

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

**ПАСТЕРНАК ЮРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ**



УДК: 681.518.3

**СИНТЕЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ АНТЕННИМИ КОМПЛЕКСАМИ НА  
ОСНОВІ ПАРАЛЕЛЬНОГО КІНЕМАТИЧНОГО МЕХАНІЗМУ НАВЕДЕННЯ  
ІЗ СТАТИЧНО НЕВИЗНАЧЕНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2021

*Дисертацією є рукопис.*

Робота виконана в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Паламар Михайло Іванович,**  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,  
завідувач кафедри приладів і контрольних-вимірювальних систем.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Цмоць Іван Григорович,**  
Інститут комп'ютерних наук та інформаційних технологій  
Національного університету «Львівська політехніка»,  
професор кафедри автоматизованих систем управління;

кандидат технічних наук, доцент  
**Якименко Ігор Зіновійович,**  
Західноукраїнський національний університет,  
доцент кафедри кібербезпеки.

Захист відбудеться 13 травня 2021 р. о 14:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради К58.052.06 в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий «09» квітня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



М.Є. Фриз

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним з найбільш пріоритетних напрямів розвитку інформаційних технологій в області космічної діяльності у світі та Україні є дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) – метод вивчення земної поверхні та її надр, що базується на неконтактній реєстрації електромагнітного випромінювання земної поверхні в різних діапазонах спектру. В антенних системах наведення та супроводу низькоорбітальних космічних апаратів (КА) ДЗЗ для забезпечення зв'язку з ними важливу роль відіграє опорно-поворотний пристрій (ОПП) антенної системи (АС). Такий ОПП повинен забезпечити великий динамічний діапазон швидкостей обертання великогабаритних рефлекторів (діаметрами від 5 до 12 м) – від 0 до 15 °/с у поєднанні з високою точністю наведення променя антени на супутник – до одиниць кутових хвилин. Слідкування за супутником забезпечується відповідними переміщеннями виконавчих осей опорно-поворотного пристрою антенної системи. Як правило, в існуючих АС конструкція опорно-поворотних платформ базується на різних видах редукторних обертових механізмів. До недоліків всіх типів класичних двохосьових, а також модифікованих трьохосьових конструкцій ОПП АС можна віднести складність і високі вимоги до точності виготовлення обертових механізмів великого діаметру, що приводить до громіздкості, великої маси, складності виготовлення і складання вузлів ОПП, збільшення потужності електроприводів та ускладнення систем керування і, в загальному, до зростання вартості таких АС. В Україні на даний час існує лише декілька робочих АС що здатні приймати інформацію ДЗЗ, які отримані внаслідок модернізації АС військово-промислового комплексу колишнього радянського союзу, що пов'язано із значними затратами на створення нових антенних комплексів ДЗЗ. Разом з тим, для забезпечення обороноздатності країни на належному рівні, а також забезпечення розвитку різних галузей господарської діяльності в державі необхідне створення нових, ефективних АС ДЗЗ із використанням сучасних підходів до проектування.

В останні роки в робототехніці, конструкціях станків, стендів та іншого обладнання для переміщення по складних траєкторіях (позиціонування) набуває популярності використання механізмів-маніпуляторів з паралельними кінематичними ланками, зокрема на основі платформи Г'ю-Стюарта, яка має шість ступенів свободи (6DoF) — три поступальних і три обертальних. Вагомий внесок у дослідження платформи Г'ю-Стюарта (Hexapod) внесли Stewart D. A., S. Ibaraki, T. Yokawa, E. F. Fichter, Frank Janse van Vuuren, Lee D.S. Дослідженням керування системою гексапод, розглянуто в роботах: А. М. Кириченко, В. Б. Струтинський, С. І. Осадчого, В. А. Зозуля, Н. С. Слободзяна, Ю. А. Жукова, G. Mishev, V. Rupetsov, J. P. Merlet. У роботі Н. А. Терехина описана система керування, в основі якої є схема з трьох точкових розрахунків, що дозволяє спростити розрахунок. У роботі А. Ю. Биканова описано метод динамічного керування, який полягає у формуванні керуючих сигналів, що здійснюються з урахуванням рівнянь динаміки маніпулятора. При цьому за рахунок ускладнення керування вдається зменшити негативний вплив нелінійностей і перехресних зв'язків, підвищити якість процесу керування, забезпечити його стійкість незалежно від конкретної траєкторії. Дослідження

українських вчених зосереджені на застосуванні паралельного кінематичного механізму для галузі верстатобудування в якості механізму позиціонування шпинделя верстата із числовим програмним керуванням. Дослідження закордонних вчених в основному спрямовані на використання Нехарод в тренажерах для симуляції польотів літальних апаратів, для навчання льотного персоналу; стендовому обладнанні – для тестування різних виробів; медицині – для позиціонування різної оснастки в хірургії, для точного позиціонування пацієнта перед рентгенівським або фотонним променем; в астрономічних дослідженнях – для точного позиціонування контррефлектора радіотелескопів із великим діаметром основного дзеркала.

В доступних наукових публікаціях відсутній матеріал, що розкриває особливості застосування паралельного кінематичного механізму Нехарод у конструкціях ОПП повноповоротних АС для дистанційного зондування Землі. Інформація про поодинокі випадки застосування Нехарод в конструкціях АС, (Sicilsat Communications Systems — Італія, Zodiac/In-Snec — Франція, ASTROSCALEPte Ltd — Японія) обмежується рекламним характером.

Використання паралельного кінематичного механізму на основі платформи Г'ю-Стюарта (Нехарод) для керування наведенням антенних станцій дало б низку суттєвих переваг порівняно з класичними кінематичними механізмами ОПП, перш за все це: спрощення, здешевлення механічної конструкції, зменшення масо-габаритних показників, підвищення динамічних параметрів АС, відсутність «мертвої» зони при супроводі КА, траєкторія яких проходить в близькій до зеніту області, що призводить до втрати сигналу.

Для реалізації ОПП-Нехарод необхідне узгоджене синхронне керування системою лінійних приводів із октаедральною компоновкою із статично невизначеними зв'язками. Для досягнення мети необхідно синтезувати модель конструкції ОПП-Нехарод як об'єкту керування. Засобами імітаційного моделювання дослідити особливості керування такою мехатронною системою, оцінити вплив похибки від відхилень в конструкції ОПП-Нехарод на точність наведення і супроводу супутників ДЗЗ, розробити програмно-апаратний комплекс із системою керування ОПП-Нехарод, а також провести практичні експерименти для перевірки адекватності прийнятих рішень та можливості забезпечення необхідної точності керування при наведенні та супроводі низькоорбітальних супутників ДЗЗ.

Таким чином актуальною науковою задачею є розроблення імітаційних моделей та методу управління наведенням системи керування антени на основі опорно-поворотної платформи з паралельним кінематичним механізмом наведення для підвищення точності наведення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 2013-2020рр. відповідно до тематичних планів виконання науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя, зокрема: НДР (ДІ206-13) «Розробка та дослідження нових поворотних платформ антенних станцій та систем керування для дистанційного зондування Землі» (№ держреєстрації 0113U000257, 2013-2014р.); НДР (ДІ 226-16) «Синтез нових конструкцій та засобів керування антенними станціями зв'язку з

низькоорбітальними супутниками дистанційного зондування Землі» (№ держ. реєстрації 0116U004743, 2016-2017р.); ДКР (з/д № 382-15) «Модернізація системи керування наземної станції прийому інформації ДЗЗ «ПС-8,2», (№ держреєстрації 0115U005613, 2015р., ДНДП «Конекс»); ДКР (г/д № 406-16) «Розроблення перспективної космічної техніки. Модернізація системи управління УНСП» шифр «Управління», № держреєстрації 0116u007364, 2016 р., договір з Національним центром управління і випробування космічних засобів (НЦУВКЗ); ДКР (г/д № 464-18) «Удосконалення наземного інформаційного комплексу. Модернізація пункту прийому інформації ППП-1.7Д», держреєстр. № 0118u004721, 2018 р., НЦУВКЗ); ДКР (г/д № 468-18) «Розроблення та виготовлення ракетно-космічної техніки. Розробка автоматизованої системи керування радіотелескопу РТ-32М4В», шифр «Керування-МАРК-4В», 2018р., договір з ПрАТ НВП «Сатурн»; ДКР (г/д № 475-19) «Удосконалення наземного комплексу спостереження за космічними об'єктами. Модернізація програмно-технічних засобів КОС «Сажень-С». Модернізація автоматизованої системи управління телескопу АЗТ-28», держреєстр. № 0118u00240, 2019р., дог. з НЦУВКЗ; НДР (г/д № 485-20) «Науково-технічне обґрунтування напрямів створення автоматизованої системи управління мережею оптичних засобів спостереження за навколосемним космічним простором», шифр «Управління-ОЗС», держреєстр. № 0120U102508, 2020р.; дог. з НЦУВКЗ.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення імітаційних моделей та методу управління наведенням в системі керування опорно-поворотною платформою з паралельним кінематичним механізмом наведення для підвищення точності наведення антенних систем.

Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити такі **задачі**:

1. Провести аналіз методів та алгоритмів керування позиціонуванням платформи Г'ю-Стюарта на основі паралельного кінематичного механізму з різними варіантами октаедральної компоновки актуаторів;

2. Розробити імітаційну модель ОПП АС на основі кінематичного механізму Нехарод, як об'єкту керування;

3. Розробити метод синхронного керування видовженням системи лінійних приводів із октаедральною компоновкою у складі ОПП АС для наведення і супроводу траєкторій КА ДЗЗ променем рефлектора, розміщеного на верхній платформі ОПП-Нехарод;

4. Дослідити методом імітаційного моделювання похибок, що виникають в роботі механізму ОПП-Нехарод, розробити способи їх зменшення;

5. Практично реалізувати та експериментально дослідити роботу технічних засобів та алгоритмів системи керування АС з ОПП-Нехарод, перевірити достовірність результатів моделювання.

**Об'єкт дослідження** – процес керування антенними станціями для наведення та супроводу космічних апаратів дистанційного зондування Землі.

**Предмет дослідження** – схемотехнічні, алгоритмічні методи та засоби керування антенною станцією із кінематичним механізмом ОПП на основі платформи Г'ю-Стюарта (Нехарод).

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань використовувалися: методи алгебри, аналітичної та афінної геометрії, теорії матриць, теорії похибок, теорія автоматичного керування, математичного та фізичного моделювання, експеримент.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше розроблено імітаційну модель антенної системи на основі опорно-поворотної платформи Г'ю-Стюарта, яка за рахунок врахування особливостей руху лінійних приводів кінематичного механізму Нехарод забезпечує підвищення точності наведення на координати низькоорбітальних космічних об'єктів, та супроводу траєкторій низькоорбітальних супутників;

2. Вперше розроблено метод керування, який враховує вплив конструктивних особливостей просторового механізму – системи лінійних кінематичних ланок із статично невизначеними зв'язками на точність наведення променя рефлектора великогабаритної антени, що дає змогу підвищити точність наведення та зменшити похибки супроводу траєкторій низькоорбітальних космічних об'єктів у розроблюваних системах керування;

3. Удосконалено метод управління антенною платформою на основі просторового механізму із системи лінійних кінематичних ланок за рахунок розпаралелення процесу керування окремими актуаторами, що зменшило складність алгоритму керування та забезпечило управління в режимі реального часу;

4. Удосконалено метод керування окремими актуаторами, який за рахунок апаратної реалізації, з використанням ПЛІС, зменшує апаратну складність, кількість міжблочних інтерфейсних каналів зв'язку та забезпечує синхронне керування актуаторами в режимі реального часу.

**Практична значення отриманих результатів** полягає в створенні програмно-апаратного комплексу керування АС з ОПП із системи лінійних приводів Нехарод.

1. На базі розробленої моделі та методу керування розроблено алгоритм розрахунку видовження системи актуаторів та створено програму керування антенним комплексом для супроводу низькоорбітальних КА;

2. Розроблено експериментальний взірець ОПП АС на основі платформи Г'ю-Стюарта без складних обертових механізмів великого діаметру;

3. Розроблено програмно-апаратний комплекс синхронного керування системою лінійних приводів ОПП-Нехарод на основі мікроконтролера та ПЛІС що забезпечує високу швидкодію та роботу в режимі реального часу;

4. Використання запропонованого паралельного кінематичного механізму – Нехарод в якості ОПП АС дає змогу проектувати антенні системи з меншими масо-габаритними параметрами опорно-поворотної платформи (в 2-5 раз порівняно з класичними АС), та покращеними динамічними характеристиками, без «мертвих зон» супроводу супутників та здешевити антенні системи в цілому.

Результати роботи було впроваджено у: державному підприємстві «Науково-дослідний інститут комплексної автоматизації» м. Донецьк (акт впровадження від 20.08.2013 р.); у Тернопільському державному науково-технічному підприємстві «ПРОМІНЬ» (акт впровадження від 05.07.2015 р.); у Товаристві з обмеженою відповідальністю «Техас-Т» м. Тернопіль (акт впровадження від 03.07.2020 р.); у

навчальному процесі кафедри приладів та контрольно-вимірювальних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (акт впровадження від 04.01.2021 р.)

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є результатом самостійних наукових досліджень, в яких викладено авторський підхід до побудови системи керування антенним комплексом на основі ОПП з паралельним кінематичним механізмом. Основні твердження і результати наукового дослідження за темою дисертації автор отримав самостійно у процесі науково-дослідної роботи. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить: [1, 3, 8-10, 12-14, 16] – запропонована модель і алгоритм керування антеною системою з опорно-поворотним пристроєм на основі механізму паралельної кінематичної структури типу «Нехарод», розроблено алгоритм обчислення видовження кожного із актуаторів для будь-якого заданого положення, розроблена тривимірна математична модель; [2] – рахунок траєкторії руху шести актуаторів в залежності від положення космічного апарата у просторі; розрахунок і моделювання траєкторій супроводу КА відносно АС та перетворення координат наведення променя антени в локальні координати лінійних приводів платформи Г'ю-Стюарта; [4] – проведено пошук оптимальних налаштувань ПД-регулятора для керування антенної системи; [5, 7] – проведено імітаційне моделювання та експериментальне дослідження системи керування АС з частотно регульованим асинхронним електроприводом; [6] – розробка та реалізація алгоритму зчитування і опрацювання вимірювальних даних; [11] – запропонована конструкція двоповерхового ОПП, розроблена відповідна модель; [15, 17-18] – розроблення та опрацювання теоретичних основ; [19] - побудова динамічної моделі антени.

**Апробація результатів дисертації.** Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані на наукових конференціях, серед них XII наукової конференції ТДТУ ім. І. Пулюя (м. Тернопіль, 2008 р. ); IX та XII міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2010: стан і перспективи” (м. Київ, 2010 р., 2013); міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» ТНТУ ім. І.Пулюя (м. Тернопіль 2010 р.); Міжнародна науково-технічна конференції “Актуальні задачі сучасних технологій” (Тернопіль 2010); Науково-технічна конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування» (Тернопіль 2011 р.); XV наукової конференції ТНТУ ім. І.Пулюя (Тернопіль 2011); VIII-th International Conference «Perspective Technologies and Methods in MEMS Design» (Lviv-Polyana, Ukraine, 2012); Міжнародний науково-практичний Форум "Наука і бізнес - основа розвитку економіки (Дніпропетровськ: 2012 р). II та III, V, VI Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль 2013, 2014, 2016); XVI Українська конференції з космічних досліджень (Одеса 2016); Інформаційно-комунікативний захід «Наука: безпека країни та розвиток військово-промислового комплексу» (м. Київ 2016).

Результати дисертації висвітлено й обговорено на наукових семінарах кафедри приладів та контрольних-вимірювальних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль).

**Публікації.** За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 22 наукові праці, серед яких 5 статей у фахових науково-технічних виданнях, 2 статті у закордонному науковому періодичному виданні держави-члена Європейського Союзу [6, 7], 2 публікації проіндексовані міжнародною наукометричною базою Scopus [6, 7], 1 стаття проіндексована міжнародною наукометричною базою Web of Science Core Collection [7], 1 стаття проіндексована міжнародною наукометричною базою Index Copernicus [3], та 12 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, висновку, списку використаних джерел із 117 найменувань і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 187 сторінок, з яких основний зміст викладений на 108-и сторінках, містить 46 рисунків та 11 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, наукову новизну та практичну цінність роботи. Вказано дані про зв'язок роботи з науковими програмами та планами НДР університету за місцем виконання роботи. Висвітлено інформацію щодо апробації та публікацій результатів роботи.

**У першому розділі** проаналізовано тенденції розвитку антенних систем на базі платформи Г'ю-Стюарта. Розглянуто методи керування антенними комплексами, зокрема виділено: керування рухом в робочому просторі та керування рухом в просторі узагальненої координати. З'ясовано основні фактори, які впливають на точність та ефективність керування систем наведення антен для супроводу супутників дистанційного зондування Землі.

Визначено фактори, які ускладнюють керування механізмом із статично невизначеними зв'язками. Зокрема показано, що керування рухом робочого органу платформи Г'ю-Стюарта в робочому просторі може бути реалізоване тільки після визначення стану системи 6 DOF шляхом прямих вимірювань та його оцінки. Оскільки задача керування актуаторами на основі прямої кінематики приводиться до системи диференціальних рівнянь, розв'язок якої залежить від початкових умов, супровід траєкторії супутника у реальному часі ускладнюється. Для відслідковування траєкторії супутника в динаміці необхідно здійснити керування як виходу антени на позицію, так і переміщення кожного із актуаторів. Тобто визначити швидкості і прискорення кутового переміщення дзеркала та узгодити дію всіх шести електроприводів для зміни довжини відповідних актуаторів з дотриманням допустимих похибок.

Проаналізовано вплив елементів конструкції на роботу системи керування антенним комплексом. Класифіковано параметри конструкції, які впливають на точність наведення рефлектора антени. Виділено переваги та недоліки конструкції та систем керування.



У другому розділі розроблено методику керування наведенням антени на основі конструкції поворотного механізму із 6 актуаторів з октаедральною компоновкою із статично невизначеними зв'язками. Розроблено алгоритм розрахунку видовження актуаторів для заданої орієнтації дзеркала антени.

Для орієнтації діаграми направленості антени у заданому напрямку потрібно виставити кожен з актуаторів на певну довжину. Значення довжин актуаторів знаходимо як розв'язок оберненої задачі кінематики в наступній постановці. Нехай площини верхньої (рухомої) та нижньої (фіксованої) платформи ОПП задано в декартовій системі координат з осями  $X, Y, Z$  як показано на рис. 1. Виходячи з їх геометричних розмірів знаходимо координати кріплення шарнірів. За допомогою афінних ізометричних перетворень здійснюємо поворот верхньої площини, представлені просторовими координатами відповідних шарнірів. Поворот здійснюється на кут  $\theta$  навколо вектора  $r$  що бере свій початок з фіксованої точки  $O$  (рис. 1).

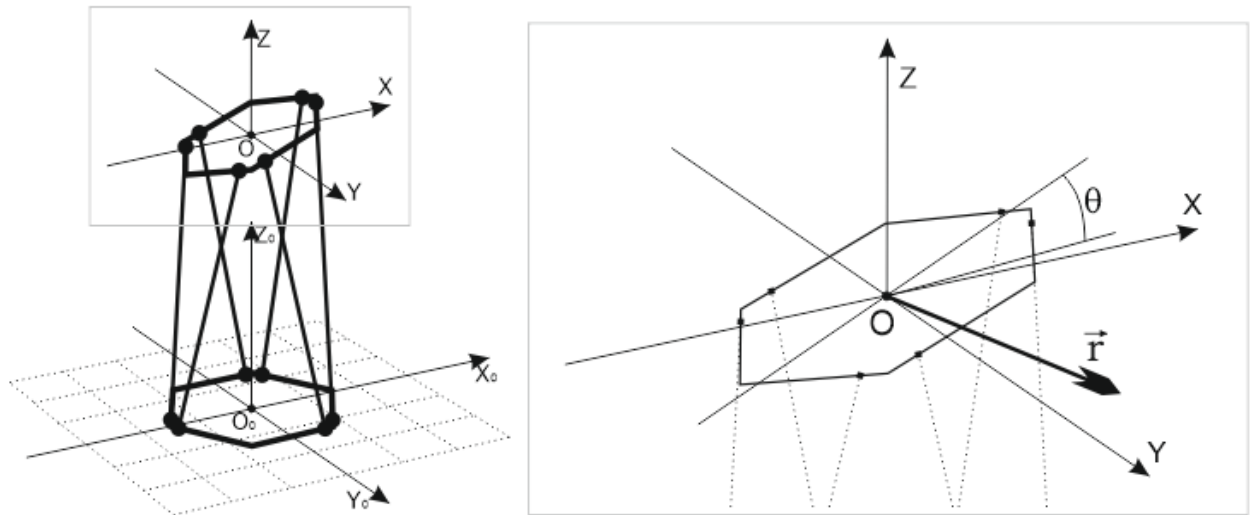


Рисунок 1 – Параметри повороту

Вектор  $r$  (1) навколо якого здійснюється поворот задається двома точками  $p1$  і  $p2$ . Порядок слідування точок задає додатній напрямок повороту.

$$r = p2 - p1 \quad (1)$$

Для спрощення подальших розрахунків проводиться нормалізація вектора осі повороту. Також операція повороту частково спрощується якщо фіксовану точку  $O$  (разом із об'єктом повороту) перенести в початок координат. Таким чином перша операція – це  $T(-P_0)$ , а остання –  $T(P_0)$  (2). Де  $T(-P_0)$  і  $T(P_0)$  відповідні матриці, що здійснюють плоско-паралельний рух твердого тіла в просторі.

$$T(-P_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -\alpha_x \\ 0 & 1 & 0 & -\alpha_y \\ 0 & 0 & 1 & -\alpha_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T(P_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_x \\ 0 & 1 & 0 & \alpha_y \\ 0 & 0 & 1 & \alpha_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Поворот навколо довільної осі можна звести до послідовного повороту навколо окремих координатних осей. Проте основною проблемою при такому підході є знаходження кута, на який потрібно здійснити поворот навколо кожної осі. Тому для спрощення розрахунків перших два повороти виконано таким чином, щоб вісь повороту  $r$  сумістилась з координатною віссю  $Z$ . Після чого здійснюється поворот об'єкта навколо осі  $Z$  на потрібний кут  $\Theta$ . Потім виконується два попередніх повороти в зворотному порядку. В підсумку матриця повороту набуде вигляду (3):

$$M = R_x(-\theta_x)R_y(-\theta_y)R_z(\theta_z)R_y(\theta_y)R_x(\theta_x) \quad (3)$$

Найскладнішою частиною розрахунків є знаходження матриць  $R_y(\theta_y)$  та  $R_x(\theta_x)$ . Для цього потрібно розглянути компоненти довільного одиничного вектора одиничної довжини  $v$  (рис. 2). Сума квадратів його проєкцій на кожен вісь рівна одиниці. Проведений відрізок  $a$  від початку координат в точку  $(a_x, a_y, a_z)$  буде також мати одиничну довжину і мати такий ж напрямок як і вектор  $v$ . Опустивши перпендикуляри з точки  $(a_x, a_y, a_z)$  на кожен координатну вісь (рис. 2а) буде отримано відповідні трикутники. Три направляючих кути  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  – це кути між відрізком (вектором  $v$ ) і координатними осями. Між направляючими косинусами і компонентами вектора  $v$  існує співвідношення (4):

$$\cos\varphi_x = a_x \quad \cos\varphi_y = a_y \quad \cos\varphi_z = a_z \quad (4)$$

Незалежними є тільки два направляючих кути, оскільки (5):

$$\cos^2\varphi_x + \cos^2\varphi_y + \cos^2\varphi_z = 1 \quad (5)$$

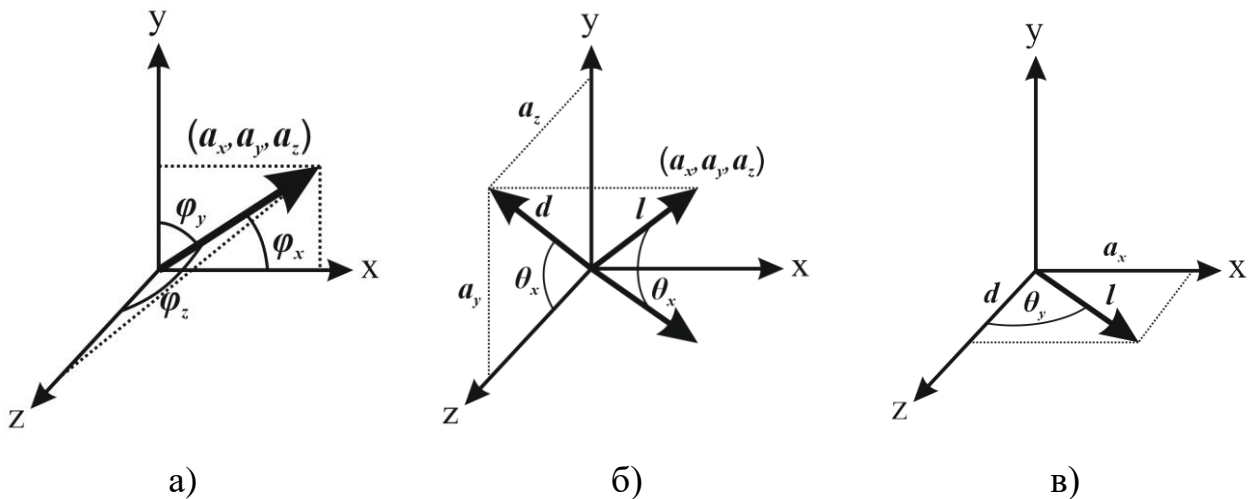


Рисунок 2 – знаходження матриць  $R_y(\theta_y)$  та  $R_x(\theta_x)$ : а) Направляючі кути осі повороту; б) Знаходження кута повороту навколо осі  $X$ ; в) Знаходження кута повороту навколо осі  $Y$

Знаючи значення направляючих косинусів, можна обчислити значення кутів  $\Theta_x$  і  $\Theta_y$ . Із рис. 2б видно що поворот точки  $(a_x, a_y, a_z)$  приведе до такого повороту відрізка, що він опиниться в площині  $y=0$ . Довжина проєкції відрізка (до повороту) на площину  $x=0$  рівна  $d$ .

Для формування матриць повороту достатньо знайти косинуси відповідних кутів. Так матриця повороту  $R_x(\theta_x)$  та обернена матриця повороту  $R_x(-\theta_x)$  буде мати вигляд (6):

$$R_x(\Theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_z/d & -\alpha_y/d & 0 \\ 0 & \alpha_y/d & \alpha_z/d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_x(-\Theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_z/d & \alpha_y/d & 0 \\ 0 & -\alpha_y/d & \alpha_z/d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Елементи матриці  $R_y(\theta_y)$  (7) розраховуються із аналогічних міркувань (рис.2в).

$$R_y(\Theta_y) = \begin{bmatrix} d & 0 & -\alpha(z) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \alpha(z) & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_y(-\Theta_y) = \begin{bmatrix} d & 0 & \alpha(z) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\alpha(z) & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Таким чином вісь повороту (вектор  $v$ ) суміститься із віссю  $Z$ . Поворот на потрібний кут (кут місця ОПП) забезпечує матриця (8).

$$R_z(\Theta_z) = \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & -\sin(\Theta) & 0 & 0 \\ \sin(\Theta) & \cos(\Theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Зворотні дії на завершальному етапі реалізуються за допомогою матриць  $R_y(-\theta_y), R_x(-\theta_x), T(-P_0)$ . В результаті проведених операцій отримуємо верхню площину повернену на заданий кут місця ОПП. По знайдених координатах шарнірів, що знаходяться у верхній та нижній площинах, знаходимо довжини кожного із актуаторів, які забезпечують задане положення. В процесі супроводу траєкторії КА здійснюється динамічний перерахунок компонент матриць повороту і таким чином обчислюється комплексна матриця (3), за допомогою якої визначаємо біжучі значення довжин кожного із актуаторів.

**У третьому розділі** вирішено завдання керування наведенням антени для супроводу космічних об'єктів. Охарактеризовано математичну модель системи та чинники впливу на процес наведення антени.

За допомогою CAD Solidworks, SimscapeMultibody та MatLabSimulink створено модель платформи Г'ю-Стюарта. В середовищі MatLab реалізовано програмне забезпечення для генерування тестової траєкторії, обробки результатів моделювання та їх графічного представлення.

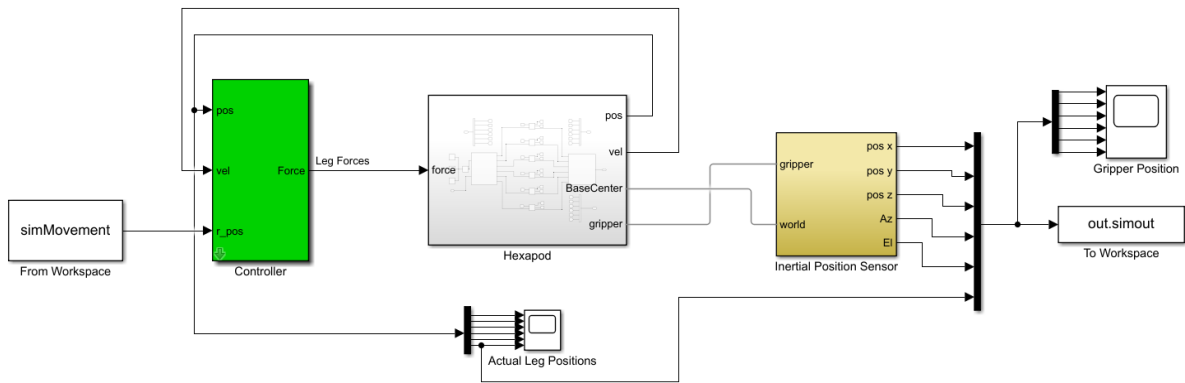


Рисунок 3 – Загальна модель ОПІ

Загальна модель (Рис. 3) містить прототип пристрою, представлений на Рис. 4, PID контролер та віртуальний датчик позиції. Ввід та вивід даних відбувається за допомогою блоків «FromWorkspace» та «ToWorkspace» що взаємодіють із середовищем MatLab, в якому проходить подальше опрацювання отриманої інформації.

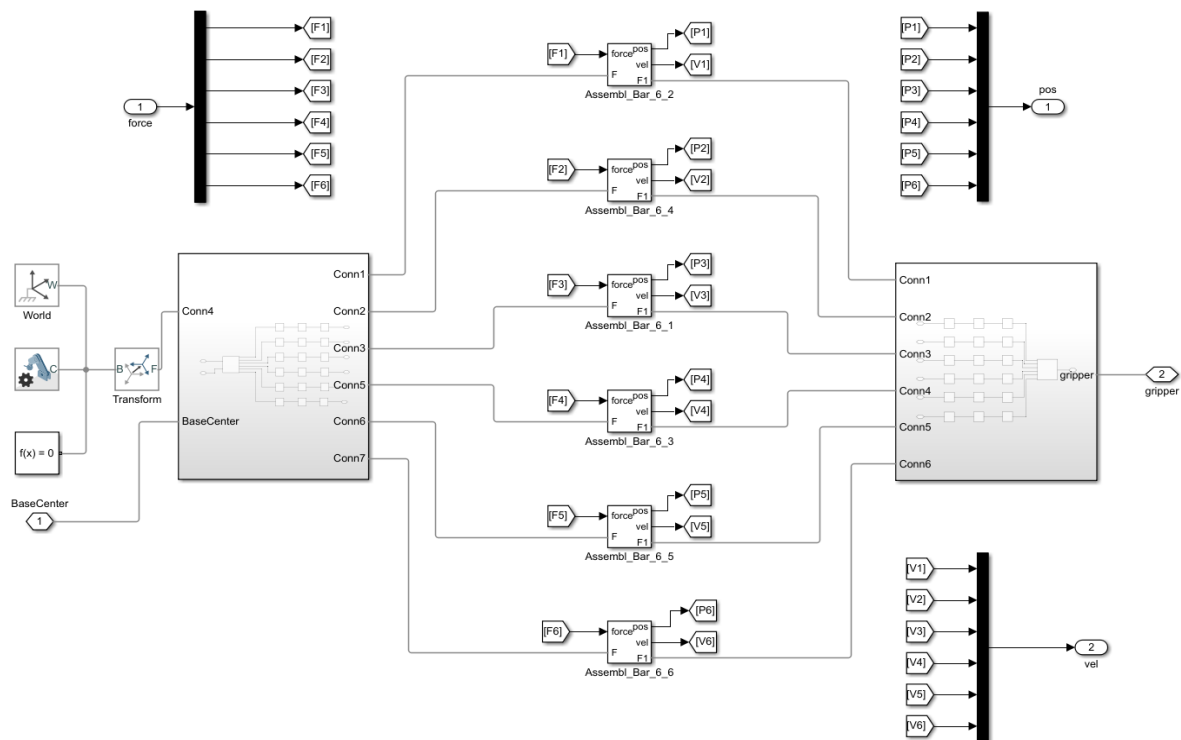


Рисунок 4 – Модель платформи Г'ю-Стюарта

Оцінки точності наведення антенної системи на основі паралельної платформи Стюарта здійснюється шляхом розв'язання прямої задачі кінематики (ПЗК), яка полягає у визначенні положення рухомої платформи у просторі за відомими довжинами кожної із шести штанг (опор). Існуючі алгоритми знаходження розв'язку ПЗК на кінцевому етапі зводяться до розв'язання трьох нелінійних рівнянь з трьома невідомими ітераційними методами за допомогою відповідних програмних модулів –

солверів. В даному випадку для моделювання платформи Стюарта обрано солвер з фіксованим кроком моделювання «ode4 (Runge–Kutta)», що відповідає чисельному методу Рунге–Кутта.

Після того, як ці невідомі були визначені, вони використовуються для знаходження решти параметрів, необхідних для повного опису конструювання пристрою.

Обрана тестова траєкторія відтворює роботу пристрою в умовах, коли одна із опор плавно змінює свою довжину в межах від 80 до 340 мм, а інші п'ять залишаються нерухомими (знаходяться в середньому положенні). Декілька проміжних положень ОПІ впродовж руху по цій траєкторії показано на рис. 5.

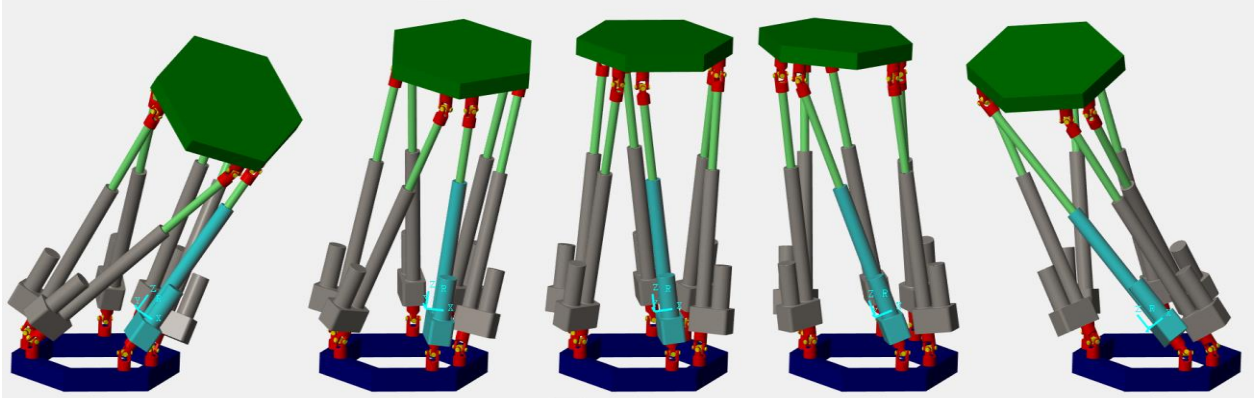


Рисунок 5 – Переміщення платформи Г'ю-Стюарта

Характер зміни азимуту та кута місця при відслідковуванні заданої траєкторії отримуємо за допомогою блоку «Transformsensor» в середовищі MatlabSimulink.

З порівняння вхідних та вихідних даних моделі отримуємо залежність загальної похибки наведення від похибки встановлення актуатора 0,1 мм (Рис.6).

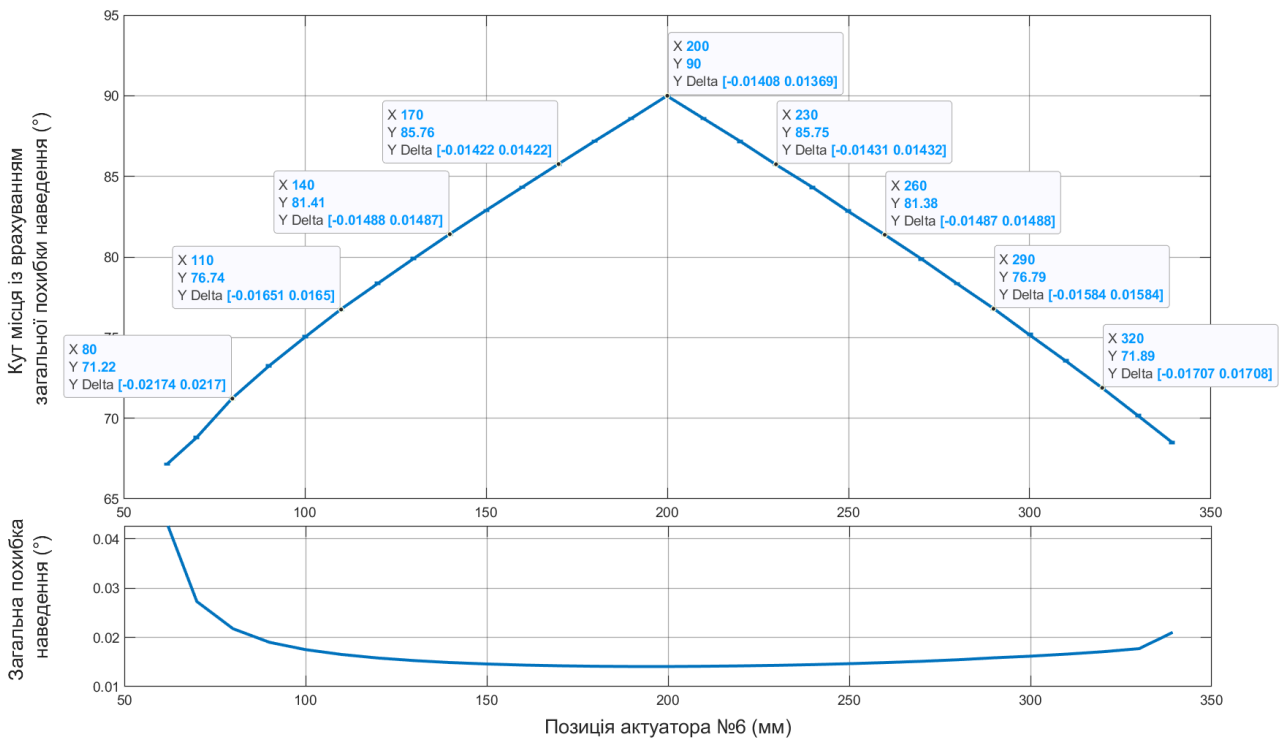


Рисунок 6 – Похибка пристрою, при точності відпрацювання актуатора до 0,1 мм

Як слідує із проведених досліджень для актуатора який забезпечує точність відпрацювання до 0,1 мм загальна похибка пристрою в zenіті – найменша і становить  $0,014^\circ$ . Із збільшенням нахилу платформи похибка росте і при значенні кута місця  $70^\circ$  (нахил платформи  $20^\circ$ ) похибка зростає до значення  $0,024^\circ$ .

Аналогічні дослідження для актуатора, який забезпечує точність відпрацювання до 0,5мм показали, що загальна похибка пристрою в zenіті становить  $0,07^\circ$ , а із збільшенням нахилу платформи похибка також зростає і при значенні кута місця  $70^\circ$  (нахил платформи  $20^\circ$ ) досягає значення  $0,1^\circ$ , що обмежує використання таких актуаторів для антен з великим діаметром рефлектора ( $> 3-5$  м) у задачах супроводу супутників ДЗЗ.

У четвертому розділі роботи наведено результати практичної реалізації та експериментальних досліджень системи керування АС з ОПП Нехарод з метою перевірки та підтвердження адекватності отриманих теоретичних даних. Наведено структурну схему, програмне та алгоритмічне забезпечення комп'ютерної системи керування дослідним взірцем для запропонованого ОПП паралельної структури (рис. 7).

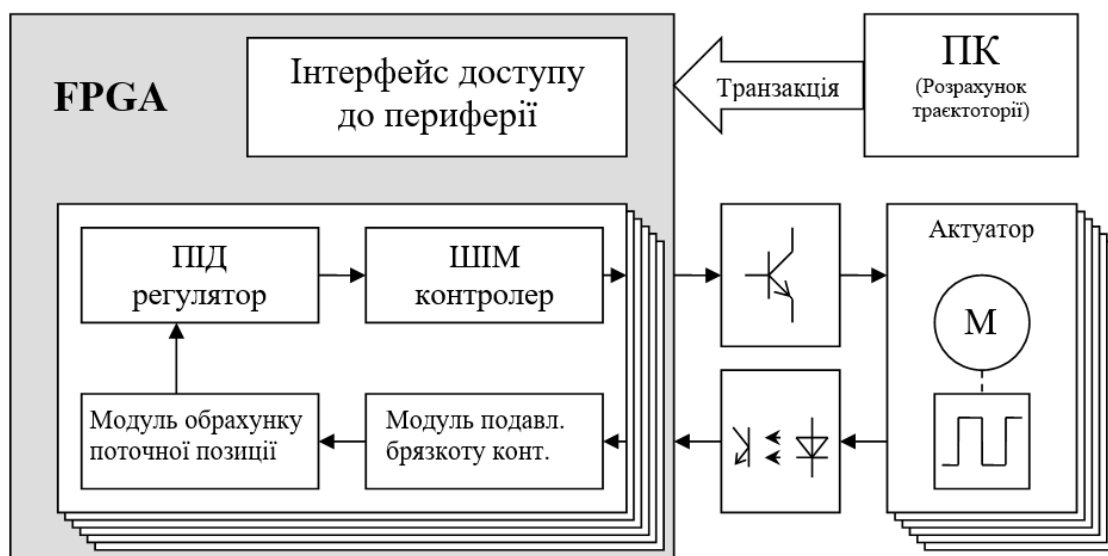


Рисунок 7 – Структурна схема системи керування ОПП АС

В процесі проведення дисертаційного дослідження також розроблено та виготовлено на базі бюджетних комплектуючих діючий дослідний макет опорно-поворотного пристрою паралельної кінематичної структури Нехарод (рис. 8). Виконавчими елементами ОПП є актуатори, що приводяться в рух за допомогою двигунів постійного струму та мають вбудовані давачі положення на основі інкрементального енкодера.

Виходячи із приведених в роботі основних вимог щодо функціональності електронного блоку керування, і з їх врахуванням було розроблено відповідні принципові електричні схеми та виготовлено друковані плати, що входять до складу силового модуля та модуля керування (рис. 9), а також здійснено опис та обґрунтування вибору електронних компонентів пристрою.



Модуль керування являє собою спеціалізований мікрокомп'ютер, до складу якого входить керуючий мікроконтролер C8051F040 фірми Silicon Labs та програмована логічна інтегральна схема сімейства Spartan 3E фірми Xilinx в якій реалізовано шість паралельних каналів, до складу яких входять: блок фільтрації вхідного сигналу; блок обчислення поточної позиції актуатора (на основі 16-ти бітного реверсивного лічильника); ПІД регулятор; контролер ШІМ сигналу для керування силовим модулем.



Рисунок 8 – Макет пристрою паралельної кінематичної структури Нехарод



Рисунок 9 – Розроблені силовий модуль та модуль керування

Обраний варіант реалізації забезпечує паралельне та синхронне функціонування шести незалежних каналів, та за рахунок апаратної реалізації у ПЛІС (FPGA), отримується висока швидкодія кола зворотного зв'язку, що, в свою чергу, позитивно відображається на точності супроводу та спрощує налаштування ПІД регулятора.

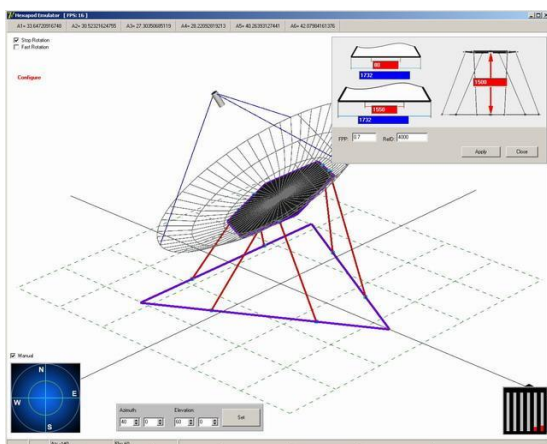


Рисунок 10 – Тривимірна модель антени з ОПП Нехарод

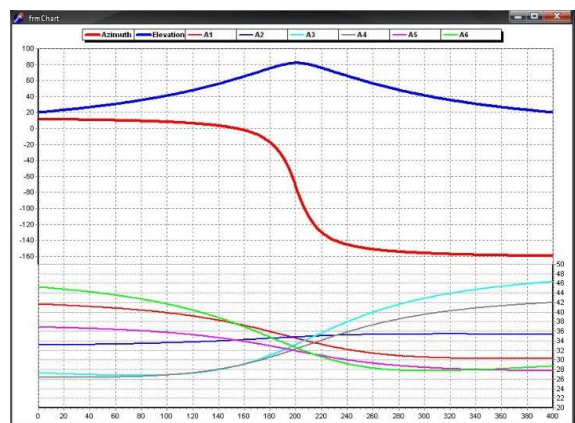


Рисунок 11 – Траєкторії руху кожного із актуаторів

На основі запропонованого методу і алгоритмів розроблено програмне забезпечення з використанням об'єктно-орієнтованого програмування. В основному модулі обчислень реалізовано алгоритм розрахунку, представлений в другому розділі дисертаційної роботи. Програмне забезпечення розраховує положення і швидкості

руху кожного актуатора в залежності від заданого кута наведення на координати азимута та кута місця, а також дозволяє моделювати роботу антенної системи з опорно-поворотним пристроєм на основі паралельної кінематичної структури «Нехарод» з графічним відображенням тривимірної моделі ОПП та рефлектора АС (рис.10).

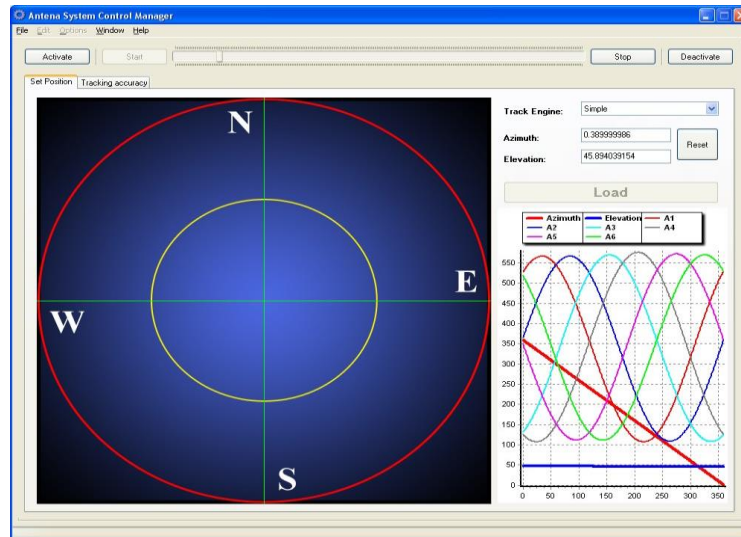
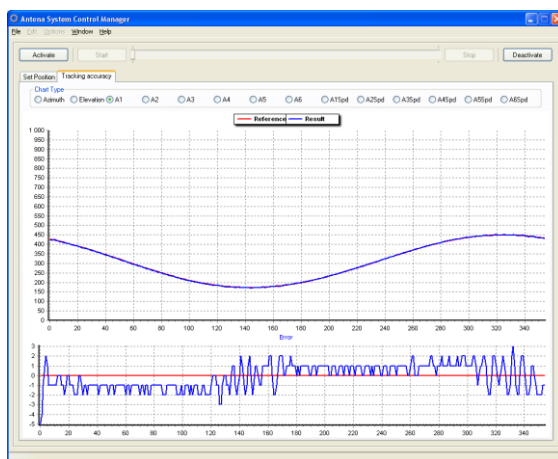


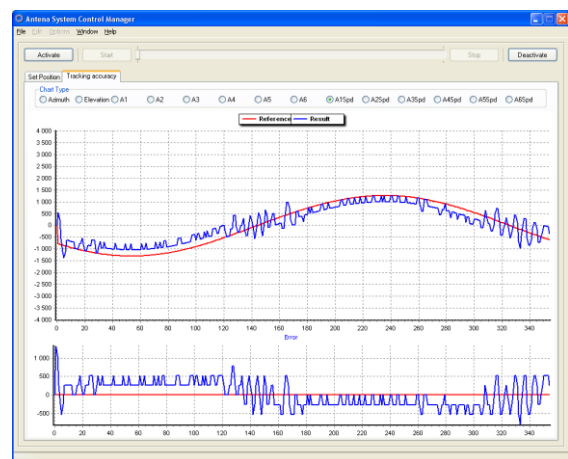
Рисунок 12 – Програмне забезпечення що входить до складу системи керування ОПП АС на основі паралельного кінематичного механізму

Результати моделювання - видовження кожного із шести актуаторів – в залежності від зміни кутів наведення по азимуту і куту місця при супроводі КА показано на (рис.11).

Розроблений обчислювальний програмний модуль також увійшов у програмне забезпечення, розроблене для керування ОПП паралельної структури в системі керування антенним комплексом (рис. 12).



а)



б)

Рисунок 13 – Графіки відпрацювання: а) позиції; б) швидкості

Основним завданням даного ПЗ є побудова дискретизованої траєкторії руху для кожного актуатора, формування керуючих команд і надсилання їх до блоку керування (БК) для виконання. Додатково проводиться зчитування із БК біжучого стану кожного актуатора і здійснюється його порівняння із розрахованим для відповідних



точок траєкторії. За результатами порівняння відтворюється крива похибок супроводу за кутовим положенням (рис. 13а) та швидкістю руху (рис. 13б).

Спроекована комп'ютерна система керування підтвердила в роботі відпрацювання траєкторії КА з необхідною точністю супроводу. Підібрані експериментально коефіцієнти ПІ регулятора блоку керування забезпечили супровід траєкторії із відхиленням, що не перевищує три дискрети роздільної здатності давача положення (рис. 13а), що становить 0,05 град. Для траєкторії низькоорбітального КА з максимальною швидкістю руху променя АС з проходженням через zenit відносно місцезнаходження антени, максимальна швидкість руху лінійних приводів не перевищує 3 мм/с. При цьому регулятор швидкості здатен підтримувати її з точністю не гірше 500 мкм/с (рис. 13б). Для забезпечення мінімальних швидкостей необхідно забезпечити чутливість вимірювання та керування позицією актуатора з роздільною здатністю не гірше 0,1 мм.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень вирішено важливу наукову задачу – розвитку теоретичних засад і синтезу опорно-поворотної платформи та системи управління АС з кінематичним механізмом на основі платформи Г'ю-Стюарта (Нехарод). Проведені дослідження дають змогу покращити точність, надійність та ефективність побудови антенних систем порівняно з АС із класичними кінематичними механізмами.

Основні наукові й практичні результати роботи полягають в наступному:

1. В результаті проведеного аналізу особливостей побудови поворотних платформ АС для задач дистанційного зондування Землі, розроблено конструкцію і метод керування ОПП на основі платформи Г'ю-Стюарта з паралельним кінематичним механізмом з октаедральною компоновкою, що дає змогу проектувати антенні системи з меншими масо-габаритними параметрами ОПП (у 2-5 раз порівняно з класичними АС), та покращеними динамічними характеристиками, без «мертвих зон» супроводу супутників та здешевити антенні системи в цілому;

2. Вперше розроблено імітаційну модель антенної системи на основі опорно-поворотної платформи Г'ю-Стюарта, яка за рахунок врахування особливостей руху лінійних приводів кінематичного механізму Нехарод забезпечує підвищення точності наведення на координати низькоорбітальних космічних об'єктів, та супроводу траєкторій низькоорбітальних супутників;

3. Вперше розроблено метод, який враховує вплив конструктивних особливостей просторового механізму – системи лінійних кінематичних ланок із статично невизначеними зв'язками на точність наведення променя рефлектора великогабаритної антени, що дає змогу підвищити точність наведення та зменшити похибки супроводу траєкторій низькоорбітальних космічних об'єктів у розроблюваних системах керування;

4. Удосконалено метод управління антенною платформою на основі просторового механізму із системи лінійних кінематичних ланок за рахунок розпаралелення процесу керування окремими актуаторами, що зменшило складність алгоритму керування та забезпечило управління в режимі реального часу;

5. Удосконалено метод керування окремими актуаторами, який за рахунок апаратної реалізації, з використанням ПЛІС, зменшує апаратну складність, кількість міжблочних інтерфейсних каналів зв'язку та забезпечує синхронне керування актуаторами в режимі реального часу;

6. Результати дисертаційної роботи використано при розробленні системи керування та дослідного взірця опорно-поворотного пристрою антенної системи на основі паралельного кінематичного механізму наведення – платформи Г'ю-Стюарта.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. М.І. Паламар, Пастернак Ю.В. Керування антенною системою з механізмом наведення паралельної структури типу «Нехарод». *Автоматика, вимірювання та керування.- Вісник ДУ “Львівська політехніка”*. 2011. № 695. С.104-110.

2. Паламар М.І., Пастернак Ю.В. Моделювання антенної системи з опорно-поворотним пристроєм на основі платформи Стюарта. *Вісник Тернопільського національного технічного університету ім. І.Пулюя*. 2012. № 1(65). С.116-126.

3. Palamar M.; Pasternak Yu.; Pasternak V.; Mashtalyar S.; Shevchuk S. Analysis of accuracy control improvement methods of antenna system mechanisms based on stewart platform. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, Ternopil, Ukraine. 2020. Vol 100, no 4, pp. 55–61. (*Index Copernicus*).

4. М.І. Паламар, Ю.В. Пастернак, М.О. Стрембіцький Дослідження ефективності застосування нейронної мережі в системі керування нелінійними динамічними об'єктами. *Автоматика, вимірювання та керування.- Вісник НУ “Львівська політехніка”*. 2013. № 753. С.8-14.

5. М.І. Паламар, Ю.В. Пастернак, А.М. Паламар Дослідження динамічних похибок системи прецизійного керування антеною з асинхронним електроприводом. *Вісник Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя*. 2014. № 4(76). С.165-174.

6. Mykhaylo Palamar, Andrii Chaikovskiy, Yuriy Pasternak, Yaroslav Palamar Improvement Metrological Characteristics of the Antenna System Using Smart Angle Sensor *Proceedings of the 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS): - 24-26 September 2015, Warsaw, Poland. IEEE, P.: 131–135. (Scopus)*.

7. Mykhaylo Palamar, Yuriy Pasternak, Andrii Palamar, Anatolii Poikhalo Precision Tracking of the Trajectory LEO Satellite by Antenna with Induction Motors in the Control System. *Proceedings of the 2017 IEEE 9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS): - 21-23 September 2017, Bucharest, Romania. IEEE, Vol.2, P.: 1051–1055. (Scopus, Web of Science)*.

8. Паламар М.І., Пастернак Ю.В. Керування опорно-поворотним пристроєм антенної системи на основі лінійних приводів. *Матеріали дванадцятій наукової конференції ТДТУ ім. І. Пулюя*, 14-15 травня 2008 р. Тернопіль: ТДТУ, 2008. С. 153.

9. Паламар М.І., Пастернак Ю.В. Алгоритм керування опорно-поворотним пристроєм антенної системи на основі лінійних приводів. *Матеріали Всеукраїнської наукової конференції ТДТУ ім. І.Пулюя*, 13-14 травня 2009 р. Тернопіль: ТДТУ, 2009. С.151.
10. Паламар, М.І., Пастернак Ю.В. Моделювання опорно-поворотного пристрою антени на основі кінематичного механізму Нехарод. *Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2010: стан і перспективи”*, 27-28 квітня 2010 р. Київ. С. 98-99.
11. Паламар М.І., Пастернак Ю.В. Імітаційна модель опорно-поворотного пристрою антенної системи на основі лінійних приводів. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» ТНТУ ім. І.Пулюя*, 19-21 травня 2010 р. Тернопіль: ТНТУ, 2010. С. 298.
12. Паламар М.І., Пастернак Ю.В., Стрембіцький М.О. Керування наведенням антени з опорно-поворотним пристроєм на основі платформи Стюрта. *Матеріали XV наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя*, 14-15 грудня 2011 р. Тернопіль: ТНТУ, 2011. С. 85.
13. М. Palamar, Y. Pasternak Precision control of actuators of the parallel manipulator Нехарод in the system for antenna pointing *Proceedings of the VIII-th International Conference «Perspective Technologies and Methods in MEMS Design»*, MEMSTECH 2012, Lviv-Polyana, Ukraine, 18-21 April, 2012. P.116.
14. Паламар М.І., Пастернак Ю.В. Розробка антенних станцій зв'язку з супутниками дистанційного зондування Землі. *Тези доповідей Міжнародного науково-практичного Форуму "Наука і бізнес - основа розвитку економіки"*, 11-12 жовтня 2012 р. Дніпропетровськ: 2012 р.С. 91-94.
15. М.І. Паламар, А.В. Поїхало, Ю.В. Пастернак Синтез та моделювання роботи поворотного пристрою антенної станції на основі кінематичного механізму Нехарод. *Матеріали 16-ї Української конференції з космічних досліджень*, 22–27 серпня 2016 р. ДКАУ, м. Одеса. С. 214. (<http://space-conf.ikd.kiev.ua/archive>)
16. Паламар М.І., Чайковський А.В., Пастернак Ю.В., Паламар А.М. Системи керування антенними станціями супутникового зв'язку та радіомоніторингу. *Матеріали інформаційно-комунікативного заходу «Наука: безпека країни та розвиток військово-промислового комплексу»*, 12-13 жовтня 2016 р. м. Київ: ТОВ «Міжнародний виставковий центр», С. 139-140.
17. Паламар М. І., Пастернак Ю. В., Пастернак В. С. Огляд методів вимірювання та калібрування поворотних пристроїв на основі паралельних кінематичних ланок. *Збірник тез доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*, 17-18 листопада 2016 р. Тернопіль: ТНТУ, 2016. Том І. С. 298.
18. Пастернак Ю. В., Пастернак В. С. Світові тенденції і перспективи розвитку антен на основі платформи Стюрта. *Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*, 16-17 листопада 2017 року. Тернопіль: ТНТУ, 2017. Том І. С. 150.

19. М. І. Паламар, Ю. В. Пастернак, В. С. Пастернак, С. Шевчук Моделювання роботи платформи Стюарта для задач прецизійного позиціонування. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя*, 14-15 травня 2020 р. Тернопіль: ТНТУ, 2020. С. 102–103.

20. Ульянов О., Резниченко А, Захаренко В., Анюфеев А., Королев А., Патока А., Присяжний В., Поихало А., Войтюк В., Мамарев В., Ожинский В., Власенко В., Чміль В., Лебедь В., Паламар М., Чайковский А., Пастернак Ю., Стрембицкий М., Натаров М., Стешенко С., Гламаздин В., Шубний А., Кириленко А., Кулик Д., Коноваленко А., Литвиненко Л., Яцкив Я., Создание радиотелескопа РТ-32 на базе антенной системы MARK-4В. 1. Проект модернизации и первые результаты. *Радиоастрономия и астрофизика*, ISSN 1027-9636 Національна академія наук України, Т 24, №2, с. 87-116, Харків – 2019.

21. Анюфеев А., Королев А., Патока А., Шульга В., Ульянов О., Резниченко А, Захаренко В., Присяжний В., Поихало А., Войтюк В., Мамарев В., Ожинский В., Власенко В., Чміль В., Лебедь В., Паламар М., Чайковский А., Пастернак Ю., Стрембицкий М., Натаров М., Стешенко С., Гламаздин В., Шубний А., Кириленко А., Кулик Д., Пилипенко А. Создание радиотелескопа РТ-32 на базе антенной системы MARK-4В. 2. Оценка возможности проведения спектральных наблюдений радиоастрономических объектов. *Радиоастрономия і астрофізика*, ISSN 1027-9636 Національна академія наук України, Т 24, №3, с. 163–183 Харків – 2019.

22. О. М. Ульянов, В. В. Захаренко Є. А. Алексеев О. М Резниченко І.О. Кулагін, В.В. Будніков, В.І. Присяжний, А.В. Поіхало, В.В. Войтюк, В.М. Мамарев, В.В. Ожінський, В.П. Власенко, В.М. Чміль, І.К. Сундучков, М.М. Бердар, В.І. Лебідь, М.І. Паламар, А.В. Чайковський, Ю.В. Пастернак, М.А. Стрембицький, М.П. Натаров, С.О. Стешенко, В.В. Гламаздин, О.І. Шубний, А.О. Кириленко, Д.Ю. Кулик. Створення радіотелескопу РТ-32 на базі антенної системи MARK-4В. 3. Гетеродини та власні шуми приймальної системи. ISSN 1027-9636. *Радіофізика і радіоастрономія*. Національна академія наук України, Т. 25, № 3, с. 175–192, Харків 2020.

## АНОТАЦІЯ

**Пастернак Ю.В. Синтез систем керування антенними комплексами на основі паралельного кінематичного механізму наведення із статично невизначеними зв'язками.** – *Рукопис*.

*Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти (технічні науки).* – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню наукового завдання, яке полягає у підвищенні точності супроводу космічних апаратів дистанційного зондування Землі

в системах наведення антен на основі паралельних кінематичних ланок із статично невизначеними зв'язками. Проаналізовано сучасний стан і тенденції розвитку антенних систем та їх систем керування для задач дистанційного зондування Землі. Зроблено висновки про параметри, які впливають на точність наведення системи. Проведений огляд підходів до керування антенними комплексами. Запропоновано алгоритм розрахунку видовження актуаторів. Розроблено імітаційну модель опорно-поворотного пристрою та динамічна модель системи, яка дозволяє визначити вплив геометричних параметрів запропонованого паралельного кінематичного механізму на основні технічні характеристики системи.

Ґрунтуючись на отриманих результатах дослідження, розроблено опорно-поворотний пристрій антенної системи на основі паралельного кінематичного механізму наведення, апаратне та програмне забезпечення для його керування. Експериментально доведено, що запропонована модель адекватно описує роботу запропонованого паралельного кінематичного механізму.

*Ключові слова:* платформа Г'ю-Стюарта, система керування, антенна система, азимутальна вісь, вісь кута місця, афінні перетворення, похибка супроводу, розрахунок траєкторії руху, імітаційне моделювання, ПЛІС, ПІД регулятор.

## АННОТАЦІЯ

**Пастернак Ю.В. Синтез систем управління антенними комплексами на основі паралельного кінематичного механізму наведення с статички неопределенными связями. - Рукопись.**

*Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – Компьютерные системы и компоненты (технические науки). – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2021.*

Диссертация посвящена решению научной задачи, которая заключается в повышении точности сопровождения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в системах наведения антенн на основе параллельных кинематических звеньев с статички неопределенными связями. Проанализировано современное состояние и тенденции развития антенных систем и их систем управления для задач дистанционного зондирования Земли. Сделаны выводы о параметрах, влияющих на точность наведения системы. Проведенный обзор подходов к управлению антенными комплексами. Предложен алгоритм расчета удлинение актуаторов. Разработана имитационная модель опорно-поворотного устройства и динамическая модель системы, которая позволяет определить влияние геометрических параметров предложенного параллельного кинематического механизма на основные технические характеристики системы.

Основываясь на полученных результатах исследования, разработано опорно-поворотное устройство антенной системы на основе параллельного кинематического механизма наведения, аппаратное и программное обеспечение для его управления. Экспериментально доказано, что предложенная модель адекватно описывает работу предложенного параллельного кинематического механизма.

*Ключевые слова:* платформа Г'ю-Стюарта, система управления, антенная система, азимутальная ось, ось угла места, аффинные преобразования, погрешность сопровождения, расчет траектории движения, имитационное моделирование, ПЛИС, ПИД регулятор.

## ANNOTATION

**Pasternak Y.V. Synthesis of antenna control systems based on a parallel kinematic guidance mechanism with statically indeterminate connections** – Manuscript.

*Thesis for a Candidate Degree of Technical Sciences on specialty 05.13.05 – Computer systems and components. – Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2021.*

The dissertation is devoted to the solution of the scientific problem which consists in increase tracking accuracy of spacecraft of remote sensing of the Earth in antennas guidance systems on the basis of parallel kinematic mechanism.

The current state and trends in the development of antenna systems and their control systems for remote sensing of the Earth are analyzed. The use of the Stewart platform as a pivoting guidance mechanism has been proposed. This simplifies the mechanical design of the antenna system compared to conventional rotating devices, the main disadvantage of which is the high requirements for the accuracy of manufacturing large-diameter rotating mechanisms, which leads to bulkiness, large weight, complexity of manufacturing and assembling devices and, in general, increasing cost of antenna systems. The proposed support-rotary device based on a parallel structure is relatively simple and has high technical characteristics, but requires more complex algorithms to control its operation. The review of approaches to control of antenna complexes on the basis of parallel kinematic mechanism is carried out. Conclusions are made about the parameters that affect the accuracy of the system. The advantages and disadvantages of design and control systems are described.

Factors that complicate the control process of the parallel structure mechanism are identified, in particular, the solution of the control problem is significantly complicated when it is necessary to calculate the position in real time. The dynamics of the task is much more complicated, because in order to reach any position it is necessary to build a common trajectory to it and the trajectory for each of the actuators. Calculate the speeds and accelerations at each point of the trajectory and force all six electric drives to work out their trajectory synchronously and in concert with the lowest errors of speed and acceleration, while adhering to the conditions of their coordinated movement.

An algorithm for calculating the elongation of actuators is proposed, and the method of controlling the guidance of the antenna based on a parallel kinematic mechanism is improved. The use of the model of kinematics of spacecraft tracking is offered, which allows to determine the characteristics of control actions of the antenna control system. The proposed three-dimensional mathematical model of the rotary support device is successfully used in the creation of a control system and a prototype of the antenna system. A dynamic model of the system is proposed, which allows to determine the influence of geometrical parameters of the proposed parallel kinematic mechanism on the main technical characteristics of the system.

Based on the obtained results of the research, the support-rotary device of the antenna system on the basis of the parallel kinematic guidance mechanism, hardware and software for its control are developed. It is experimentally proved that the proposed model adequately describes the operation of the proposed parallel kinematic mechanism.

*Keywords: Stewart platform, control system, antenna system, azimuthal axis, angle of place, affine transformations, tracking error, calculation of trajectory, simulation, FPGA, PID controller.*

Підписано до друку 07.04.2021. Формат 60×90, 1/16.  
Друк лазерний. Папір офсетний. Гарнітура TimesNewRoman.  
Умовно–друк. арк. 0,9. Наклад – 100 прим.  
Замовлення № 07042021

\*\*\*\*\*

Друк ФОП Паляниця В. А.  
Свідоцтво ДК №4870 від 20.03.2015 р.  
м. Тернопіль, вул. Б. Хмельницького, 9а, оф.38.  
тел. (0352) 528–777.