локальних. Це дасть змогу більш точно контролювати динамічний процес транспортування та позиціонування корисного навантаження, або враховувати на етапі проектування конструкцій пружні податливості елементів, адаптуючи відповідним чином систему керування.

Затвердження теми та плану дисертації. Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, протокол № 4 від 18 листопада 2021 р. Науковими керівниками призначено д-ра техн. наук, проф. Дзюбу Анатолія Петровича, канд. техн. наук, ст. наук. співр. Тарасова Сергія Васильовича.

Підготовка здобувача третього рівня вищої освіти здійснюється за акредитованою освітньо-науковою програмою «Прикладна математика» зі спеціальності 113 Прикладна математика (сертифікат про акредитацію освітньої програми 2068, дійсний до 01.07.2027 р.).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з індивідуальним планом підготовки аспіранта кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Дослідження за темою дисертації здійснювалися в проблемній науково-дослідній лабораторії міцності і надійності конструкцій кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки механіко-математичного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара в рамках держбюджетних тем № 1-657-21 «Розробка методів прогнозування несучої здатності елементів конструкцій ракетної техніки без використання руйнуючих випробувань і вибір їх раціональних параметрів», номер державної реєстрації № 0121U109768 (2021–2023 рр.) та № 1-676-24 «Експериментальні і числові дослідження процесів руйнування та живучості оболонкових конструкцій з пошкодженнями при екстремальному статичному, локальному ударному і тепловому навантаженні», номер державної реєстрації № 0124U000328 (2024–2026 рр.); а також у відділі технічної механіки та енергетичних систем Інституту транспортних систем і технологій НАН України в рамках держбюджетної теми № 1.3.6.19 (прикладні дослідження) «Розробки та прикладні дослідження магнітолевітуючих транспортних і інноваційних енергетичних систем», номер державної реєстрації № 0121U108602, 2021–2023 рр.

Публікації та особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації опубліковано у 7 наукових працях, серед яких: 3 статті у фахових виданнях України, затверджених МОН України, 1 – матеріали міжнародних наукових конференцій і 3 тез доповідей.

Усі основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. У працях, написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у побудові математичних моделей задач, запропонованих методиках й алгоритмах числових реалізацій їх розв'язування, безпосередній участі у виконанні всіх етапів робіт: комп'ютерне моделювання, проведення обчислювальних та натурних експериментів, інтерпретація результатів, обговорення і формулювання висновків. Публікації Бейцуна В. С. відповідають вимогам пп. 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої разової ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44 (зі змінами).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. *Обґрунтованість і достовірність одержаних результатів* забезпечується коректним застосуванням відомих методів аналітичної динаміки, положень лінійної теорії пружності, апробованих математичних моделей і числових алгоритмів розрахунків, а також наукових положень фотограмметричного методу при експериментальних дослідженнях. Додатково, достовірність підтверджується коректним вибором розрахункових схем, зіставленням

отриманих результатів у часткових випадках із відомими розв'язками інших авторів, відповідністю результатів розв'язання нових задач фізичній суті досліджуваних явищ і результатами експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- **вперше** отримані результати системних теоретико-експериментальних досліджень податливості секцій маніпулятора, шарнірних та фланцевих вузлів маніпулятора космічного призначення;

- виконано обчислювальні експерименти для аналізу динамічних характеристик і зусиль у шарнірному вузлі дволанкової маніпуляторної системи; отримано **нові** залежності величини моменту в шарнірі від часу розвороту однієї секції маніпулятора, а також від врахування моделей основного тіла та корисного навантаження;

- розроблена та апробована **оригінальна** методика експериментальних досліджень для визначення люфтів та пружних податливостей в шарнірних вузлах маніпуляторів і штанг космічних апаратів, що базується на фотограмметричному методі;

- побудована **авторська** методика експериментальних випробувань та отримані нові дані досліджень впливу податливості фланцевого з'єднання на моделювання динаміки робочих процесів з'єднувального вузла космічного маніпулятора, призначеного для керування розташуванням у просторі спеціального обладнання;

- отримані **нові** дані випробувань податливості фланцевого з'єднання досліджуваного зразка штанги маніпулятора на основні види механічних навантажень: згинання, кручення та розтяг-стиск.

Практичне значення одержаних результатів. Методика, запропонована в дисертаційній роботі, може бути використана для побудови та проведення експериментальних досліджень пружних податливостей і люфтів у шарнірних вузлах багатоланкових конструкцій та механізмів. Це дозволяє мінімізувати похибки позиціонування із застосуванням фотограмметричного методу.

Розроблена у дисертаційній роботі методика визначення локальних податливостей у фланцевих з'єднаннях під впливом основних видів механічних навантажень має науково-методичне значення, оскільки забезпечує підвищену точність оцінки характеристик таких вузлів.

Побудована математична модель кінематики та динаміки космічного маніпулятора надає можливості для оцінки впливу часу розкладання секцій на силові характеристики поворотних вузлів із врахуванням конструктивних особливостей його функціонування.

Отримана модель може бути узагальнена для аналізу динамічних характеристик і силових навантажень як окремих шарнірних з'єднань між секціями маніпулятора, так і всієї системи у цілому, що надає можливості для оптимізації параметрів керування маніпулятором та розширення функціональних можливостей космічного апарату.

Отримані результати можуть бути рекомендовані для упровадження в проєктуванні та оптимізації багатоланкових конструкцій ракетно-космічної

техніки, зокрема у конструкторських бюро та науково-дослідних установах, що займаються розрахунком і виготовленням таких систем. Це дозволить підвищити точність моделювання робочих режимів маніпуляторних систем, що безпосередньо впливатиме на їхню довговічність, надійність і безпеку експлуатації.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Бейцун В. С., Тарасов С. В. Динаміка і зусилля у шарнірі дволанкової системи при позиціонуванні корисного навантаження відносно космічного апарату // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпро: Ліра, 2022. – Вип. 35. – С. 5-16. <https://doi.org/10.15421/4222211> (фахове видання, категорія Б) (особистий внесок Бейцуна В. С.: аналітичний огляд, підбір та опрацювання літератури, побудова математичної моделі, аналітичне та числове розв'язання задачі, обговорення і формулювання висновків; особистий внесок Тарасова С. В.: постановка задачі, консультування, обговорення і формулювання висновків).
2. Бейцун В. С., Тарасов С. В. Методика фотограмметричного вимірювання люфтів та пружних податливостей в шарнірних вузлах транспортних маніпуляторів та штанг космічних апаратів // Технічна механіка. 2024. Вип. 3. С. 124-137. <http://doi.org/10.15407/itm2024.03.124> (фахове видання, категорія Б) (особистий внесок Бейцуна В. С.: аналітичний огляд, підбір та опрацювання літератури, збір та обробка експериментальних даних, формулювання висновків; особистий внесок Тарасова С. В.: аналітичний огляд, постановка задачі, консультування).
3. Бейцун В. С., Дзюба А. П. Експериментальне дослідження податливості фланцевих з'єднань у моделі маніпулятора космічного призначення // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпро: Ліра, 2024. – Вип. 38. – С. 5-19. <https://doi.org/10.15421/4224101> (фахове видання, категорія Б) (особистий внесок Бейцуна В. С.: аналітичний огляд, побудова математичної моделі, збір та обробка експериментальних даних, інтерпретація результатів, формулювання висновків; особистий внесок Дзюби А. П.: постановка задачі, консультування, обговорення і формулювання висновків).

Матеріали конференцій

4. Khoroshylov S. V., Shamakhanov V. K., Beitsun V. S., et al. Dynamics modelling and analysis of the deployable reflector antenna for sar mini-satellites // 41st ESA Antenna Workshop on Large Deployable Antennas (25 - 28 September 2023). – Noordwijk, The Netherlands: ESA-ESTEC, 2023. https://www.researchgate.net/publication/374544077_DYNAMICS_MODELING_AND_ANALYSIS_OF_THE_DEPLOYABLE_REFLECTOR_ANTENNA_FOR_SAR_MINI-SATELLITES.

Тези доповідей

5. Бейцун В. С., Тарасов С. В., Дзюба А. П. Математичне моделювання розкладання маніпулятора космічного призначення // Людина і космос: Збірник тез XXIV Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції “Людина і космос” (травень 2022 р.). – Дніпро, ДКАУ НЦАОМ ім. О. М. Макарова, 2022. – С. 100.
<https://spacehuman.org/files/doc/sbornik2022.pdf>.

6. Бейцун В. С., Тарасов С. В. Методи фото- та відеограмметрії при дослідженні динаміки просторово розвинених космічних систем // Людина і космос: Збірник тез XXIV Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції “Людина і космос” (12 – 14 квітня 2023 р.). – Дніпро, ДКАУ НЦАОМ ім. О. М. Макарова, 2023. – С. 121.
<https://spacehuman.org/uploads/source/doc/sbornik2023.pdf>.

7. Бейцун В. С., Тарасов С. В. Методи візуального стеження при натурному моделюванні динаміки бортових маніпуляторів та штанг космічних апаратів // Актуальні проблеми механіки: Тези доповідей на Міжнародній науковій конференції (до 145-річчя від дня народження С.П. Тимошенка, 14–16 листопада 2023 р.). – Дніпро, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, 2023. – С. 280 – 281.
https://inmech.kyiv.ua/doc/news/2023/actual_problems_of_mechanics/abstracts.pdf.

На підставі заслуховування та обговорення доповіді Бейцуна В.С. про основні положення дисертаційної роботи, питань та відповідей на них УХВАЛИЛИ:

1. Вважати, що за актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованості, наукової та практичної цінності здобутих результатів дисертація Бейцуна Віктора Сергійовича на тему «Математичне моделювання механічних процесів функціонування маніпулятора космічного призначення» відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами).

2. Рекомендувати дисертаційну роботу Бейцуна Віктора Сергійовича на тему «Математичне моделювання механічних процесів функціонування маніпулятора космічного призначення» до захисту в разовій спеціалізованій вченій раді на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

3. Клопотати перед вченою радою університету розглянути питання про створення спеціалізованої вченої ради для проведення разового захисту дисертації на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика Бейцуна Віктора Сергійовича у такому складі:

№ з/п	Прізвище, ім'я, по батькові	Місце основної роботи, підпорядкування, посада	Науковий ступінь, шифр, назва спеціальності, за якою захищена дисертація, рік присудження	Вчене звання (за спеціальністю, кафедрою), рік присвоєння	Наукові публікації, опубліковані за останні п'ять років, за науковим напрямом, за яким підготовлено дисертацію здобувача
1	2	3	4	5	6
1.	Дреус Андрій Юлійович (голова)	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри аерогідро-механіки та енергомасопереносу	доктор технічних наук, 05. 15. 09 - геотехнічна та гірнича механіка, 2018 р.	професор кафедри аерогідро-механіки та енергомасопереносу, 2020 р.	1. Dron' M., Lapkhanov E., Golubek A., Dreus A., Kositsyna O., Dubovik L. Estimating the degree of disposal of a launch vehicle casing made from polyolefins in the earth's atmosphere. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 1. No. 133. P. 33–43. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.319437 (фахове видання, категорія А, Scopus) 2. Dron M., Hilorme T., Golubek A., Dreus A., Dubovik L. Determining the performance indicators of employing combined methods for removing space objects from near-earth orbits // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 115. No. 3. P. 6-12. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253096 (фахове видання, категорія А, Scopus) 3. Bulat A., Osinnii V., Dreus A., Osinnia N. Mathematical modelling of thermal stresses within the borehole walls in terms of plasma action // Min. miner. depos. 2021. Vol. 15. No. 2. P. 63-69. https://doi.org/10.33271/mining15.02.063 (фахове видання, категорія А, Scopus)
2.	Пошивалов Володимир Павлович (опонент)	Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, директор	доктор технічних наук, 01. 02. 04 - механіка деформівного твердого тіла, 1993 р.	чл.-кор. НАН України, Відділення механіки НАНУ, 2024 р.; професор, 05.02.09 – динаміка і міцність машин, 1999 р.	1. Пошивалов В. П., Данієв Ю. Ф. Надійність і безпека стартових комплексів ракет-носіїв // Технічна механіка. 2023. Вип. 2. С. 13-20. https://doi.org/10.15407/itm2023.02.013. (фахове видання, категорія Б) 2. Пошивалов В. П. Ймовірнісна модель довготривалої міцності конструкційних матеріалів на основі кінетичної теорії // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпро: Ліра, 2022. – Вип. 35. – С. 73–83. https://doi.org/10.15421/4222217 (фахове видання, категорія Б) 3. Пошивалов В. П., Данієв Ю. Ф., Резниченко Л. В., Телегіна І. І. Про забезпечення надійності об'єктів ракетно-космічної техніки на етапі проектування // Технічна механіка. 2020. Вип. 1. С. 67-75. https://doi.org/10.15407/itm2020.01.067 (фахове видання, категорія Б)

1	2	3	4	5	6
3.	Стеблянко Павло Олексійович (опонент)	Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, відділ термопластичності, провідний науковий співробітник	доктор фізико-математичних наук, 01.02.04-механіка деформівного твердого тіла 1996 р.	професор кафедри вищої математики, 1999 р.	1. Steblyanko P., Demichev K., Petrov A. Behaviour Modelling of Pseudo-Elastic-Plastic Material at Non-Stationary Loading // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2021. – Vol. 43, No. 1. – P. 107–128. https://doi.org/10.15407/mfint.43.01.0107 (фахове видання категорії А, Scopus, Q3). 2. Стеблянко П.О., Петров О.П. Нелінійна модель поведінки псевдопружно-пластичних сплавів // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпро: Ліра, 2023. – Вип. 36. – С. 127–141. https://doi.org/10.15421/4223111 (фахове видання, категорія Б) 3. Стеблянко П.О., Дьомічев К.Е., Петров О.Д. Вигин пластини з функціонально-неоднорідного матеріалу при наявності великих деформацій / Strength of materials and theory of structures: Scientific-and-technical collected articles. – Kyiv: KNUBA, 2023. – Iss. 110. P. 447-456. https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.447-456 (фахове видання категорії А, Web of Science)
4.	Ходанен Тетяна Володимирівна (рецензент)	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки	кандидат фізико-математичних наук, 01.02.04-механіка деформівного тіла, 16.12.2009 р.	доцент кафедри теоретичної та прикладної механіки, 2015 р.	1. Labibov R., Khodanen T. (2024) Development of slip line of plasticity localization in construction materials // Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol 116, no 4, pp. 70–77. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2024.04.070 (фахове видання, категорія Б) 2. Ходанен Т., Лобода К. Аналіз електромеханічних полів в околі вершини тріщини у п'єзоелектричному матеріалі // Системні технології. Том 5 № 154 (2024). С. 82-90 https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-154-2024-10 (фахове видання, категорія Б) 3. Шевельова Н. В., Ходанен Т. В. Взаємодія двох штампів із різними умовами контакту на границі ізотропної півплощини // Computer Science and Applied Mathematics. 2021. №1. С. 81-89. DOI: https://doi.org/10.26661/2413-6549-2021-1-10. (фахове видання, категорія Б, Scopus)
5.	Ащепкова Наталія Сергіївна (рецензент)	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри механотро-ніки	кандидат технічних наук, 05. 13. 03–системи та процеси керування, 31.05.2013 р.	доцент, кафедри механотро-ніки, 2015 р.	1. Koshovyi M.D., Ashhepkova, N. S., Luchko A.S. Modeling of manipulator grip reaches with regard to generalized coordinate constraints // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2022. No. 1. P. 123 – 127. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/123. (фахове видання, категорія А, Scopus) 2. Ashhepkova, N. Devising a method to analyze the current state of the manipulator workspace // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 1. No. 7. P. 63–74.

1	2	3	4	5	6
					https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225121 . (фахове видання, категорія А, Scopus) З. Кошевий М. Д., Ашенкова Н. С. Метод синтезу оптимальних траєкторій схвату манипулятора автономного мобільного робота // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Інформатика та моделювання = Bulletin of the National Technical University "KhPI" Ser.: Information and Modeling : зб. наук. пр. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 86-98. https://doi.org/10.20998/2411-0558.2021.01.07 . (фахове видання, категорія Б)

Результати голосування:

«За» - 19 осіб ,

«Проти» - немає,

«Утримались» - немає.

Головуючий

Секретар



Володимир ЛОБОДА

Тетяна ХОДАНЕН