

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та управління проектами
Кафедра інформаційних управляючих систем та технологій

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри ІУСТ



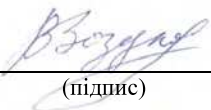
к.т.н. доц. Михелєв І.Л.

«___» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему: Системний аналіз мехатронної системи просторового механізму з паралельною структурою та побудова її моделі на основі імітаційних методів

Виконав: Студент групи 6145мз



(підпис)

Зозуля Валерій Анатолійович

Керівник роботи:

доцент кафедри ІУСТ, к.т.н.,

(посада, науковий ступінь вчене звання)



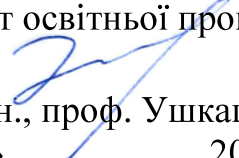
(підпис)

Книрик Наталія Ромуальдівна

м. Миколаїв – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та управління проектами
Кафедра інформаційних управляючих систем та технологій
Спеціальність 124«Системний аналіз»
Освітня програма "Системний аналіз"

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Гарант освітньої програми

д.ф-м.н., проф. Ушкац М.В.
«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ **НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ** **на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»**

Студенту Зозулі Валерію Анатолійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Системний аналіз мехатронної системи просторового механізму з паралельною структурою та побудова її моделі на основі імітаційних методів

Керівник роботи к.т.н., доцент Книрік Наталія Ромуальдівна

Затверджені наказом ректора № 1355-уч. від "14" листопада 2025 року

2. Термін подання роботи: 15 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) характеристики просторового механізму з паралельною структурою, літературні джерела, матеріали наукового стажування

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів) вступ, дослідження існуючих рішень та постановка задачі, побудова концепції моделі та проектування, розробка моделі та моделювання, розрахунок економічної ефективності, охорона праці, охорона навколишнього середовища

5. Перелік презентаційних матеріалів _____

6. Консультанти розділів роботи

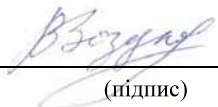
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Книрік Н. Р., доцент кафедри ІУСТ	05.09.2024	22.12.2024
2	Книрік Н. Р., доцент кафедри ІУСТ	23.12.2024	15.06.2025
3	Книрік Н. Р., доцент кафедри ІУСТ	15.06.2025	25.09.2025
4	Книрік Н. Р., доцент кафедри ІУСТ	25.09.2025	14.11.2025
5	Книрік Н. Р., доцент кафедри ІУСТ	25.09.2025	14.11.2025
6	Книрік Н. Р., доцент кафедри ІУСТ	25.09.2025	14.11.2025

7. Дата видачі завдання 05 вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження та аналіз предметної галузі	22.12.2024	
2	Розробка концепції	15.03.2025	
3	Розділ з розробки проєктних рішень по системі (та її частинах)	15.06.2025	
4	Реалізація проєкту та розробка робочої документації	25.09.2025	
5	Обчислення економічної ефективності	14.11.2025	
6	Вирішення питань охорони праці та навколишнього середовища	14.11.2025	
7	Оформлення пояснювальної записки	14.11.2025	
8	Подання магістерської роботи на перевірку на плагіат	16.11.2025	
9	Подання магістерської роботи рецензенту	20.11.2025	
10	Подання магістерської роботи на державний захист	15.12.2025	

Студент


(підпис)

Зозуля В. А.
(ПІБ)

Керівник роботи


(підпис)

Книрік Н. Р.
(ПІБ)

ЗМІСТ

Вступ.....	
1. ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	
1.1. Особливості конструкції механізму паралельної структури.....	
1.2. Область використання механізму паралельної структури.....	
1.3. Аналіз існуючих методів побудови імітаційних моделей динамічних об'єктів	
1.4. Постановка задачі дослідження.....	
Висновок до розділу 1.....	
2. ПОБУДОВА КОНЦЕПЦІЇ МОДЕЛІ ТА ПРОЕКТУВАННЯ.....	
2.1. Аналіз руху в SOLIDWORKS Motion.....	
2.2 Matlab SimMechanics як засіб моделювання динаміки складних мехатронних систем.....	
2.3 Концепція моделі мехатронної системи та основні етапи її розробки	
Висновок до розділу 2.....	
3. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЗМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ.....	
3.1. Основні параметри механізму паралельної структури.....	
3.2 Створення моделі механізму паралельної структури (платформи Стюарта) в SOLIDWORKS.....	
3.3 Трансляція CAD 3D-моделі SolidWorks до CAE-системи Matlab/SimMechanics.....	
3.4 Визначення робочого простору механізму з паралельної структурою	
3.5 Моделювання механізму з паралельної структурою.....	
3.5.1 Позиціонування з лінійним збуренням по осі Z.....	
3.5.2 Позиціонування за наявності лінійного збурення вздовж осі Y	
3.5.3 Позиціонування за наявності кутового збурення навколо осі Z	
3.5.4 Позиціонування за наявності кутового збурення навколо осі Y	
Висновок до розділу 3.....	

4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ.....	
4.1 Вступ.....	
4.2 Розрахунок витрат на створення та експлуатацію імітаційної моделі	
4.3 Економічна ефективність впровадження імітаційної моделі.....	
Висновок до розділу 4.....	
5. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	
5.1 Загальні положення.....	
5.2 Аналіз шкідливих і небезпечних факторів в лабораторії.....	
5.3 Розрахунок системи захисного заземлення.....	
5.4 Техніка безпеки на робочому місці.....	
Висновки до розділу 5.....	
6. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	
6.1 Вступ.....	
6.2 Джерела забруднення та екологічний моніторинг.....	
6.3 Заходи для зменшення впливу виробництва на довкілля.....	
Висновки до розділу 6.....	
ВИСНОВОК.....	
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	
ДОДАТОК А. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	
ДОДАТОК Б. ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ...	

АНОТОЦІЯ

Магістерська робота присвячена системному аналізу мехатронної системи просторового механізму з паралельною структурою та розробці її імітаційної моделі на основі використання CAD- та CAE-технологій. У роботі проведено аналіз конструкції механізму платформи Стюарта, сфер її застосування та сучасних методів моделювання динамічних об'єктів із паралельною кінематикою. Сформовано концепцію побудови імітаційної моделі, що поєднує твердотільне моделювання в SolidWorks та подальший імпорт моделі до MATLAB/Simulink/SimMechanics для виконання кінематичного і динамічного аналізу.

Створено детальну 3D CAD-модель платформи Стюарта, включно з конструкцією актуаторів, карданних вузлів, основи та рухомої платформи. Виконано налаштування кінематичних зв'язків у SolidWorks Motion та здійснено трансляцію моделі у середовище SimMechanics із виправленням обмежень транслятора. Розроблено динамічну модель механізму, на основі якої проведено дослідження руху системи, аналіз реакції на лінійні та кутові збурення та побудовано робочий простір механізму для різних кутів орієнтації верхньої платформи.

Робота викладена на 111 сторінках, містить 38 рисунків, 5 таблиць, додатки та список використаних джерел. Матеріали роботи можуть бути використані для подальших досліджень, оптимізації конструкції та розробки систем керування механізмами з паралельною кінематикою.

Ключові слова: системний аналіз; платформа Стюарта; мехатронна система; імітаційне моделювання; SolidWorks; MATLAB SimMechanics; динамічний аналіз; робочий простір.

ABSTRACT

The master's thesis is devoted to the system analysis of a mechatronic system of a spatial parallel-structure mechanism and the development of its simulation model using CAD and CAE technologies. The study presents an analysis of the Stewart platform design, its application areas, and modern approaches to modeling dynamic objects with parallel kinematics. A conceptual framework for building a simulation model is developed, combining solid modeling in SolidWorks with subsequent translation into MATLAB/Simulink/SimMechanics for performing kinematic and dynamic analysis.

A detailed 3D CAD model of the Stewart platform is created, including actuator assemblies, universal joints, the base, and the moving platform. Kinematic constraints are configured in SolidWorks Motion, and the model is translated into the SimMechanics environment with correction of translator limitations. A dynamic model is developed and used to investigate system motion, evaluate the influence of linear and angular disturbances, and determine the workspace of the mechanism for different platform orientations.

The thesis consists of 111 pages, includes 38 figures and 5 tables, as well as appendices and a list of references. The results can be applied to further research, design optimization, and the development of control systems for parallel-structure mechanisms.

Keywords: system analysis; Stewart platform; mechatronic system; simulation modeling; SolidWorks; MATLAB SimMechanics; dynamic analysis; workspace.

Вступ

Одним з пріоритетних науково-технічних напрямів є створення мехатронних систем заснованих на синергетичному об'єднанні вузлів точної механіки з електротехнічними компонентами і сучасними системами керування, які забезпечують проектування якісно нових просторових механізмів з паралельною структурою (МПС) [1-3].

Під МПС або паралельними маніпуляторами розуміють [1-3] багатоступеневий механізм, що складається з декількох, однотипних кінематичних ланцюгів, замкнутих на загальну нерухому основу з одного боку і на робочу поверхню з іншого. Кінематичні ланцюги складаються з кінематичних пар, утворених ланками і рухливими вузлами, що з'єднують їх. У зв'язку з тим, що число, вид і порядок кінематичних пар в ланцюгах може бути різним, різноманіття МПС дуже велике. За оцінками наведених в звіті [4] на даному етапі розвитку техніки існує понад 100 видів механізмів.

Особливий інтерес представляє конструкції МПС, які в перші з'явилися в 50-х - 60-х роках ХХ століття в роботах Стюарта і Гауфа [5, 6]. Надалі «платформою Стюарта» стали називати конструкцію, яка має шість однотипних кінематичних ланцюгів (штанг), при цьому програмно регулюючи їх довжину, можна керувати положенням вихідної ланки: переміщати її у вертикальному і горизонтальному напрямках, повертати в трьох площинах. Така платформа, має шість ступенів вільності: три поступальні і три обертальні.

Системи стабілізації положення на базі платформи Стюарта використовуються для забезпечення вертикального зльоту та посадки літального апарату з палуби судна у відкритому морі [7]. Також відомі розробки де платформа Стюарта використовуються для забезпечення стабілізації положення при переміщенні вантажу з корабля на корабель або з корабля на стаціонарну платформу [8] або використовуються, наприклад ROBOCRANE [9], в вантажопідіймальних кранах при проведенні будівельних, обслуговуванні портових терміналів і накопичувальних майданчиків, рятувальних роботах, для маневреності персоналу/обладнання в повітрі, прокладання/видалення підводних труб.

Об'єктом дослідження є мехатронна система просторового механізму з паралельною структурою, побудована на основі платформи Стюарта, як складна багатовимірна динамічна система.

Предметом дослідження є методи та алгоритми побудови імітаційної моделі просторового механізму паралельної структури на основі CAD-даних.

Метою дослідження є розробка імітаційної моделі механізму паралельної структури на основі платформи Стюарта та дослідження її кінематичних і динамічних характеристик у різних режимах руху.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні **завдання**:

- виконати аналіз конструктивних особливостей механізму платформи Стюарта та сфер його застосування;
- побудувати структурну схему взаємодії елементів платформи Стюарта;
- проаналізувати існуючі підходи до побудови імітаційних моделей механізмів з паралельною кінематикою та засоби CAD/CAE-моделювання;
- розробити 3D CAD-модель платформи Стюарта в SolidWorks, включаючи геометрію основи, рухомої платформи, актуаторів;
- здійснити трансляцію CAD-моделі до MATLAB/SimMechanics, усунувши обмеження та розбіжності транслятора;
- визначити робочий простір механізму для різних кутів нахилу рухомої платформи та побудувати його графічні проєкції;
- провести динамічний аналіз платформи Стюарта, включаючи дослідження впливу лінійних та кутових збурень на рух рухомої платформи.

Для досягнення мети та виконання завдань дослідження були використані такі **методи**: системний підхід, як напрям методології досліджень, який полягає в дослідженні об'єкта як цілісної множини елементів в сукупності відношень і зв'язків між ними, тобто розгляд об'єкта як модель системи; метод імітаційного моделювання на основі CAD/CAE-моделі рухомого об'єкта з довільною динамікою.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що запропоновано підхід побудови імітаційної моделі платформи Стюарт з

урахуванням геометричних та масово-інерційних параметрів компонентів в CAD-системи та в середовище SimMechanics.

Теоретична та практична значущість полягає в отриманні уніфікованої системно-аналітичної методики побудови й оцінювання імітаційних моделей паралельних механізмів, що може застосовуватися до інших типів робототехнічних платформ.

1. ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1. Особливості конструкції механізму паралельної структури

В роботах [1-3] вважається, що МПС, побудований на базі платформи Стюарта, складається з абсолютно жорстких нерухомою основи 1, робочої поверхні (рухомої платформи) 2 і шести штанг, довжини l_i яких можуть змінюватися за допомогою приводів, позначених прямокутниками на схемі (рис. 1.1), і утворюють вектор узагальнених координат q виду

$$q = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \\ l_5 \\ l_6 \end{bmatrix}. \quad (1.1)$$

Штанги з'єднують нерухому основу 1 і робочу поверхню 2 за допомогою сферичних шарнірів $A_{0.1}...A_{0.6}$; $A_{1.1}...A_{1.6}$. Зміна довжин штанг l_i викликає зміну положення робочої поверхні відносно основи. Оскільки набір довжин штанг однозначно визначає положення поверхні відносно основи [2], то вектор q називають вектором узагальнених координат цієї поверхні [1] і використовують для керування платформою Стюарта.

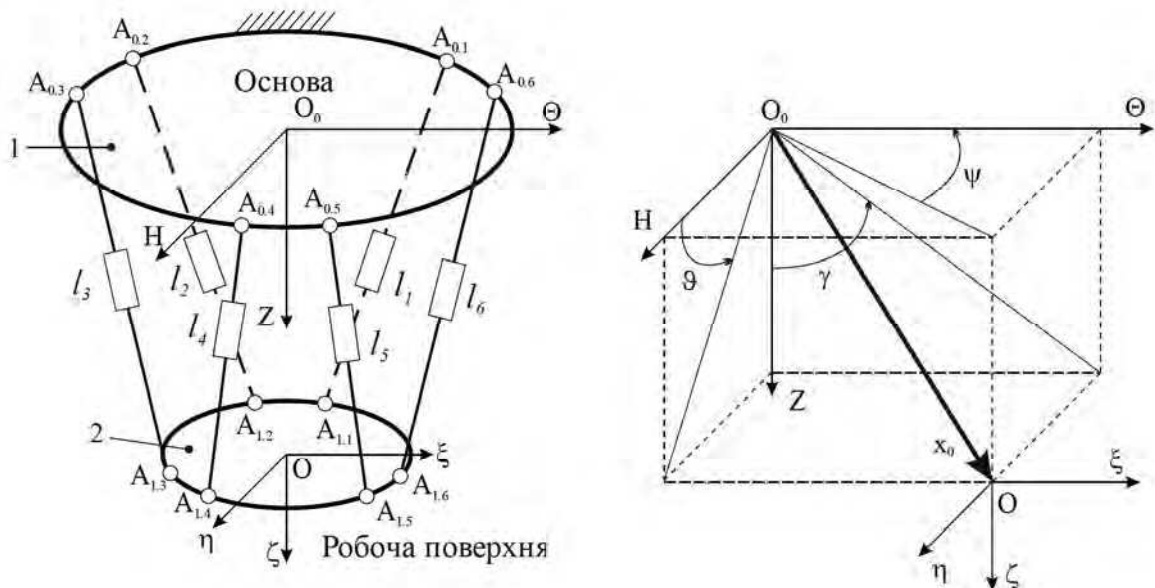


Рисунок 1.1 Схема платформи Стюарта

З іншого боку, використовуючи поняття теорії розв'язання задач навігації і орієнтації, викладені наприклад в монографії [10], для визначення положення робочої поверхні можна використовувати дві прямокутні системи координат: нерухому $O_0\Theta HZ$, пов'язану з основою, і рухому $O\xi\eta\zeta$, пов'язану з цією поверхнею.

Система координат $O_0\Theta HZ$, осі якої нерухомі відносно Землі, орієнтована таким чином: вісь $O_0\Theta$ (наз. віссю абсцис) горизонтальна і спрямована на північ (по лінії можливого руху основи), вісь O_0Z (наз. віссю аплікату) спрямована вертикально вниз, вісь O_0H (наз. віссю ординат) горизонтальна і спрямована на схід. Початок системи координат $O_0\Theta HZ$ точка O_0 збігається з центром ваги основи.

Початок рухомий системи координат $O\xi\eta\zeta$ пов'язано з центом обертання робочої поверхні платформи Стюарта, точкою O , а її вісі в початковий момент часу паралельні осям системи $O_0\Theta HZ$.

Положення точки O відносно системи $O_0\Theta HZ$ характеризується радіусом-вектором x виду

$$x_0 = \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

де ξ – проекція точки O на вісь абсцис $O_0\Theta$, η – проекція точки O на вісь ординат O_0H ; ζ – проекція точки O на вісь аплікату O_0Z .

Орієнтація робочої поверхні відносно основи, яка визначається взаємним положенням базисів $O_0\Theta HZ$ і $O\xi\eta\zeta$, характеризується трьома кутами [10]: рискання ψ , тангажу ϑ і крену γ . Кут рискання ψ , відраховується в площині горизонту і розташований між віссю $O_0\Theta$ і проекцією вектору x_0 на площину $O_0\Theta H$; кут тангажу ϑ розташований між віссю O_0H і проекцією вектору x_0 на площину O_0HZ ; кут крену γ розташований між віссю O_0Z і проекцією вектору x_0 на площину $O_0\Theta Z$ (рис. 1.1).

В такому випадку, положення робочої поверхні відносно основи характеризує так званий [3] вектор руху робочої поверхні x_0 в робочому

просторі, виду:

$$x_0 = \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \varsigma \\ \psi \\ \vartheta \\ \gamma \end{bmatrix}. \quad (1.3)$$

Очевидно, що між векторами (1.1) і (1.3) існує зв'язок, однак внаслідок специфічної побудови обладнання з механізмами паралельної структури [1, 2] цей зв'язок нелінійний. У зв'язку з цим виникають завдання визначення координат робочої поверхні по відомим значенням довжин штанг (пряма задача кінематики) і визначення довжин штанг по відомих координатах робочої поверхні (зворотна задача кінематики). Одним з методів вирішення прямої і зворотної задач кінематики є [1, 2] використання матриць Якобі часткових передаточних відносин. Тоді рішення прямої і зворотної задач кінематики записується у вигляді:

$$x_0 = J \cdot q, \quad (1.4)$$

$$q = J^{-1} x_0, \quad (1.5)$$

де J, J^{-1} – пряма і зворотна матриці Якобі [1, 2].

Для паралельних механізмів, таких як платформа Стюарта, аналітичний вираз легко отримати тільки для зворотного якобіана J^{-1} , але його дуже складно отримати для J (точніше, його аналітичний вираз для більшості паралельних механізмів з 6 ступенями свободи настільки складно, що не може використовуватися на практиці.)

Виходячи з вище викладеного, можна скласти структурну схему платформи Стюарта (рис. 1.1), як багатовимірного об'єкта (рис. 1.2), призначеного для перетворення вектору вхідних сигналів u в вектор руху робочої поверхні (РП) (1.3). Для досягнення цієї мети на вхід системи виконавчих механізмів (СВМ) (рис. 1.2) надходить вектор сигналів керування u

$$u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ u_5 \ u_6]^T, \quad (1.6)$$

де u_1-u_6 – сигнали керування на входах виконавчих двигунів кожної штанги платформи Стюарта (рис. 1.2); / - символ транспонування вектору. Під дією вектору (1.6) виконавчі двигуни СВМ починають обертатися. Обертання двигунів перешкоджають різні збурювання, які утворюють вектор ψ_∂

$$\psi_\partial = [\psi_{\partial 1} \ \psi_{\partial 2} \ \psi_{\partial 3} \ \psi_{\partial 4} \ \psi_{\partial 5} \ \psi_{\partial 6}]^T, \quad (1.7)$$

де $\psi_{\partial 1}-\psi_{\partial 6}$ – збурювання, що діють на виходах виконавчих двигунів кожної штанги платформи Стюарта (рис. 1.2). Внаслідок дії вектору (1.7) вектор кутів повороту двигунів СВМ q_0 відрізняється від бажаного g_0 . Вектор q_0 вимірюється системою датчиків обертання (СДО), встановлених на валах двигунів. Вектор сигналів на виході системи датчиків обертання q_3 , як видно з структурної схеми (рис. 1.2), дорівнює

$$q_3 = g_3 + \varphi_3, \quad (1.8)$$

де g_3 – вектор дійсних значень виміряних кутів повороту двигунів; φ_3 - вектор шумів вимірювання СДО, які можуть бути оцінені або атестовані.

Під дією вектору q_0 система кулько-гвинтових передач (СКГП) змінює довжину штанг платформи Стюарта і формує вектор дійсних довжин q_1 такий, що

$$q_1 = g_1 + \psi_{КГП}, \quad (1.9)$$

в якому g_1 - вектор бажаних довжин штанг; $\psi_{КГП}$ - вектор збурень кулько-гвинтової пари.

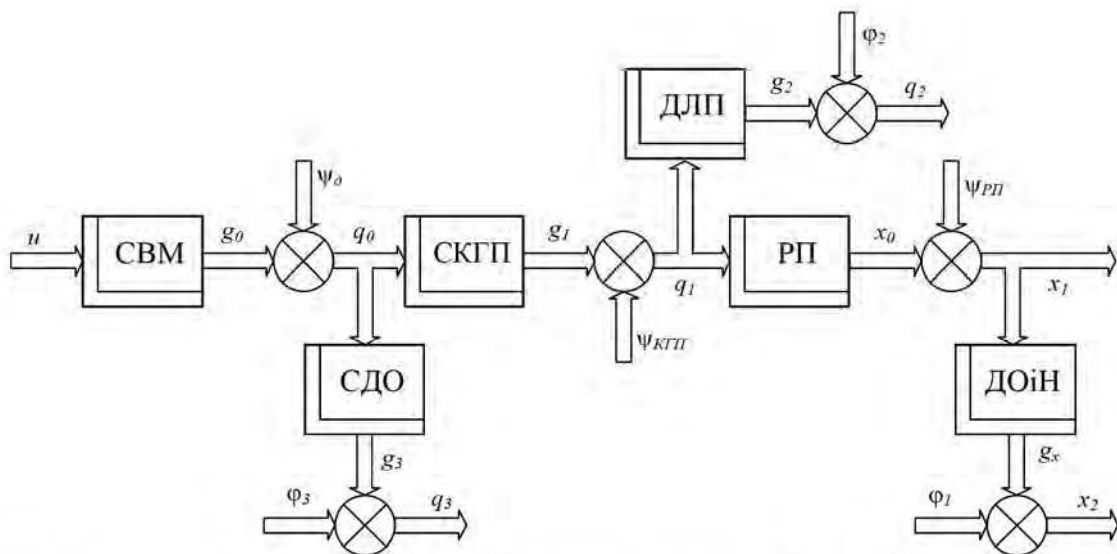


Рисунок 1.2 Структурна схема платформи Стюарта, як об'єкта дослідження

Вектор (1.9) може бути визначений датчиками лінійних переміщень (ДЛП), які також мають похибки φ_2 . В результаті вимірювань буде сформований вектор вимірних значень довжин штанг платформи Стюарта q_2 виду:

$$q_2 = g_2 + \varphi_2, \quad (1.10)$$

де g_2 – вектор дійсних значень вимірних довжин штанг; φ_2 – вектор шумів вимірювання ДЛП, які можуть бути оцінені або атестовані.

Зміна довжин штанг, що утворюють вектор (1.10), призводить до зміни компонентів вектору дійсних значень руху робочої поверхні x_1 :

$$x_1 = x_0 + \psi_{PP}, \quad (1.11)$$

де x_0 – бажаний вектор руху робочої поверхні; ψ_{PP} – вектор збурень, що діють на робочу поверхню.

Як випливає з розгляду рівнянь (1.4) і (1.6) зв'язок між векторами (1.9), (1.11) є нелінійний.

Компоненти вектору x_1 можуть бути виміряні за допомогою датчиків орієнтації і навігації (ДОіН), наприклад БІНС (безплатформна інерціальна навігаційна система). Як було показано вище такі датчики мають похибки, вектор яких позначений на схемі (рис. 1.2) φ_1 . У зв'язку з цим на виході об'єкта керування формується вектор вимірних значень компонентів руху робочої поверхні платформи Стюарта x_2 у вигляді

$$x_2 = g_x + \varphi_1, \quad (1.12)$$

де g_x – вектор дійсних значень вимірюваних компонентів вектору руху робочої поверхні x_1 .

1.2. Область використання механізму паралельної структури

Мета аналізу використання МПС на основі платформи Стюарта полягає в тому, щоб за літературними джерела дослідити вплив завдань, що вирішуються за допомогою механізму. Для досягнення цієї мети можна використовувати різні (критерії) концепції систематизації. Можна взяти за основу такого огляду сферу використання: верстатобудування, космонавтика, приладобудування, розважальна індустрія, медицина, і т.д. Але такий принцип не дозволить

виявити особливості вектору платформи Стюарта так, як в будь-який з цих сфер платформа може виконувати завдання слідкування, стабілізації положення, руху по заданій траскторії і т.д. У зв'язку з цим найбільш прийнятною концепцією буде аналіз використання платформи Стюарта для вирішення різних видів технологічних задач [11]. Враховуючі галузевий аспект використання об'єкта дослідження, а саме в суднобудуванні, розглянемо тільки вирішення технологічних задач стабілізації положення поверхні (механізми орієнтації і позиціонування).

Різні модифікації механізму Стюарта застосовуються для позиціонування активних поверхонь дзеркал телескопів. Слід згадати, застосування в якості пристрою для наведення антен, вперше запропонованого групою дослідників з університету Кентербері [12].

Практично у всіх побудованих останнім часом наземних телескопах (Telescopio Nazionale Galileo, University of Arizona MMT, обидва з яких розроблені ADS International, UKIRT, ESO VISTA або GRANTECAN на Канарських островах) в якості вторинної системи вирівнювання дзеркал використовуються платформи Стюарта [13].

Прикладом застосування механізму паралельної структури, виконаного у вигляді платформи Стюарта, для забезпечення активного просторового віброзахисту прецизійних корисних навантажень, що встановлюються на космічних апаратах, можуть бути розробки, які проведені фірмою MATRA MARCONI SPASE (Франція) за контрактом з ESA [14]. Діюча модель (прототип) багатоцільової активної ізолюючої системи MAIS (Multi-purpose Active Isolation System) з шістьма ступенями свободи, виконаної у вигляді платформи Стюарта з шістьма активними стрижнями [14].

Системи стабілізації положення на базі платформи Стюарта використовуються для забезпечення вертикального зльоту та посадки літального апарату з палуби судна у відкритому морі [7]. Також відомі розробки де платформа Стюарта використовуються для забезпечення стабілізації положення при переміщенні вантажу з корабля на корабель або з корабля на стаціонарну платформу [8] або використовуються, наприклад

ROBOCRANE [9], в вантажопідіймальних кранах при проведенні будівельних, обслуговуванні портових терміналів і накопичувальних майданчиків, рятувальних роботах, для маневреності персоналу/обладнання в повітрі, прокладання/видалення підводних труб.

Як ми бачимо для цього класу механізмів характерні два види робіт, це прецизійне позиціонування і стабілізація в певному положенні. На підставі цього можна визначити фізичний зміст вектору вхідних сигналів в залежності від виду технологічних задач, які можливо вирішити за допомогою платформи Стюарта, це зміна кутів положення рухомої основи механізму відносно нерухомої системи координат.

1.3. Аналіз існуючих методів побудови імітаційних моделей динамічних об'єктів

Труднощі традиційного підходу до розробки математичних моделей полягають в тому, що на етапі складання вимог і специфікацій використовувані текстові документи недосконалі при ітеративному підході, фізичні прототипи на етапі проектування також недосконалі, складні і дорогі; на етапі реалізації при ручній розробці застосування інших програмних засобів і людські помилки роблять процес ненадійним, а на етапі перевірки традиційне тестування призводить до виявлення помилок лише в кінцевій стадії розробки ПЗ [15, 16] (рис. 1.3).

Ці труднощі багато в чому долаються при використанні технології модельно-орієнтованого проектування (далі МОП).

Модельно-орієнтоване проектування (МОП) - це математичний і візуальний метод вирішення завдань, пов'язаних з проектуванням систем керування, заснований на використанні наочної імітаційної моделі майбутнього виробу, яка є основним носієм інформації про його концепції, особливості конструкції і реалізації. Така модель використовується протягом усіх стадій процесу проектування: дослідження, конструювання, реалізація, приймально-здавальні випробування. На кожному етапі модель оновлюється і еволюціонує. При цьому гарантується повне відслідковування складу її параметрів та іншої конструкторської інформації на всіх етапах проектування [17, 18]. Робоча

модель з точки зору програмно-реалізованої інструментальної середовища є набором типів даних, в яку вносяться конструкторські зміни у міру її уточнення і деталізації.

МОП часто використовується при керуванні рухом в промисловому обладнанні, аерокосмічної та автомобільної промисловості. МОП є методологією, яка застосовується при розробці програмно-апаратних засобів.

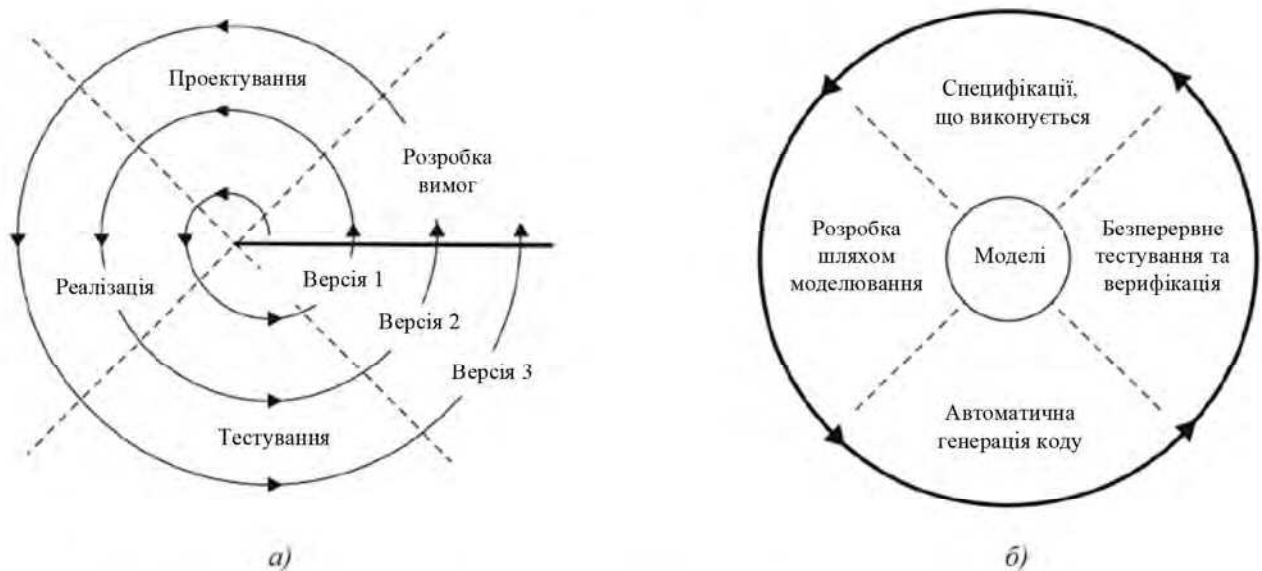


Рисунок 1.3 Різні методології проєктування: а) спіральна; б) модельно-орієнтована

Принципи МОП істотно відрізняються від традиційної методології проєктування. Замість створення складних програмних кодів розробники можуть застосовувати МОП для поліпшення характеристик моделі, використовуючи стандартні функціональні блоки з безперервним і дискретним часом. Побудовані таким чином моделі разом з використанням інструментів для моделювання можуть швидко привести до створення прототипу системи керування, тестування та верифікації програмного забезпечення. У деяких випадках апаратно-програмне моделювання може бути використано як інструмент проєктування для більш швидкого і ефективного тестування динамічних впливів на систему, на відміну від традиційного методу проєктування (рис. 1.3).

Деякі з найбільш помітних переваг МОП в порівнянні з традиційним підходом:

- МОП надає загальну середу розробки, що сприяє взаємодії групи розробників в процесі аналізу даних і перевірки системи;
- Інженери можуть знайти і виправити помилки на ранніх стадіях проектування системи, коли час і фінансові наслідки зміни системи зводяться до мінімуму;
- МОП сприяє повторному використанню моделі для поліпшення системи і створення похідних систем з розширеними можливостями.

Методологія МОП тісно пов'язана з концепцією автоматизованої розробки програмного забезпечення/систем (Computer Aided Software / System Engineering, CASE) CASE - засоби дозволяють проектувати практично будь-які системи на комп'ютері.

Інструментальні CASE - засоби і діапазон їх практичного застосування в більшій мірі залежать від вдалого визначення семантики і нотації відповідної мови моделювання.

Вибір CASE- засобів розробки вбудованих систем реального часу представляє ще більш складну проблему.

Співпраця Mathworks з Solidworks Corporation розширило можливості інженерного аналізу Matlab SimMechanics, забезпечен безшовних інтеграцію збірок Solidworks CAD в середу моделювання та проектування SimMechanics.

Це означає, що моделі SolidWorks можна моделювати в середовищі Simulink для аналізу сил і моментів в механічних з'єднаннях, побудови графіків прискорень і зсувів кожної частини системи, візуалізації руху збірки САПР, беручи до уваги маси окремих об'єктів. Ця можливість стає доступною шляхом установки відповідного плагіна в SimMechanics, який імпортує 3D-модель CAD всієї системи з тілами, сполуками, муфтами і масами з програми SolidWorks в SimMechanics для подальшої роботи з моделлю.

Інструментальні пакети National Instruments використовують інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і дають можливість профілюючого фахівця, сподіваючись тільки на свої сили, найбільш повно реалізувати свої задуми. Пакети розширення Labview (Add-Ons), включаючи Control Design Toolkit, Simulation Interface Toolkit, Simulation Module, System Identification Toolkit, нове покоління

засобів автоматизованої розробки вбудованих систем керування на базі PAC, DSP та FPGA. Пакет Simulation Interface Toolkit і структура Matlab script дозволяють імпортувати MathWorks, Inc. Simulink-моделі в Labview. Для керування просторового паралельного механізму, пошуку оптимальної траєкторії і взаємодії з програмою-моделлю (в середовищі SolidWorks) можливо використовувати програми, створені в середовищі LabVIEW з пакетом розширення NI-SoftMotion в якості контролера руху для керування становищем моделі.

Така взаємодія трьох систем значно розширює функціональні можливості Labview при моделюванні динамічних систем, їх аналізі та синтезі, і значно скорочує час проектування (рис. 1.4) [19].

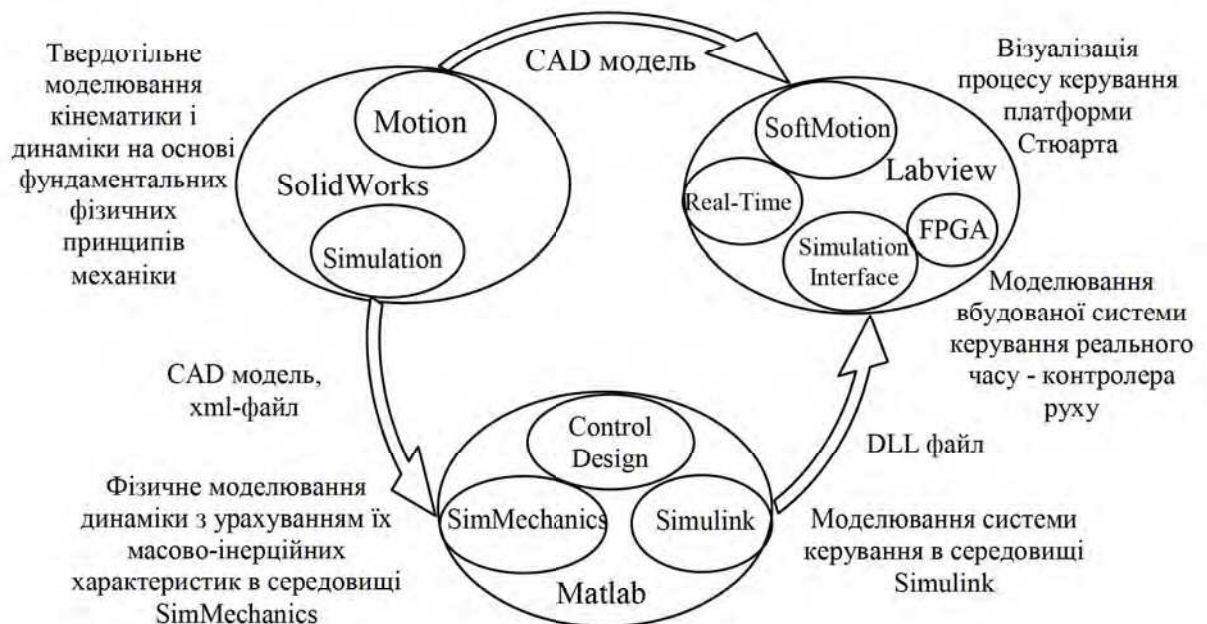


Рисунок 1.4 Засоби розробки вбудованих систем реального часу

Пакет Simulink з блоковим принципом побудови моделей використовує так само як Labview мову графічного програмування надвисокого рівня (VHLL). Він є мовою програмування наступного покоління [17], що задовольняє вимогам МОП.

Модуль Real-Time Workshop (RTW) автоматично генерує C- код з Simulink - моделі проектного цифрового пристрою і практично не вимагає його подальшої корекції.

Таким чином, застосування методу модельно-орієнтоване проектування має наступні переваги:

- інструментальні засоби використовують методологію МОП є високоефективної CASE- середовищем для розробки програм реального часу;
- забезпечують інтерактивний, графічний процес розробки пристроїв реального часу;
- мають рівень абстракції для опису пристроїв найбільш зрозумілий розробнику в порівнянні з численними діаграмами UML;
- будуються за принципом відкритої архітектури, що гарантує підтримку апаратних засобів більшості провідних виробників;
- забезпечують повний спіральний цикл (рис. 1.3) розробки пристроїв реального часу;
- функціональні можливості можуть бути розширені відповідно до вимог конкретної розробки;
- забезпечують високоефективний процес збору і обробки даних;
- модульний принцип побудови.

1.4. Постановка задачі дослідження

Існують публікації [15-18] спрямовані на теоретичне обґрунтування МОП, зокрема розкривають переваги такі, як скорочення часу виходу на ринок, зниження кількості помилок, які допускаються при проектуванні, програмуванні та тестуванні, що підвищує безпеку та надійність [16, 17], але не дають рекомендації до практичного застосування.

Багатьма авторами були досліджено використання МОП тільки з використанням одного виду прикладних засобів. Так в роботі [18], було розглянуто можливості модельно-орієнтованого проектування за допомогою програмних продуктів MathWorks, що дозволяють автоматизувати процес розробки, налагодження та верифікації програмного забезпечення для проектування моделі.

Також існують публікації в яких показано застосування технології МОП для проектування моделі платформи Стюарта. Так в роботі [20], показано переваги використання МОП в поєднанні Labview та Solidworks для проектування моделі платформи Стюарта.

Аналіз досліджень та публікацій з питань застосування технології модельно-орієнтованого проектування, показує, що при наявності існуючого теоретичного обґрунтування цієї технології, переваг над традиційним підходом, особливо при проектуванні складних мехатронних об'єктів та застосування окремих прикладних засобів не дозволяють ефективно застосовувати таку технологію.

Тому, поєднання трьох систем Solidworks, яка дозволяє твердотільне моделювання кінематики і динаміки на основі фундаментальних фізичних принципів механіки, Matlab, що має найкращі функціональні можливості при моделюванні динамічних систем, аналізі й синтезі та Labview, який має найкращі апаратно-програмні засоби проектування вбудованих систем реального часу, значно розширює можливості технології модельно-орієнтованого проектування складних динамічних об'єктів.

Таким чином, для побудови імітаційної моделі платформи Стюарт з урахуванням геометричних та масово-інерційних параметрів компонентів в CAD-системі необхідно вирішити наступні завдання:

- огляд джерел щодо імітаційного моделювання паралельних механізмів;
- побудова структурної схеми системи: складання блок-схеми взаємодії елементів платформи Стюарта та формалізація меж досліджуваної системи;
- розробка 3D CAD-моделі платформи Стюарта з урахуванням геометричних та масово-інерційних параметрів компонентів;
- моделювання траєкторій руху рухомої платформи Стюарта, розрахунок довжин й швидкостей штанг у кожній кінематичній ланці, аналіз прискорень і реакцій у ланках за різних навантажень.

Висновок до розділу 1

Аналіз на основі системного підходу конструктивних особливостей платформи Стюарта та її елементів виявив ряд властивостей. Мехатронна система є складним, багатовимірний об'єктом дослідження з нелінійними перехресними зв'язками. Аналіз використання платформи Стюарта дав змогу визначити, що для цього класу механізмів характерні два види робіт, це прецизійне позиціонування і стабілізація в певному положенні. На підставі

цього можна визначити фізичний зміст вектору вхідних сигналів в залежності від виду технологічних задач, які можливо вирішити за допомогою платформи Стюарта, це зміна кутів положення рухомої основи механізму відносно нерухомої системи координат.

Аналіз досліджень та публікацій з питань застосування технології модельно-орієнтованого проектування, показує, що при наявності існуючого теоретичного обґрунтування цієї технології, переваг над традиційним підходом, особливо при проектування складних мехатронних об'єктів дозволяють ефективно застосовувати таку технологію при поєднанні систем Solidworks, для твердотілого моделювання на основі фундаментальних фізичних принципів механіки та Matlab, що має найкращі функціональні можливості при моделюванні динамічних систем.

2. ПОБУДОВА КОНЦЕПЦІЇ МОДЕЛІ ТА ПРОЕКТУВАННЯ

2.1. Аналіз руху в SOLIDWORKS Motion

У базову поставку SolidWorks, входить пакет комплексного інженерного аналізу систем - SolidWorks Motion. SolidWorks Motion дозволяє конструктору провести інтегрований кінематичний і динамічний аналіз. SolidWorks Motion призначений для розрахунку руху механізмів. Модуль використовує інформацію, що міститься в збірках SolidWorks з можливістю уточнення розрахункової моделі за допомогою його процедур. SolidWorks Motion є третім, найбільш функціональним інструментом SolidWorks, для імітації руху. Перші два рівні: Рух збірки і Фізичне моделювання, присутні в базовій конфігурації SolidWorks Standard, можуть бути використані для створення кінематичної моделі збірки, імітації руху без отримання чисельних характеристик. Після цього інформація без будь-яких додаткових дій сприймається на рівні SolidWorks Motion. Підготовка розрахункової моделі в середовищі SolidWorks. Базова частина моделі формується в базовому пакеті SolidWorks Standard, не вимагаючи ліцензії Motion. В SolidWorks доступні всі з'єднання Motion, які в середовищі SolidWorks формуються як сполучення [21].

Можливості SOLIDWORKS Motion.

Ступеня свободи. Необмежена тверде тіло в просторі володіє шістьма ступенями свободи: трьома ступенями свободи переміщення і трьома ступенями свободи обертання. Воно може пересуватися по осях X, Y і Z і обертатися по осях X, Y і Z.

Методи інтегрування. Набір пов'язаних диференціальних і алгебраїчних рівнянь визначають рух моделі в SOLIDWORKS Motion. Числове рішення цих рівнянь виходить шляхом інтегрування диференціальних рівнянь відповідно до обмежень алгебраїчних рівнянь.

Знаходження інтерференції. Можна використовувати «Дослідження руху» для перевірки інтерференції в проекті при русі деталей. Можна перевірити будь-який компонент в моделі збірки SOLIDWORKS незалежно від того, чи є компонент учасником руху моделі.

Порівняння методів інтерполяції. Ставлячи набір даних для визначення сили, крутного моменту або профілів двигунів, можна вибрати будь-який з трьох методів інтерполяції: сплайн Якіма, кубічний сплайн або лінійний. Обраний метод інтерполяції буде використаний для визначення функції профілю між точками даних.

Рух по траєкторії. Для дослідження руху можна визначити двигун сполучення шляху, щоб задати значення переміщення, швидкості або прискорення в міру руху тіла вздовж шляху.

Лінійний статичний аналіз. Тіло, коли до нього застосовуються навантаження, деформується і вплив навантажень передається через все тіло. Зовнішні навантаження включають в себе внутрішні сили і реакції, які компенсують впливу і повертають тіло в стан рівноваги. Лінійний статичний аналіз розраховує сили переміщень, напруги, навантаження і реакції при впливі прикладених навантажень. SOLIDWORKS використовує методи аналізу кінцевих елементів (FEA) для дискретизації твердотільних компонентів, оболонок і балок. За допомогою лінійного аналізу напружень дозволяє визначити реакцію деталей і вузлів через вплив: сили, тиску, прискорення, температури, контакту між компонентами.

Для проведення аналізу напружень дані про матеріал елемента / деталі повинні бути відомі. Стандартна база даних матеріалів SOLIDWORKS попередньо заповнена матеріалами, які можуть використовуватися для аналізу, а база даних легко налаштовується для додавання конкретних вимог до матеріалів.

Сполучення механічних груп, що включають: кулачок; шарнір; редуктор; шестерня-рейка; гвинт, універсальний шарнір (шарнір Кардана). Стосовно до сполучень можуть бути призначені коефіцієнти тертя, а також уточнюючі параметри геометрії, що характеризують взаємодію об'єктів з тертям. Сполучення (стосовно аналізу) можуть бути замінені податливими втулками, що володіють заданою жорсткістю і демпфірувальними властивостями. Віртуальні втулки можуть бути анізотропними. При зв'язуванні плоских граней втулки вироджуються в свого роду прокладки. В інтерфейсі сполучень

SolidWorks також визначаються межі, що сприймають зусилля, з метою подальшого використання результатів динамічного аналізу в Simulation; Модуль Motion допускає розрахунок на моделі, в якій відсутній твердотільна інформація. В цьому випадку використовуються компоновальні ескізи, створені в контексті збірки. Для виконання динамічного аналізу відповідним блокам повинні бути присвоєні масово-інерційні характеристики [21].

Всі з'єднання можуть бути замінені податливими втулками, що володіють ідентичною жорсткістю і в'язкістю. Параметри жорсткості і в'язкості можуть бути перевизначені користувачем. Просторовий контакт в обчислювальній процедури може бути інтерпретований як контакт між реальними об'єктами моделі або як взаємодія їх спрощених моделей, отриманих тріангуляцією. Ступінь точності тріангуляції регулюється користувачем.

Умови, що визначають рух. В SolidWorks Motion створюються віртуальні пружини і демпфери, які можуть бути, в загальному випадку, нелінійними. Пружини можуть мати властивість в'язкості. Просторові контакти з заданими характеристиками жорсткості і демпфірування і з невідомими границями.

Враховується сила гравітації. Всі обчислення виконуються в залежності від реального часу. Стосовно об'єктів моделі призначаються лінійні і кутові швидкості, закон зміни яких визначається користувачем; лінійні сили і крутий момент, також діють за заданими законами.

Керування обчислювальним процесом. У модулі SolidWorks Motion є три обчислювальних процедури, що інтегрують рівняння руху. Користувач може вибрати процедуру в залежності від особливостей задачі. У процесі рішення може здійснюватися візуалізація руху моделі. Алгоритм ідентифікує кінематично перевизначені моделі і автоматично коригує з'єднання.

Результати. Переміщення, швидкості, прискорення, сили, моменти, інші кінематичні характеристики для з'єднань, пружин і демпферів, а також характерних точок моделі в чисельному, табличному і графічному вигляді. Анімація результатів, в тому числі і спільно з процедурами SolidWorks Animator. Генерація траєкторій характерних точок моделей і збереження їх в

якості кривих SolidWorks. Передача результатів динамічного аналізу - сил в сполученнях і інерційних навантажень в модуль SolidWorks Simulation [21].

2.2 Matlab SimMechanics як засіб моделювання динаміки складних мехатронних систем

SimMechanics – це засіб дослідження динаміки системи твердих тіл на основі побудови моделі такої системи у вигляді блокової діаграми в середовищі Simulink MATLAB [22].

За допомогою SimMechanics здійснюється моделювання механічних систем: як плоских механізмів, так і просторових, як простих (з однією-двома ступенями свободи), так і складних (з багатьма ступенями свободи). Вбудовані в SimMechanics інструменти моделювання дозволяють з високим ступенем точності описувати тверді тіла з урахуванням їх масово-інерційних характеристик, взаємного розташування, ступенів свободи зв'язків між ними, а також вимірювати параметри їх руху під дією прикладених сил і моментів в різних системах координат.

SimMechanics і фізичне моделювання

SimMechanics реалізує на платформі Simulink фізичне моделювання, що охоплює моделювання систем на основі фундаментальних фізичних принципів механіки. Фізичне моделювання реалізується безпосередньо в середовищі Simulink в тісному зв'язку з MATLAB. Але на відміну від блоків власне Simulink, які реалізують математичні операції і операції над сигналами, блоки фізичної моделі представляють матеріальні компоненти (тверді тіла або їх сполуки). Інакше кажучи, якщо в Simulink досліджувані процеси знеособлені, і розробник моделі при її створенні повинен чітко уявляти, яким фізичним величинам відповідає сигнал в тій чи іншій частині моделі, то в SimMechanics вони безпосередньо пов'язані з фізичними процесами, характерними для механіки, тобто кожен сигнал в моделі має конкретну фізичну зміст (переміщення, швидкість, прискорення, сила або момент) [22].

SimMechanics є безліч бібліотек блоків і додаткових засобів моделювання механічних систем. При цьому реалізація механічної моделі допускає в повній мірі використання оточення Simulink. Зв'язок фізичної моделі з загальними

блоками Simulink здійснюється за допомогою спеціалізованих блоків віртуальних датчиків і віртуальних двигунів Joint Sensor і Joint Actuator.

Блоки бібліотек SimMechanics представляють собою елементи, необхідні для моделювання механічних систем, що складаються з твердих тіл, з'єднаних зв'язками, що забезпечують необхідні міри свободи. Як і в Simulink, SimMechanics дозволяє представляти механізми, що мають ієрархічну структуру, у вигляді підсистем. Існує можливість встановлювати кінематичні обмеження, прикладати сили і моменти, а також вимірювати в процесі моделювання параметри руху [22].

Розробка моделей в SimMechanics

SimMechanics є розширенням Simulink для моделювання механічних систем, доповнюючи його специфічними компонентами і забезпечуючи рішення систем диференціальних рівнянь руху. Блоки SimMechanics побудовані за тими ж принципами, що і блоки інших додатків до Simulink, але мають свої особливості.

Найбільш важливим при використанні SimMechanics є побудова моделі механізму, що включає наступні послідовні кроки:

- визначення масово-інерційних характеристик твердих тіл, їх ступенів свободи обмежень відповідно до системами координат тіл;
- включення в модель віртуальних датчиків для вимірювання параметрів і віртуальних двигунів для забезпечення руху механізму, а також приєднаних сил і моментів;
- запуск процесу моделювання (реалізується на платформі Simulink) і дослідження руху до зупинки його існуючими обмеженнями;
- візуалізація процесу моделювання (руху механізму) в усі час моделювання в спеціалізованому графічному вікні.

Тверді тіла, системи координат, зв'язку і обмеження

Найбільш відповідальним і трудомістким є етап визначення масово-інерційних характеристик тіл, зв'язків між ними і накладених на рух обмежень, тобто, іншими словами, створення механічної фізичної моделі. SimMechanics підтримує блоки (моделі) твердих тіл з встановленими користувачем масово-

інерційними характеристиками (масою і тензором моментів інерції). Моделі тел з'єднуються одне з іншим за допомогою блоків з'єднань (JOINT), що встановлюють допустимі відносні переміщення (ступеня свободи, DOFS). Допускається установка також обмежень відносного руху тіл. Ці обмеження перешкоджають переміщенню тел в процесі моделювання і можуть бути функціями часу [22].

Інтерфейс SimMechanics підтримує різні можливості по установці параметрів систем координат, обмежень, віртуальних двигунів, сил і моментів. Серед них:

- розміщення систем координат (початку координат і кутів повороту осей) в різних точках твердого тіла для додатка в них сил і моментів або датчиків для вимірювання параметрів руху;
- розміщення комбінованих блоків з'єднань з бібліотеки SimMechanics;
- розширення існуючих бібліотечних з'єднань за рахунок об'єднання бібліотечних примітивів;
- використання в моделі блоків з інших бібліотек Simulink (наприклад, з SIMPO-WERSYSTEMS) і математичних засобів MATLAB.

SimMechanics володіє засобами візуалізації, що забезпечують просторове уявлення механічної системи як на початку, так і в процесі моделювання. При цьому SimMechanics в повній мірі використовує графічні засоби MATLAB. Відзначимо, що, крім спрощеного графічного відображення механічної системи (у вигляді апроксимуючих багатокутників або еквівалентних еліпсоїдів), в SimMechanics можуть бути використані ресурси VR TOOLBOX (пакета розширення віртуальної реальності, VIRTUAL REALITY, VR), які дозволяють зв'язати моделі твердих тіл з відповідними їм VRML -Файл (VRML - VIRTUAL REALITY MODELING LANGUAGE) і забезпечують спостереження руху моделі механізму в VRML-браузері. Відзначимо також, що завдання розробки віртуального світу для складної механічної системи, тим більше зі складними по конфігурації деталями, дуже трудомістка і вимагає спеціальної підготовки, не пов'язаної по суті основною метою - дослідженням механізму і його проектуванням. Однак така візуалізація істотно підвищує наочність процесу.

Незважаючи на великі можливості по створенню систем твердих тіл (моделей механізмів), які надає інтерфейс SimMechanics, складання моделі вручну надзвичайно важка. Щодо легко зібрати модель простого механізму, що включає 2-4 деталі. Якщо ж мова йде про створення моделі механізму складної просторової робототехнічної системи, розробити її вручну практично неможливо. Це пов'язано з необхідністю максимально точно розраховувати координати точок приєднання деталей (що є непростим завданням, тим більше для просторового механізму, а при наявності похибок механізм стає непрацездатним), знати тензор моментів інерції і т.д.. З огляду на існуючі об'єктивні труднощі ручної збірки моделей механізмів, компанія MATHWORKS розробила і впровадила спеціалізований CAD-транслятор, який забезпечує створення динамічних моделей механізмів в середовищі SimMechanics на основі його CAD-моделі (твердотільної моделі, створеної в середовищі автоматизованого проектування, на сьогодні це SOLIDWORKS, PRO / ENGINEER і AUTODESK INVENTOR). У разі використання CAD-транслятора модель механізму може успадковувати і графічне представлення його деталей [22].

Практичні основи створення збірок в CAD-середовищі для подальшої їх трансляції в SimMechanics, що пред'являються до CAD-моделям вимоги викладені в [22]. Таким чином, при застосуванні CAD-транслятора питання забезпечення працездатності моделей вирішуються в першу чергу в CAD-середовищі за допомогою встановлення правильних зв'язків між деталями механізму, створенням вузлів, які зберігали відносну рухливість в моделі і ін. Відзначимо, що тензори моментів інерції і приєднувальні розміри передаються з CAD-середовища в SimMechanics без спотворень, що забезпечує працездатність динамічної моделі.

Незважаючи на високу ефективність застосування CAD-транслятора, він володіє і істотними обмеженнями. Ці обмеження стосуються встановлених в CAD-моделі зв'язків: модель, цілком працездатна в CAD-середовищі, після трансляції може бути абсолютно непрацездатною в середовищі SimMechanics. Це відбувається в силу того, що не всі зв'язки коректно компілюються.

Визначені користувачем системи координат

При створенні моделі SimMechanics встановлює інерційні характеристики і параметри систем координат в базовій інерціальній системі координат, званої світової (WORLD). При цьому існує можливість встановлювати також локальні (пов'язані) системи координат (LOCAL CSS):

- GROUNDED CSS (системи координат закладення, стійки), пов'язані з блоками GROUND (стійка), нерухомими відносно світової системи координат;
- BODY CSS (пов'язана система координат) - система координат, пов'язана з твердим тілом, нерухома відносно нього і переміщається разом з ним.

При використанні CAD-транслятора зазначені системи координат створюються автоматично. Як правило, істотна частина створюваних систем координат, за винятком мінімально необхідних для забезпечення цілісності механізму, прихована від користувача. Але доступ до цих систем координат при необхідності можливий і досягається активізацією відповідних портів.

Вікно настройки параметрів блоку BODY забезпечує можливість додавати системи координат (СК), якщо це необхідно. Модель установки повинна забезпечувати доступ до параметрів осі обертання для зв'язку з нею віртуального датчика BODY SENSOR, що забезпечує вимір в моделі зазначеної кутової швидкості [22].

Допустимі обмеження

Встановлюючи функціональні алгебраїчні або кінематичні зв'язку між двома твердими тілами, можна обмежувати їх рух в складі механізму. Як правило, такі обмеження встановлюються засобами Simulink.

Віртуальні датчики, віртуальні двигуни і силові елементи

Як зазначено вище, віртуальні датчики і двигуни використовуються для перетворення сигналів між блоками Simulink, що не входять в SimMechanics, і блоками SimMechanics.

Блоки SENSOR (віртуальні датчики) забезпечують вимірювання параметрів руху тіл і в з'єднаннях. Існує можливість з'єднання блоку SENSOR і блоку SCOPE Simulink для візуалізації параметрів руху системи (вимірювання

положення, швидкостей, прискорень і т.д. в функції часу). Можна також дані з виходу блоку SENSOR передавати іншим блокам моделі SimMechanics за допомогою блоків ACTUATOR (віртуальний двигун), визначаючи, таким чином, діючі моменти і сили.

У свою чергу, блоки ACTUATOR встановлюють параметри руху для твердих тіл або в з'єднаннях. Вони забезпечують перетворення сигналів сил і моментів, які визначаються в Simulink, до виду SimMechanics і передачу їх до твердих тіл (або в з'єднання). Сам же сигнал Simulink може створюватися на базі вимірювань датчиком SENSOR параметрах (наприклад, це потрібно при включенні в модель відносного руху тертя між тілами). Блоки ACTUATOR також можуть встановлювати початкові значення параметрів руху, які потім інтегруються в процесі моделювання [22].

Силові елементи забезпечують моделювання силових взаємодій між тілами (наприклад, пружини, торсіони). Внутрішні сили залежать тільки від положення або швидкості відносного переміщення тіл, незалежно від зовнішніх впливів (сигналів). Можливість використовувати в моделі силові елементи (пружини) відкриває перспективний напрям досліджень. Йдеться про дослідження пружних механізмів.

Справа в тому, що CAD-модель по визначенню жорстка, оскільки в CAD-системах все тіла тверді, не деформуються. Однак є можливість після трансляції твердих тіл в середу SimMechanics перетворити їх, якщо це необхідно, в пружні. Для цього потрібна відповідна підготовка CAD-моделі.

Моделювання та аналіз параметрів руху

Очевидно, будь-яка модель створюється для проведення досліджень. Для механізмів робототехнічних систем важливим є дослідження руху, визначення діючих зусиль і інших параметрів, що забезпечують подальший прочностной розрахунок, розрахунок параметрів ефективності застосування і т.д. У цьому сенсі SimMechanics надає два методи аналізу механічних систем в процесі моделювання.

Прямий динамічний аналіз забезпечує визначення параметрів руху під дією приєднаних сил і моментів і діючих обмежень. Наслідком прямого динамічного аналізу є кінематичний аналіз.

Зворотний динамічний аналіз забезпечує визначення сил та моментів, необхідних для реалізації встановлених параметрів руху. В цьому випадку елементів моделі передаються не зусилля, а параметри руху (переміщення, швидкості і прискорення). Таку можливість забезпечують блоки Joint Actuator, саме за їх допомогою можна передавати або сили і моменти, що діють в з'єднанні, або параметри відносного руху. Характер руху визначить в цьому випадку силове взаємодія тіл (зусилля, що виникають в контакті, інерційні зусилля і ін.). Наслідком зворотного динамічного аналізу є можливість визначення значень факторів, які забезпечують рівновагу системи [22].

Таким чином, ефективність використання SimMechanics істотно підвищується, якщо динамічна модель створюється на основі твердотільної CAD-моделі з використанням CAD-транслятора.

Використання CAD-транслятора зобов'язує розробляти твердотільні моделі, що відповідають ряду вимог:

- модель збірки повинна бути ієрархічною;
- по можливості в складі моделі збірки повинна бути тільки одна фіксована деталь;
- ступінь рухливості деталей в складі моделі складання механізму повинна визначатися виключно накладаються на деталі зв'язками при установці сполучень;
- встановлювані сполучення повинні накладати зв'язку тільки в межах сусідніх рівнів ієрархії, у визначенні імен компонентів збірки (моделей деталей) не рекомендується використовувати кирилицю (імена компонентів повинні бути правильними ідентифікаторами).

2.3 Концепція моделі мехатронної системи та основні етапи її розробки

Концепція моделі для дослідження мехатронної системи (платформи Стюарта) базується на використанні імітаційних методів для аналізу її динамічних характеристик. Основні етапи розробки (рис. 2.1):

1. Огляд джерел і постановка задачі:

- аналіз конструктивних особливостей механізмів паралельної структури, зокрема платформи Стюарта;
- визначення фізичного змісту вхідних сигналів залежно від завдань, які потрібно вирішити (позиціонування, стабілізація).

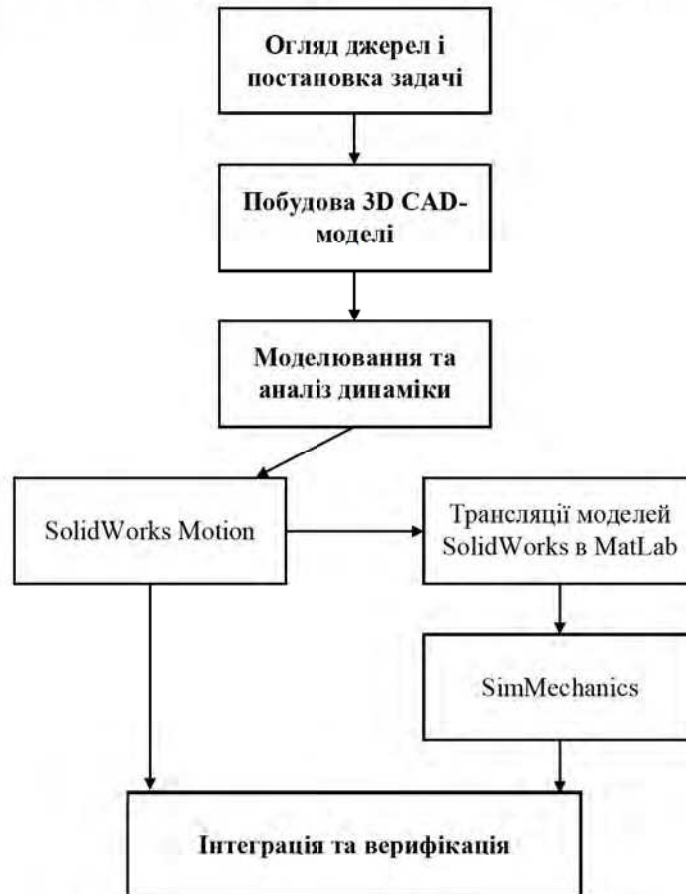


Рисунок 2.1 Етапи розробки моделі платформи Стюарта

2. Побудова 3D CAD-моделі. Розробка детальної CAD-моделі платформи Стюарта з урахуванням масово-інерційних характеристик усіх компонентів. Це важливо для подальшого аналізу кінематики та динаміки в спеціалізованих середовищах моделювання.

3. Моделювання та аналіз динаміки:

- використання SolidWorks Motion для кінематичного і динамічного аналізу. Цей етап дозволяє врахувати сили, моменти, тертя та інші впливи на механізм;
- трансляції моделей SolidWorks в MatLab SimMechanics;
- використання Matlab SimMechanics для моделювання механічних систем та аналізу параметрів руху з високим рівнем точності.

4. Інтеграція та верифікація:

- поєднання CAD-системи SolidWorks та SimMechanics для отримання більш точних даних про рух і сили, що впливають на платформу;
- верифікація результатів через аналіз динамічних параметрів і перевірка точності моделі.

Завдяки поєднанню цих інструментів можна отримати точну імітаційну модель для подальших досліджень і оптимізації конструкції платформи Стюарта.

Висновок до розділу 2

У другому розділі було проаналізовано особливості побудови імітаційної моделі платформи Стюарта за допомогою програмних середовищ SolidWorks Motion та Matlab SimMechanics.

Інструмент SolidWorks Motion дозволяє створювати кінематичні й динамічні моделі з урахуванням ступенів свободи, силових впливів, гравітації, тертя, деформацій та інтерференцій між елементами конструкції. Це дає змогу на етапі 3D-проектування враховувати основні фізичні властивості об'єкта.

SimMechanics надає широкі можливості для фізичного моделювання просторових механізмів, відображаючи зв'язки, обмеження, сили та моменти через графічне середовище MATLAB/Simulink. Завдяки використанню CAD-транслятора, можливе пряме перенесення геометрії, інерційних параметрів і сполучень з середовища SolidWorks до SimMechanics без втрати даних.

Таким чином, комбінування цих програмних середовищ дозволяє реалізувати ефективну концепцію побудови моделі складного динамічного об'єкта з паралельною структурою (рис. 2.1). Отримана імітаційна модель платформи Стюарта є базою для подальших досліджень її кінематичних і динамічних властивостей, що дозволяє здійснити обґрунтований вибір параметрів конструкції та підвищити точність математичних експериментів.

3. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЗМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

3.1. Основні параметри механізму паралельної структури

Кілька ключових геометричних параметрів визначають розмір і діапазон руху механізму з паралельною структурою. Запропонована конструкція дослідного зразка платформи Стюарта зображена на рисунку 3.1, геометричні параметри механізму паралельної структури наведені у таблиці 3.1 [23].



Рисунок 3.1 Фізичний прототип механізму паралельної структури на основі платформи Стюарта

Таблиця 3.1 Геометричні параметри механізму паралельної структури (платформи Стюарта)

Діаметр розміщення центрів шарнірів основи, м	1,458
Діаметр розміщення центрів шарнірів робочої поверхні, м	0,230
Кут між сусідніми шарнірами основи, градусів	6,69
Кут між сусідніми шарнірами робочої поверхні, градусів	9,76
Довжина ланки, м	
– мінімальна	0,381
– максимальна	1,397
Кути повороту шарнірів основи, градусів	
– ступінь свободи 1	± 42
– ступінь свободи 2	± 40
Кути повороту шарнірів робочої поверхні, градусів	
– ступінь свободи 1	± 100
– ступінь свободи 2	± 180

Ці параметри визначають робочу зону, стійкість і механічні обмеження платформи Стюарта:

- **Діаметр кола шарнірів основи: 1,458 м.** Це діаметр кола на нерухомій основі, на якому розташовані шість нижніх шарнірів (тобто зона кріплення штанг до основи). Більший діаметр основи зазвичай означає ширшу опорну площу для штанг, що може покращувати стійкість і збільшувати допустимий діапазон нахилу платформи. У багатьох конструкціях шарніри основи розташовані приблизно по колу радіуса R (половина цього діаметра). Ширша основа відносно верхньої платформи, як правило, збільшує об'єм досяжної робочої зони механізму.

- **Діаметр кола шарнірів платформи: 0,230 м.** Це діаметр кола на рухомій верхній платформі, у точках якого під'єднуються шість верхніх шарнірів. Шарніри верхньої платформи розташовані на значно меншому колі (радіус r), ніж на основі. Невеликий діаметр верхньої платформи концентрує точки кріплення штанг, що може дозволяти платформі досягати більших кутів обертання, перш ніж штанги досягнуть своїх меж.

- **Кутове зміщення пари шарнірів (основа): 6,69°.** Шість шарнірів основи згруповані у три пари, розміщені на колі основи. У межах кожної пари два шарніри розташовані лише приблизно на 6,69° один від одного по колу. Таке мале кутове рознесення означає, що кожна пара штанг кріпиться дуже близько на основі. Таке зміщення (часто його називають кутом між шарнірами однієї пари) є типовою конструктивною особливістю платформ Стюарта — воно дозволяє організувати шість штанг у вигляді трьох майже співпадаючих пар, що допомагає уникати їх зіткнень і забезпечує симетричне компонування. Сами пари рівномірно розташовані по 360° (приблизно через 120° між кожною парою).

- **Кутове зміщення пари шарнірів (платформа): 9,76°.** Аналогічно, шість шарнірів верхньої платформи утворюють три пари, кожна з яких рознесена приблизно на 9,76° по колу верхньої платформи. Трохи більший кут між парами шарнірів верхньої платформи (у порівнянні з основою) відображає специфічну геометрію цього проєкту — концепція парності при цьому

зберігається. Значення кутів зміщення між відповідними парами шарнірів основи та платформи ($6,69^\circ$ проти $9,76^\circ$) визначають нахили та перехреснення штанг між основою та платформою. Правильний вибір цих кутів гарантує, що кожна штанга з'єднає потрібні шарніри основи та платформи без перешкод і що механізм матиме добре обумовлену геометрію (уникаючи сингулярних позицій).

- **Довжина штанг — мінімальна та максимальна: 0,381 м (мін.), 1,397 м (макс.).** Це мінімальні та максимальні довжини кожної штанги (актуатора), що визначають робочий хід телескопічних ланок. У цій конструкції штанги можуть подовжуватися більш ніж на 1 метр — дуже великий діапазон. Такий великий хід дозволяє платформі досягати широкого діапазону висот і орієнтацій: наприклад, повністю втягнуті штанги опускають платформу до мінімальної висоти, тоді як повністю розтягнуті — піднімають до максимальної. Різниця між 0,381 м та 1,397 м визначає повний доступний хід кожної штанги. Цей хід, разом із геометрією розміщення штанг, визначає вертикальну робочу зону (наскільки високо/низько може рухатися платформа) і впливає на здатність до нахилів. Більші довжини штанг і їхні ходи загалом збільшують робочу зону, але потребують, щоб шарніри витримували більші кути.

- **Обмеження нахилу шарнірів основи: $\pm 42^\circ$ / $\pm 40^\circ$.** Нижні шарніри кожної штанги (на основі) є двоступеневими шарнірами, які дозволяють штанзі вільно нахилитися. Позначення « $\pm 42^\circ$ (DOF1) / $\pm 40^\circ$ (DOF2)» вказує, що це універсальний шарнір, який може нахилитися навколо двох взаємно перпендикулярних осей — приблизно до 42° в одному напрямку та 40° в іншому від нейтральної позиції. Інакше кажучи, шарнір основи може нахилитися, щоб компенсувати зміну кута штанги під час руху платформи, але лише в цих межах. Ці обмеження запобігають надмірному перегинанню штанги або її зіткненню з основою. На практиці діапазон $\pm 40^\circ$ є типовим для міцних універсальних шарнірів: він має бути достатньо великим, щоб забезпечити значні нахили платформи, але не настільки великим, щоб послабити конструкцію або призвести до наближення до сингулярності. Обмеження

шарнірів основи є критичним фактором того, наскільки сильно платформа може нахилитися (у тангажі та крені) — коли нахил штанги досягає 40° , вона більше не може нахилитися без зриву контакту або перевантаження шарніра.

- **Обмеження нахилу шарнірів платформи: $\pm 100^\circ$ / $\pm 180^\circ$.** На верхньому кінці кожної штанги шарнір, що з'єднує її з рухомою платформою, має ще більший діапазон руху. Перша ступінь вільності може повертатися приблизно на $\pm 100^\circ$, а друга — до $\pm 180^\circ$ (фактично повний розмах у 180° в кожен бік). Такий великий діапазон вказує на те, що верхній шарнір виконаний як сферичний шарнір (або інший багатовісний шарнір), що дозволяє штанзі вільно орієнтуватися в будь-якому напрямку майже без обмежень. Надзвичайно велике значення $\pm 180^\circ$ свідчить, що одна вісь шарніра може обертатися практично без обмежень (або обмежується $\pm 180^\circ$ лише для моделювання, фактично забезпечуючи повні 360°). Такі широкі кутові можливості гарантують, що штанга може супроводжувати повороти платформи навколо будь-якої осі (курсний, тангаж, крен) без заїдань і блокувань. По суті, шарнір платформи не буде обмежувальним чинником, доки штанга або шарнір на основі не досягнуть своїх механічних меж. Як і у випадку з основою, ступінь свободи цих шарнірів є критично важливою, оскільки саме механічні обмеження — хід штанги та допустимі кути шарнірів — зрештою визначають максимальний діапазон рухів платформи.

3.2 Створення моделі механізму паралельної структури (платформи Стюарта) в SOLIDWORKS

Виконаємо відповідні дії які вказані в таблиці 3.2 для створення станини механізму.

Таблиця 3.2 Команди створення станини в середовищі SOLIDWORKS

Частина 1: Створення компонентів і базової збірки	Частина 2: Збирання компонентів в Assembly
1. Створення кільця основи з отворами для шарнірів BaseRing.sldprt: - Файл → New → Part - вибираємо Top Plane → Sketch → 2 кола: Ø1458 мм (зовнішнє), Ø1300 мм (внутрішнє) - Features → Extruded Boss/Base → висота 30 мм - створення отвору Ø20 мм на колі Ø1458 мм → Circular Sketch Pattern → 6 екз. (360°) - Save As: BaseRing.sldprt 2. Створення вертикальні опори VerticalLeg.sldprt: - Файл → New → Part - Front Plane → Sketch → прямокутник 60×800 мм → Extruded Boss/Base (60 мм) - додаємо отвори зверху та знизу під з'єднання (Ø20 мм рекомендовано) - Save As: VerticalLeg.sldprt 3. Створення верхньої рами з отворами TopFrame.sldprt: - аналогічно до BaseRing, але з меншими розмірами: - Ø1000 мм (зовнішнє), Ø850 мм (внутрішнє), висота 20 мм - Отвори Ø20 мм по колу Ø1000 мм → Circular Sketch Pattern → 6 шт. - Save As: TopFrame.sldprt	1. Створення нової збірки: - Файл → New → Assembly - Додаємо компонент BaseRing.sldprt (він стане фіксованим — Fixed) 2. Додайте шість копій VerticalLeg.sldprt: - Insert Components → VerticalLeg.sldprt - Повторіємо 6 разів або використовуємо Linear/Circular Pattern в Assembly 3. Додаємо TopFrame.sldprt: - Insert Components → TopFrame.sldprt 4. Зв'язки (Mates) для кожної опори: - Mate → Concentric — вирівнюємо отвір опори з отвором BaseRing - Mate → Coincident — низ опори з верхом BaseRing - повторюємо для кожної з 6 опор 5. Зв'язки верхньої рами: - Mate → Concentric — отвори TopFrame з верхами опор - Mate → Coincident — низ TopFrame з верхом опор 6. Перевірка: - Evaluate → Move Component → перевіряємо, чи всі компоненти правильно з'єднані - зафіксуємо тільки BaseRing; інші компоненти мають бути вільні в допустимих межах

Таким чином, було спроектовано станину механізму паралельної структури (платформи Стюарта) (рис. 3.2).

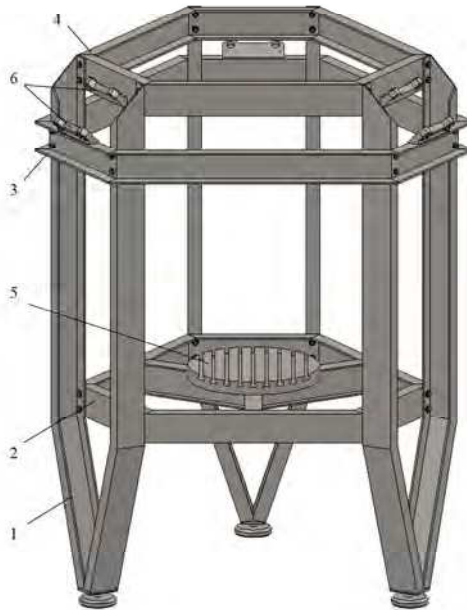


Рисунок 3.2 Станина механізму паралельної структури (платформи Стюарта)

Вона складається з трьох зварених подвійних V-подібних стійок 1 та трьох зварених кільцевих елементів 2, 3 та 4, що з'єднують між собою стійки. У середині нижнього кільця 2 за допомогою зварених зіркою балок встановлено стіл 5 з Т-подібними пазами. Розміщення двох верхніх кілець 3 та 4 по різні боки стійок дозволяє одночасно підвищити жорсткість конструкції та одержати базові поверхні для встановлення опор 6 карданних підвісів, осі яких нахилені під кутом 45° до горизонту.

Створення та збирання вузла актуатора механізму паралельної структури (платформи Стюарта) в SolidWorks 2017.

Актуатор платформи – це телескопічна опора зі шарнірними (карданными) з'єднаннями на кінцях та лінійним приводом на основі гвинтової передачі (ШГП). Кожен актуатор з'єднує основу та платформу, забезпечуючи їх відносний рух.

Структура актуатора складається з нижнього кінця актуатора, що кріпиться до основи через карданне шарнірне з'єднання, верхній кінець – до платформи через аналогічне з'єднання. Усередині актуатора розташований гвинтовий механізм: обертовий гвинт з'єднаний через ремінну передачу з електродвигуном, а на гвинті встановлена гайка ШГП. Гайка з'єднана з висувною штангою актуатора. При обертанні гвинта гайка переміщується вздовж нього і штанга висувається або втягується, змінюючи довжину

актуатора. Карданні шарніри на кінцях дозволяють змінювати кут між штангою і точками кріплення, забезпечуючи свободу руху платформи.

Компоненти (файли), що були розроблені для створення збірки: Base.sldprt (базовий кронштейн на основі), Bracket.sldprt (кронштейн на платформі), Fork.sldprt (вилка кардана), Joint.sldprt (хрестовина кардана), Axis.sldprt (осьовий штифт кардана, 2 шт), Barrel.sldprt (корпус/труба актуатора), Spindle.sldprt (гвинт), Spindle nut.sldprt (гайка ШГП), Extender.sldprt (прухома штанга), Motor.sldprt (електродвигун), Pulley.sldprt (шків на гвинті), Belt.sldprt (пасовий ремінь), Bearing.sldprt + Bearing cover.sldprt (підшипник і кришка), а також допоміжні деталі: Case.sldprt (корпус кріплення двигуна/підшипника), Clamp.sldprt, Collet.sldprt, Key.sldprt (для кріплення шківа).

Поетапне виконання для створення нової збірки та вставки базового компоненту.

1. Створюємо нову збірку. В SolidWorks 2017 оберемо **File > New > Assembly** (Файл > Створити > Збірка). Після створення порожньої збірки використайте команду **Insert Components** («Вставити компонент») для додавання першої деталі. У діалоговому вікні відкриття знаходимо деталь **Base.sldprt** (базовий кронштейн основи актуатора) у папці з розпакованим проектом Нехарод і відкриваємо її. Курсор перетвориться на зображення деталі. Встановлюємо опцію **“Fix at origin”** перед вставкою першої деталі – це зафіксує деталь співвісно з початком координат збірки.

2. Орієнтація базового кронштейна. Переконаємося, що деталь Base.sldprt орієнтовано правильно: площина кріплення до рами (плоска сторона кронштейна) лежить горизонтально (XY), а отвори для осі кардана спрямовані належним чином. В іншому випадку командою **Rotate Component** (Поворот компонента) або встановлюємо допоміжні *Reference Geometry* для вирівнювання. Базовий кронштейн має вилкоподібний виступ із отворами – це частина карданного шарніра, яка з'єднуватиметься з актуатором. Розташовуємо його так, щоб ці вилки були спрямовані вгору або під потрібним кутом, як в реальній конструкції.

Поетапне збирання нижнього карданного з'єднання (кріплення до

основи).

1. Вставляємо вилку кардана. Додаємо деталь **Fork.sldprt** до збірки (Insert Components). Ця деталь слугуватиме другим елементом карданного шарніра, що прикріплений до корпусу актуатора. Розміщуємо Fork.sldprt поблизу вилки на Base.sldprt. Ця «вилка» є частиною штанги або окремий кронштейн – у нашому випадку Fork.sldprt являє собою вилку, яка приєднається до базового кронштейна через хрестовину.

2. Додаємо хрестовину кардана. Вставляємо деталь **Joint.sldprt** – це центральна частина карданного шарніра (так звана хрестовина), що забезпечує взаємно перпендикулярне з'єднання двох вилок. Розташовуємо Joint.sldprt між вилкою Base та вилкою Fork. У хрестовині передбачено два взаємно перпендикулярні отвори під осі.

3. Вставляємо осі (штифти). Додаємо два екземпляри деталі **Axis.sldprt**. Це циліндричні штифти, які виконують роль осей обертання в карданному шарнірі. Розташовуємо їх: один – співвісно отворам вилки Base та хрестовини, другий – співвісно отворам вилки Fork та хрестовини (перпендикулярно першому).

4. Виконуємо сполучення (**Mate**) деталей кардана:

a. задаємо концентричне сполучення (**Concentric Mate**) між першою віссю (Axis.sldprt) та отворами у вилці базового кронштейна і відповідним отвором у хрестовині Joint.sldprt. Це вирівняє геометричні осі штифта і отворів, дозволяючи обертання навколо осі;

b. задаємо концентричний Mate між другою віссю та отворами у вилці Fork.sldprt і хрестовині (інший отвір). Таким чином друга вісь з'єднає вилку актуатора з хрестовиною;

c. для утримання деталей від осьового зміщення додаємо співпадання площин (**Coincident Mate**): співпадіння між торцем осі та зовнішньою площиною вилки (щоб штифт фіксувався в вилці і не “вивалювався”). Застосовуємо таке сполучення з обох боків для кожного штифта, вибравши відповідні торцеві грані осей і прилеглі грані вилок;

d. перевіряємо ступінь свободи: хрестовина повинна вільно

обертатися відносно кожної вилки навколо відповідних осей. Можимо тимчасово покрутити вилку Fork відносно Base, щоб переконатися, що карданний шарнір працює (дві ступені свободи – обертання навколо двох перпендикулярних осей).

Таким чином, було спроектовано шарнірну опору разом з карданним вузлом механізму паралельної структури (платформи Стюарта) (рис. 3.3). Шарнірні опори складаються з базового та верхнього кронштейна 1, в отворах яких встановлені голчасті підшипники. Із зовнішнього боку підшипники підтиснені кришками 2, а із внутрішнього у них входять вісі карданного підвісу 3 привода штанги змінної довжини.

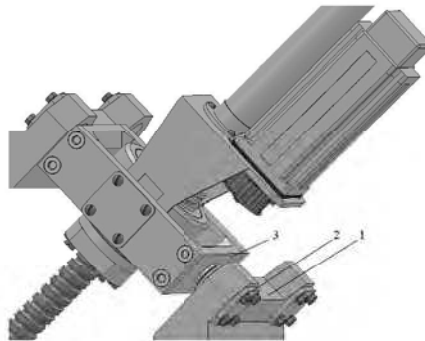


Рисунок 3.3 Шарнірна опора з карданним вузлом

Поетапне встановлення корпусу актуатора і гвинтового механізму.

1. Вставляємо корпус актуатора (трубу). Додаємо до збірки основний корпус актуатора – деталь **Barrel.sldprt**. Це циліндрична труба або напрямна, всередині якої розміщений гвинтовий привід і по якій буде рухатися штанга. Розташуйте Barrel.sldprt поблизу зібраного карданного шарніра. Один із кінців труби (нижній) кріпитиметься до вилки Fork.sldprt, інший (верхній) спрямований до платформи.

2. Прикріплюємо корпус до кардана. Поедняйте нижній кінець корпусу Barrel.sldprt із вилкою Fork.sldprt (яка вже з'єднана з основою через кардан).

3. Додаємо співвісне (концентричне) сполучення між циліндричною частиною кінця Barrel.sldprt і відповідним отвором/виступом вилки Fork. Корпус має монтажні отвори, сумістіть їх з отворами вилки та, за потреби, вставте додаткові кріпильні болти (використайте стандартні болти з архіву, наприклад *Hex Bolt M8* і т.д.) – для них також задайте концентричні й

співпадаючі сполучення з отворами.

4. Додаємо **Coincident Mate** між прилеглими площинами вилки Fork та торцевою площиною (або фланцем) на корпусі Barrel, щоб прибрати зазори. В результаті корпус актуатора буде шарнірно закріплений у вилці Fork і зможе нахилитися разом з вилкою навколо горизонтальної осі кардана.

5. Вставляємо гвинт. Додаємо деталь **Spindle.sldprt** – це різьбова частина (гвинт) гвинтової передачі. Гвинт проходитьме всередині корпусу Barrel. Один його кінець (нижній) зафіксований у підшипнику на корпусі, на ньому закріплено шків приводу, інший кінець (верхній) вільний чи з'єднаний з муфтою.

6. Розміщуємо Spindle.sldprt приблизно співвісно з корпусом Barrel. Задаємо концентричне сполучення між циліндричною поверхнею гвинта та внутрішнім циліндричним отвором або напрямною всередині Barrel.sldprt, щоб вирівняти його по осі (гвинт має бути строго по центру труби).

7. Зафіксуємо осьове положення гвинта у корпусі: застосовуючи **Coincident Mate** між, торцем нижнього підшипника (або іншою опорною поверхнею на гвинті) і відповідною внутрішньою опорною поверхнею в корпусі Barrel (площиною упору підшипника). Це імітує встановлення гвинта в підшипник. Гвинт повинен мати можливість обертатися, але не зміщуватися вздовж осі (Mate не завадить обертанню, якщо вибрано правильно поверхні – концентричність забезпечує обертання).

8. Вставляємо гайку ШГП. Додаємо деталь **Spindle nut.sldprt** – це кулькова гайка, яка рухається по гвинту. В реальному пристрої вона перетворює обертання гвинта на поступальний рух. Розташовуємо гайку на різьбову частину гвинта. Застосовуємо концентричне сполучення між отвором гайки і циліндричною поверхнею гвинта (або різьби). Гайка тепер розташована на гвинті.

9. Прикріплюємо штангу актуатора. Вставляємо деталь **Extender.sldprt** – це висувна штанга (шток), що з'єднана з гайкою і виходить з корпусу назовні. Розташовуємо Extender.sldprt так, щоб один її кінець опинився всередині корпусу, біля гайки, а інший виходив з верхнього отвору Barrel.sldprt.

10. Прив'яжуємо штангу до гайки: якщо у гайці або штанзі передбачено різьбове чи фланцеве з'єднання, зробить **Coincident Mate** між відповідними площинами.

11. Задаємо концентричне сполучення між зовнішньою поверхнею штанги Extender і внутрішнім отвором/напрямною у верхній частині корпусу Barrel. Таким чином штанга вирівняна і може ковзати всередині корпусу при висуванні.

12. Перевіряємо, чи не “конфліктують” деталі: у втягнутому положенні штанги гайка повинна бути в нижній частині гвинта, а при висуванні – переміщатися вгору.

13. Сполучення гвинтової передачі (**Screw Mate**). Створюємо механічний зв'язок типу “гвинт” між гвинтом і гайкою, щоб симулювати різьбову передачу. Для цього виконуємо:

а. викликаємо команду **Mate** і переходимо на вкладку **Mechanical Mates** (Механічні зв'язки). Обираємо підтип **Screw** (Гвинтовий);

б. у полі **Mate Selections** вибираємо вісь обертання гвинта та вісь поступального руху гайки (осьову лінію гайки або штанги). SolidWorks створить гвинтову пару: “**Screw mate constrains two components to be concentric, and adds a pitch relationship between the rotation of one component and the translation of the other**”. Тобто при обертанні гвинта на певний кут гайка зміщується лінійно на відповідну відстань, залежну від кроку різьби;

с. встановлюємо параметри гвинтового зв'язку: поле **Pitch** (Крок) задаємо рівним кроку різьби гвинта. ШГП має крок 5 мм, введіть **5 mm per revolution** (5 мм за оберт). Напрямок (Right-hand/Left-hand) оберемо відповідно до різьби (стандартна права різьба – Right-hand).

14. Застосовуємо зв'язок. Тепер гвинт і гайка пов'язані: обертання гвинта викликати лінійне переміщення гайки на потрібний крок, і навпаки – переміщення гайки обертати гвинт. Перевіряємо це: зафіксуємо тимчасово гвинт (або включіть **Physical Dynamics** в MotionManager) та спробуємо потягнути гайку/штангу вздовж – вона повинна обертати гвинт.

15. Перевірка ступенів свободи актуатора. На цьому етапі основні механічні зв'язки всередині актуатора налаштовано. Переконаємося, що: гвинт може обертатися (відносно корпусу) – не зайвим буде залишити його **Float** (плаваючим) відносно **Bagel**, крім тих матів, що тримають його в підшипнику; гайка зі штангою може поступально рухатися вздовж гвинта (її позиція зараз обумовлена **Screw Mate** зі гвинтом); карданний шарнір на основі вільно згинається, дозволяючи актуатору нахилитися. Верхній кінець штанги наразі вільний.

Поетапне додавання електродвигуна та пасової передачі.

1. Встановлюємо електродвигун. Вставляємо деталь **Motor.sldprt** – модель електродвигуна. Зазвичай двигун кріпиться збоку до корпусу актуатора через спеціальний кронштейн/фланець. У нашому проекті це, деталь **Case.sldprt**.

2. Розташовуємо **Motor.sldprt** на відповідному місці корпусу. Задаємо **Coincident Mate** між монтажною площиною двигуна і площиною кріплення на корпусі (щоб притулити його). Вирівнюємо центри отворів: концентричні сполучення між отворами фланця двигуна та різьбовими отворами на корпусі (або болтами, якщо ви вирішили їх вставити). Це жорстко прикріпить електродвигун до корпусу актуатора.

3. Переконаємося, що вісь валу двигуна орієнтована паралельно (або на одній площині) з віссю гвинта – зазвичай вони паралельні, знаходяться поруч.

4. Додаємо шків на двигун. Вставляємо деталь **Pulley.sldprt** (шків) для двигуна.

5. Додаємо пасовий шків на гвинт. Файл **Pulley.sldprt** використовується як шків на самому гвинті. Поміщаємо ще один екземпляр шківів на нижній кінець гвинта.

6. Вирівнюємо концентрично шків зі гвинтом (оберіть отвір шківів і вал гвинта). Задаємо **Coincident Mate** між внутрішньою стороною шківів і відповідною площиною/ступицею на гвинті (або кришкою підшипника). Шків на гвинті повинен бути співвісний з валом двигуна по висоті (щоб ремінь був

натягнутий прямо).

7. Встановлюємо пасовий ремінь. Ремінь має охоплювати обидва шківви. Для цього:

а. вставляємо деталь **Belt.sldprt**. Використовуємо **Path Mate** або **тіло Loft** по траєкторії для реалістичного вигину. Потім додайте **Distance Mate** між площиною ремня і центрами шківів, щоб задати відстань (або залиште як є, якщо модель ремня вже правильно спроектована);

б. переконуємося, що ремінь не перевищує довжиною відстані між шківвами (візуально).

8. Перевірка приводу. Після додавання шківів і ремня, вал двигуна і гвинта залишаються роздільними компонентами. У реальності їх зв'язує натягнутий ремінь, що забезпечує рівність кутових швидкостей (або певне передатне число, якщо діаметри різні). В цій моделі не будемо створювати фізичну еластичну зв'язку ремня, але можемо спростити: для анімації застосовується **Gear Mate** (зубчаста передача) між валом двигуна і гвинтом, задавши відповідне співвідношення обертів згідно діаметрів шківів (1:1). Це дозволить при обертанні двигуна автоматично обертати гвинт. Для цього налаштовуємо **Gear Mate** через **Mate > Mechanical > Gear**, вибравши циліндр валу двигуна і циліндр гвинта, та задавши відношення 1:1 якщо діаметри рівні;

На цьому етапі механічна збірка актуатора завершена. Маємо: шарнір на основі, корпус актуатора з гвинтовим приводом та двигуном, висувну штангу. Зберігаємо отриману збірку як, *Actuator.SLDASM* та в подальшому її вставляємо в основну модель платформи Стюарта.

Збирання верхнього карданного з'єднання (кріплення штанги до платформи). Наразі верхній кінець штанги актуатора (*Extender.sldprt*) нічим не закріплений і може рухатися. У реальній конструкції він з'єднується з рухомою платформою через другий карданний (або сферичний) шарнір. Для повноти моделі безпосередньо прикріпимо актуатор до платформи в загальному вузлі платформи.

Підзбірка актуатора *Actuator.SLDASM* містить усе, окрім верхнього кронштейна *Bracket*. Штанга завершується вилкою *Fork* на кінці. У збірці

вставляємо платформу (Platform.sldprt) і кріпимо до неї Bracket.sldprt (болтами). Потім вставляємо підзбірку актуатора і за допомогою **Flexible subassembly** (гнучка підзбірка) здійснюємо сполучення - робимо концентричний Mate між вилкою на штанзі актуатора і отвором у кронштейні Bracket (через хрестовину Joint, яка лежить у підзбірці актуатора). Оскільки підзбірка гнучка, можна досягнути до її внутрішнього компоненту Joint.sldprt і виконати концентричне сполучення з отвором Bracket. Додамо вісь Axis.sldprt як окрему деталь у головну збірку, вставте її в отвори Bracket + хрестовина. В результаті цього актуатор буде прикріплений до платформи через кардан у контексті головної збірки.

Таким чином, актуатор або ланка змінної довжини (рис. 3.4) складається з карданного вузла 1 з приводом ШГП, гвинт 2 якої через вал 3 кріпиться до шарнірної опори 4 робочої поверхні. З протилежного боку привода за допомогою хомута 5 закріплений датчик 6, який дозволяє відстежувати початкове положення гвинта. Гайка 7 передачі жорстко закріплена до порожнистого валу 8, що обертається у підшипниках корпусу 9. У корпусі 9 запресовані вісі, які мають можливість обертатися у голкових підшипниках, розміщених у отворах карданного підвісу 1 і закритих кришками 10. Таким чином, карданний підвіс має дві взаємно перпендикулярні осі обертання, які перетинаються у точці, що знаходиться на осі гвинта. До корпусу 9 прикріплений кронштейн 11 з двигуном 14, на валу якого закріплений шків 13 зубчасто-пасової передачі, яка передає обертання порожнистому валу 9 і гайці гвинтової передачі.

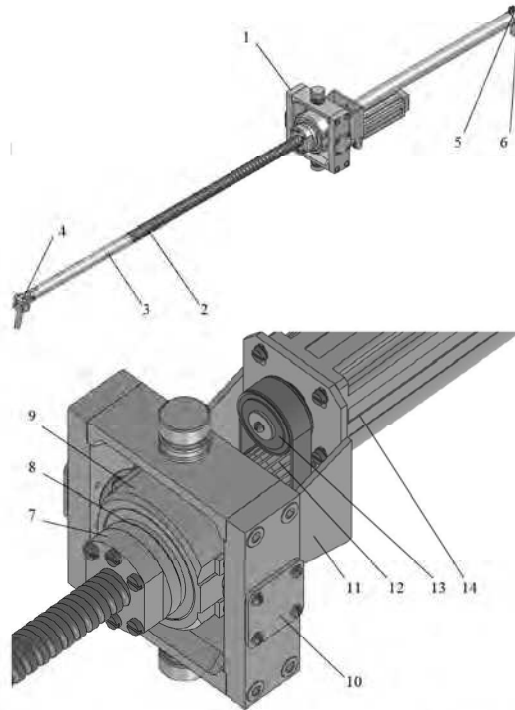


Рисунок 3.4 Штанга разом з карданним вузлом та приводом

Налаштування вузла актуатора для руху (Motion Study). Після завершення геометричного складання треба налаштувати актуатор як функціональний механізм, здатний рухатися при симуляції. Основні етапи: дозволити гнучкість підзбірки, налаштувати рушій (мотор) та перевірити рух гайки і штанги.

1. Встановлюємо підзбірку гнучкою. Актуатор використовується в основній моделі платформи, вставляємо зібрану підзбірку *Actuator.SLDASM* у головну збірку (Hexapod.SLDASM). За замовчуванням, підзбірки вкладаються як жорсткі – їх внутрішні компоненти не рухаються. Щоб актуатор працював, зробить його гнучким:

а. в дереві моделі правою кнопкою клацнімо на *Actuator.SLDASM* і виберемо **Component Properties** (Властивості компонента). У вікні властивостей знаходимо опцію **Solve as:** та встановлюємо перемикач **Flexible** (Гнучка). Підтверджуємо. Тепер підзбірка отримала ступені свободи для внутрішніх рухомих частин;

б. після цього можемо бачити рух: переміщувати штангу актуатора рукою в Assembly Motion (при вимкнених зайвих сполученнях) – вона має висуватися, обертаючи гвинт, а карданні шарніри повинні повертатися.

2. Додаємо мотор для симуляції. Переходимо до середовища **Motion Study** (внизу графічного вікна – вкладка “Motion Study 1”). За замовчуванням,

всі створені раніше сполучення (Mate) імпортуються в Motion Study. Щоб анімувати рух актуатора:

3. Додасмо двигун: натиснемо **Motor** (на панелі SolidWorks Motion або Animation). У властивостях Motor виберемо тип **Rotary Motor**.

4. Клацнемо на вал гвинта або безпосередньо на деталь Spindle.sldprt (або на суміщену з ним вісь). Ця деталь буде обертатися під дією мотора. Задаємо параметри: **Constant Speed** = 30 об/хв (rpm) або інший бажаний швидкісний режим.

5. Напрямок обертання можна змінити стрілкою на екрані. Натискаємо **Reverse** якщо потрібно, щоб при додатному часі штанга висувалася (враховуючи напрям різьби).

6. Запуск анімації. Встановлюємо тривалість Motion Study 10 секунд. Перетягуємо ползунок часу до кінця і задаємо для мотору на цьому моменті певний кут 5 обертів = 1800° . SolidWorks автоматично створить ключові кадри.

7. Впродовж 10 секунд гвинт обертається, гайка рухається вздовж нього, штанга висувається або втягується відповідно. Карданні шарніри при цьому дозволяють штанзі змінювати кут: якщо основа зафіксована, , актуатор буде змінювати свій кут нахилу при зміні довжини.

У повному складі платформа зв'язана з усіма шістьма актуаторами, і її рух розраховується комплексно, але для окремого вузла такий тест дає наочність.

Виконавши такі дії для шести актуаторів та з'єднавши їх на робочій поверхні отримуємо тривимірну модель механізму паралельної структури в середовищі SolidWorks (рис. 3.5).

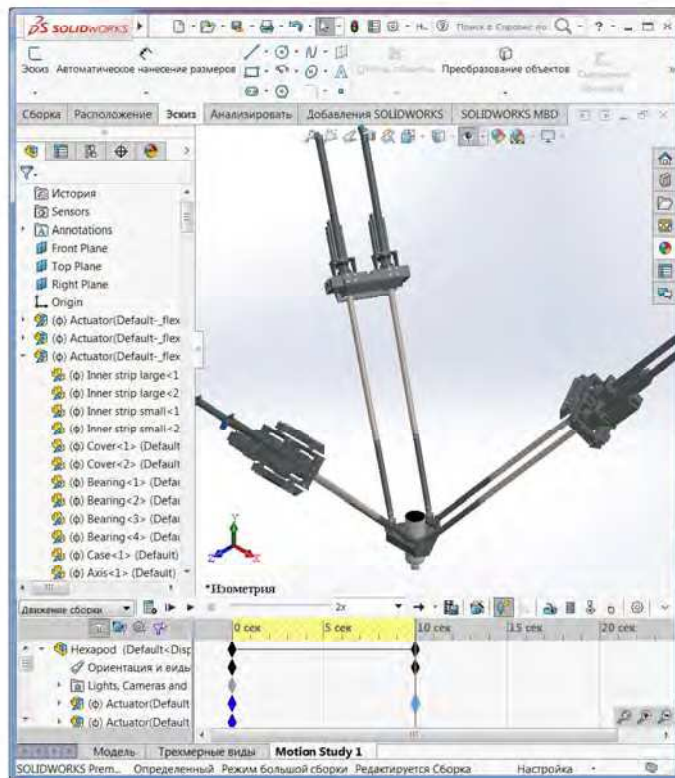


Рисунок 3.5 Збірка шести актуаторів в режимі Motion Study

Таким чином, з'єднавши в єдину збірку розроблені станину та просторовий механізм з шести актуаторів отримуємо модель механізму паралельної структури (платформи Стюарта) (рис. 3.6).

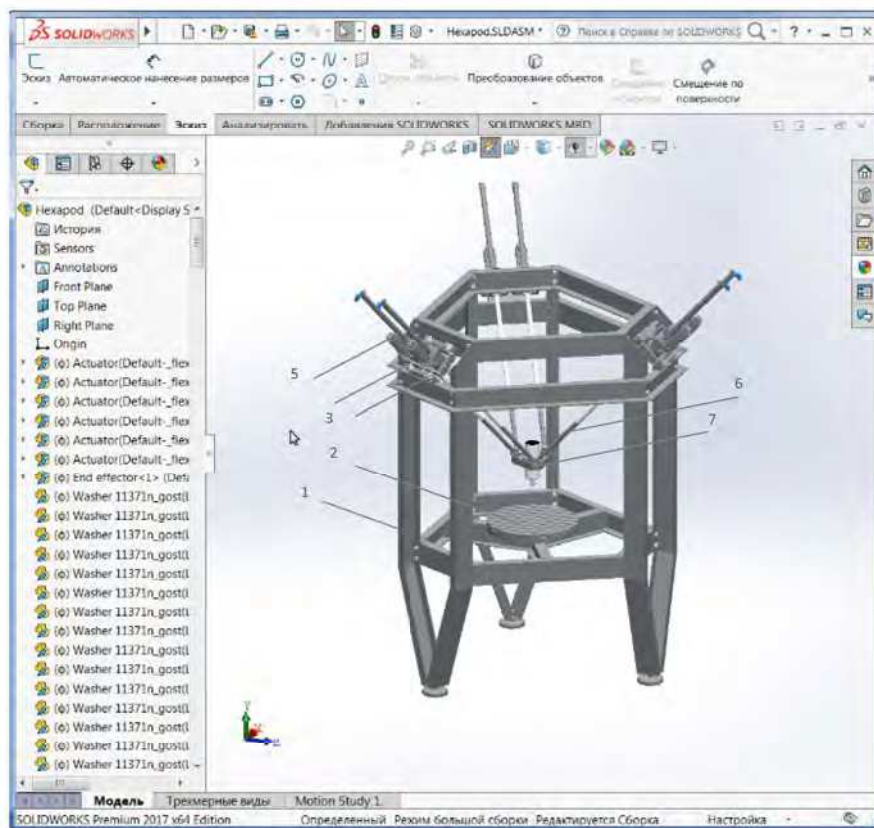


Рисунок 3.6 Повна модель механізму паралельної структури в середовищі SolidWorks

Механізм складається з просторової основи 1 із закріпленим столом 2. В шарнірних опорах 3 основи встановлені 6 карданних підвісів 4 з приводами 5. Приводи слугують для зміни довжини ланок 6, з'єднаних за допомогою карданних шарнірів з робочою поверхнею 7.

3.3 Трансляція CAD 3D-моделі SolidWorks до CAE-системи Matlab/SimMechanics

Пакет MATLAB розширює можливості САПР SolidWorks в частині динамічного моделювання 3D-моделей механізмів. Графічне середовище імітаційного моделювання Simulink дозволяє об'єднувати елементи різної фізичної природи. Пакет розширення Simulink SimMechanics дозволяє моделювати механізми, що складаються з безлічі твердих тіл і їх компонентів – спряжень, обмежувачів руху, керуючих елементів і датчиків руху. До складу пакету SimMechanics входить CAD-транслятор, що дозволяє генерувати моделі механічних систем з їх тривимірних моделей-збірок в SolidWorks. Після установки транслятор вбудовується до SolidWorks і дозволяє переносити механічні системи до Simulink. Транслятор SimMechanics Link перетворює геометрію збірок SolidWorks в моделі блок-схем Simulink. При цьому всі механічні параметри твердотільної моделі, що визначають її динаміку (маса, інерційні характеристики, координати центрів мас, параметри з'єднань тощо) передаються динамічній моделі. SimMechanics автоматично формує систему диференціальних рівнянь руху механізму (вона є внутрішнім об'єктом, прихованим від користувача). Це означає, що модель SolidWorks можна моделювати в середовищі Simulink для аналізу сил і моментів в механічних з'єднаннях, побудови графіків прискорень і зсувів кожної частини системи, візуалізації руху, беручи до уваги маси окремих вузлів.

Процес імпорту моделі SolidWorks до Matlab/SimMechanics складається з експорту 3D-моделі SolidWorks до 3d xml-файлу та stl-файлу, імпорту 3D xml-файлу та stl-файлу до середовища SimMechanics (рис.3.7) [19].

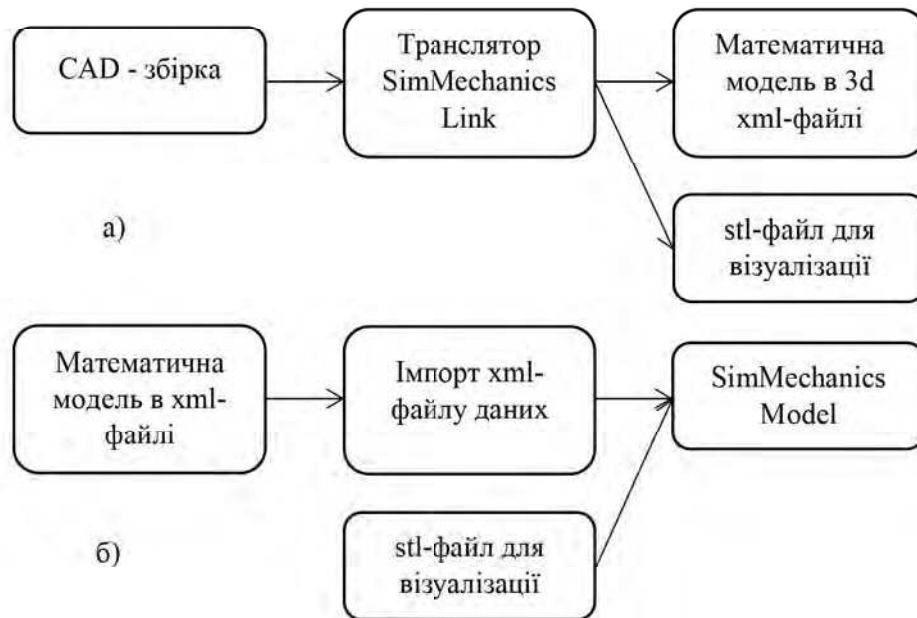


Рисунок 3.7 Процес експорту а) та імпорту б) моделі SolidWorks до Matlab/SimMechanics

3d xml-файл, це текстовий файл, в якому деталі вихідної збірки механізму інтерпретуються як тіла, а сполучення між ними як ступеня вільності. STL – файл, створювані у процесі трансляції, містять опис геометрії деталей.

Для збереження 3D-моделі в xml-файл даних у системі SolidWorks необхідно викликати пункт меню "Файл" > "Зберегти як" і вибрати розширення файлу *.3dxml.

Система MatLab на основі згенерованого 3d xml-файлу даних будує динамічну модель. Імпорт 3d xml-файлу в середу MatLab здійснюється командою `mech_import`. При імпорті 3d xml-файлу даних необхідно, щоб stl-файли знаходились у тій самій папці. Таким чином, на цьому етапі відбувається перетворення геометрії деталей та їх сполучень із 3D-моделей САПР SolidWorks у масоінерційні характеристики та ступеня свободи між тілами динамічної моделі Matlab.

Для трансляції обрана спрощена тривимірна модель механізму паралельної структури з гвинтовими приводами ланок змінної довжини та карданними опорами (рис.3.6).

У процесі трансляції можуть бути помилки. CAD-транслятор з будь-яких причин може не розпізнати з'єднання деталей і сприйняти його як жорстке з'єднання (Weld) – тоді разом із 3d xml-файлом створюється файл помилок. У

файлі помилок вказуються тіла та сполучення між ними, які транслятор не зміг правильно інтерпретувати.

Для виправлення помилок можна або замінити тип сполучення у вихідній збірці 3D-моделі, або замінити ступінь свободи між тілами динамічної моделі відповідно до завдання дослідження.

На жаль, транслятор SimMechanics Link не підтримує спряження SolidWorks „гвинт” та „шарнір”, у зв’язку з цим довелося допрацювати модель, замінивши кожне з спряжень „шарнір” на пару спряжень „концентричний” та „збіг”, а спряження „гвинт” замінивши на „концентричний” з подальшою заміною на гвинтове спряження в моделі після трансляції до SimMechanics.

Також, для дослідження механічної системи необхідно скористатися бібліотекою Simulink SimMechanics та додати наступні блоки:

1. *Joint Actuator* – блок передачі керуючого сигналу.

2. *Joint Sensor* – блок для вимірювання параметрів механічних ланок. Він приєднується до ланки, у вікні налаштування його параметрів встановлюються вимірювані величини (сила, момент, кут, кутова швидкість, кутове прискорення, лінійна позиція тощо).

Після доопрацювання моделі в SimMechanics для забезпечення можливості її зв’язку з об’єктами Simulink, результат імпорту моделі платформи Стюарта у середовищі SimMechanics представлений на рисунку 3.8. Отримана динамічна модель в MatLab/Simulink/SimMechanics містить масоінерційні характеристики деталей і ступені свободи між тілами, але не містить діючих сил, і всі необхідні сили необхідно моделювати в середовищі MatLab/Simulink самостійно відповідно до завдання дослідження.

Механічна частина платформи складається з нерухомої бази, рухомої платформи (*TopPlate*) та шести послідовних кінематичних ланцюгів (*Leg1*, *Leg2*, ..., *Leg6*), що з’єднують платформу та базу. Кожна послідовний ланцюг паралельного механізму, складається з двох тіл - шатуна і шарніра, з’єднаних карданним з’єднанням. Для імітації нерухомої бази системи, яка насправді представлена шістьма поворотними виконавчими двигунами, в структурно-динамічеськом описі використовуються елементи фіксації з нерухомою

основною. Кожен такий елемент жорстко з'єднаний із шарніром відповідного кінематичного ланцюга за допомогою поворотного з'єднання з двома ступенем вільності. Аналогічно з рухомою платформою, яка представлена одним однорідним елементом, за допомогою призматичного шарніра з'єднані шість шатунів (рис. 3.8) [19].

Для моделювання руху платформи використовується елемент *Joint Actuator*, що входить у модель кожного окремого послідовного кінематичного ланцюга *Leg1, Leg2, ..., Leg6* паралельного механізму (рис. 3.8), на вхід якого подається керуючий сигнал, що є функціональною залежністю зміни обертаючого моменту в часі. Для моделі платформи вхідними змінними будуть шість сил (*Force*), що розвиваються електроприводом штанг, в результаті дії яких рухома платформа механізму переходить у відповідне положення та орієнтацію, при цьому вихідними величинами будуть переміщення та швидкості переміщення штанг.

За допомогою блоку *Joint Sensor* вимірюється швидкість та положення штанги. Усі шість штанг впливають на рухома платформу – блок *Top Plate*. Таким чином, ми отримали модель паралельного маніпулятора, яка оформляється у вигляді окремої моделі SimMechanics.

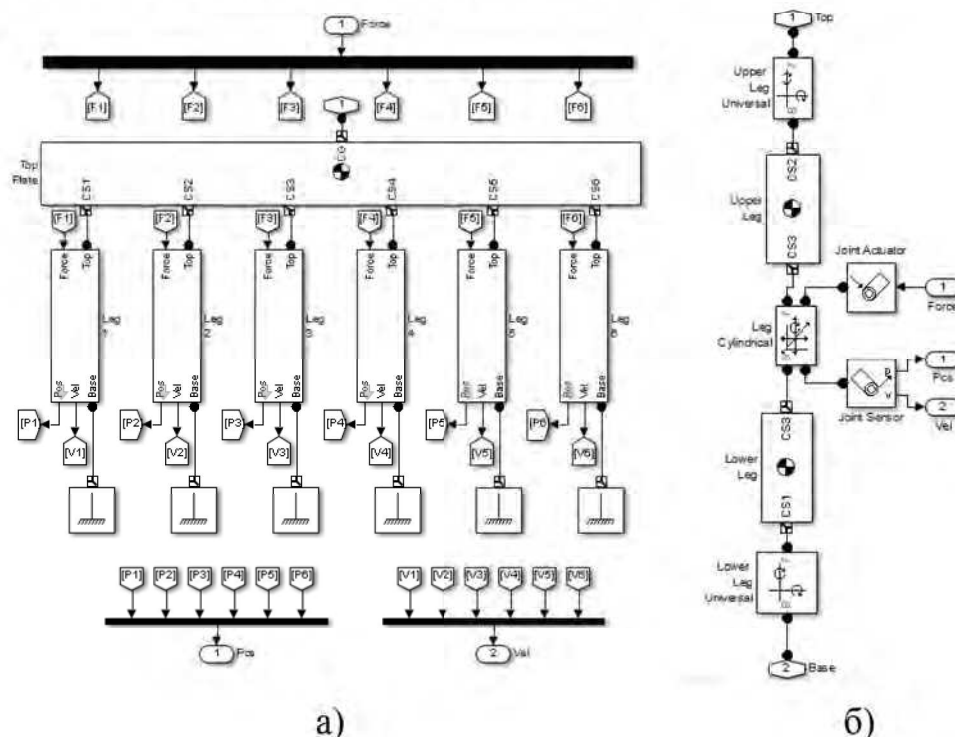


Рисунок 3.8 SimMechanics-модель платформи Стюарта а), підсистеми штанги б)

Для дослідження SimMechanics-моделі платформи Стюарта доповнюємо додатковими блоками за допомогою яких здійснюється динамічне моделювання.

Імітаційна модель платформи Стюарта у комплексі візуального моделювання MATLAB/Simulink складається з наступних блоків: пристроєм узгодження сигналів керування (*Leg Trajectory*); дискретно-позиційної системи керування (H_{inf}); механічної системи платформи Стюарта (*Plant*), з якої знімаються дані про положення (*position*) та швидкість (*velocity*) зміни довжин штанг, а також блоку підрахунку та демонстрації результатів моделювання Scope (рис. 3.9). При натисканні на блок «*Body Position Sensor*» з'являється вікно для вибору параметрів перегляду: візуалізація рухів платформи Стюарта, зміна координат центру рухомої платформи та кутів орієнтації, переміщення штанг, швидкостей переміщень, прискорень, помилок обчислення і тощо. Зміна вибраних параметрів виконується у функції часу. Для перегляду результатів обчислень та демонстрації результатів моделювання на екрані дисплея слід натиснути на відповідну кнопку блоку «*Scope*» (рис. 3.9) [19].

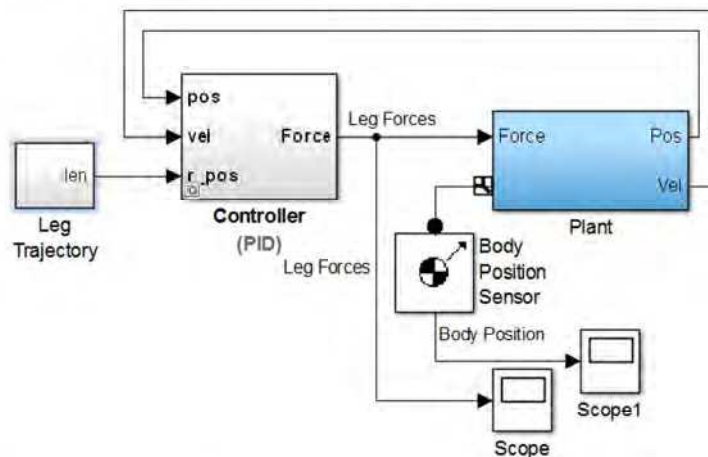


Рисунок 3.9 Simulink-модель платформи Стюарта з системою керування

Це модель, так звана з «прямої динамікою», в якій сили є вхідними сигналами для системи, що моделює зусилля виконавчого механізму, а положення та швидкість виконавчих механізмів та рух платформи є вихідними сигналами. Ця модель використовується при реалізації системи керування, оскільки положення та швидкості виконавчих механізмів будуть сигналами зворотного зв'язку, а керуючими сигналами будуть зусилля на виконавчих механізмів. При моделюванні отримане необхідне значення довжини штанги

порівнюється з поточним і подається на систему керування, де вираховуються корегувальні значення довжини штанг та подається на приводи.

У блоці «*Leg Trajectory*» на вхід подається завдання, одержуване у вигляді координат та кутів центру рухомої платформи, ξ_{pos} , η_{pos} , ζ_{pos} , ψ_{ang} , ϑ_{ang} , γ_{ang} . Де ξ_{pos} , η_{pos} , ζ_{pos} , поступальні переміщення вздовж осей Θ , H , Z , ψ_{ang} , ϑ_{ang} , γ_{ang} кути поворотів щодо цих осей (кути Ейлера). В даному випадку приймаємо $\psi_{ang} = 0^\circ$, $\vartheta_{ang} = 0^\circ$, $\gamma_{ang} = 0^\circ$. Далі, проводиться перерахунок завдання, одержуваного у вигляді координат та кутів центру рухомої платформи штанг платформи Стюарта l_1 , l_2 , l_3 , l_4 , l_5 , l_6 . Схема процесу представлена на рисунку 3.10. При цьому кути повороту платформи перераховуються на переміщення за допомогою формул Ейлера.

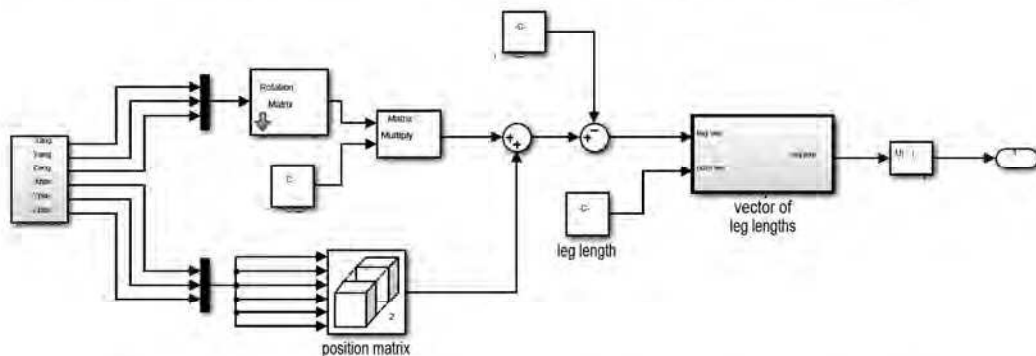


Рисунок 3.10 Схема перерахунку координат та кутів центру рухомої платформи у зміну довжин штанг платформи Стюарта

У блоці «*Leg Trajectory*» у під блоці «*Desired*» (рис. 3.11) сформовано траєкторію руху платформи у вигляді функцій координат центру мас рухомої платформи (x_{pos} , y_{pos} , z_{pos}) та кутів повороту (кутів Ейлера-Крилова φ_{ang} , ψ_{ang} , χ_{ang}), значення яких зчитуються за допомогою двох послідовних блоків «*To File*» та «*From File*» бібліотек «*Sinks*» та «*Sources*».

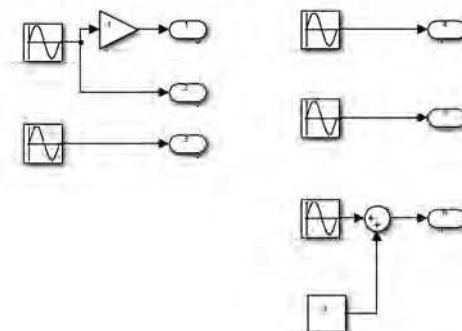


Рисунок 3.11 Блок «*Desired*»

Програмним комплексом передбачено можливість створення траєкторії платформи шляхом побудови схеми послідовності математичних блоків Simulink без використання зовнішніх функцій. За допомогою матриць перетворення координат (у блоках «*Matrix Multiply*» та «*Create desired position matrix*», рис. 3.10) формуються координати центрів сферичних шарнірів рухомої платформи і далі в блоці «*Compute vector of leg lengths*» визначаються довжини штанг платформи Стюарта (рис. 3.9).

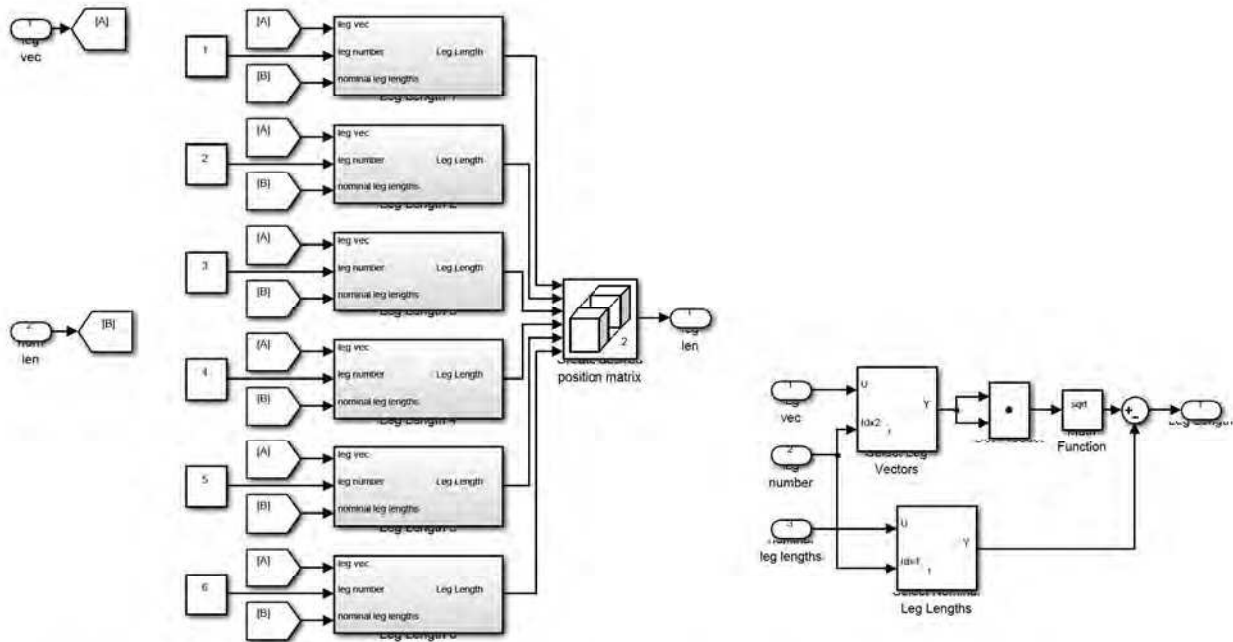


Рисунок 3.12 Схема перетворення лінійних переміщень у зміни довжин штанг

Отримані за допомогою формул Ейлера переміщення потім складаються з матрицею переміщень «*Create desired position matrix*», а отримані лінійні переміщення центру мас рухомої платформи перетворюються на зміни довжин штанг в блоці «*leg lengths*» (рис. 3.12).

Довжини штанг $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ у вигляді напруги подаються на двигуни і на виході отримуємо наступні змінені значення довжин штанг $l'_1, l'_2, l'_3, l'_4, l'_5, l'_6$. При моделюванні отримане необхідне значення довжини штанги порівнюється з поточним і подається на систему керування, яка виробляє значення сили, що подається на штанги. Далі, змінені значення довжин штанг $l'_1, l'_2, l'_3, l'_4, l'_5, l'_6$ перераховуються у значення координат та кутів центру рухомої платформи $\varphi'_{ang}, \psi'_{ang}, \chi'_{ang}$. При цьому виникають помилки позиціонування між заданими координатами та кутами центру рухомої

платформи, які отриманими під час моделювання.

3.4 Визначення робочого простору механізму з паралельної структурою

Особливості формування робочого простору механізму з паралельної структури [23]:

- неправильна геометрична форма;
- залежність від розміщення центру мас відносно шарнірних опор робочої поверхні;
- залежність від просторової орієнтації робочої поверхні.

Фактори, що обмежують робочий простір:

- геометрія механізму паралельної структури;
- передача сил та швидкостей;
- особливі положення;
- жорсткість.

Види робочого простору:

- з постійною орієнтацією (руховий простір) – усі можливі положення центру мас із заданою орієнтацією робочої поверхні;
- орієнтувальний – усі орієнтації робочої поверхні при заданому положенні центру мас;
- максимальний робочий простір – усі положення центру мас, які можуть бути досягнуті хоча б при одній орієнтації робочої поверхні;
- включний орієнтаційний – усі положення центру ма, які можуть бути досягнуті хоча б з одною орієнтацією серед набору, заданого діапазонами кутів орієнтації;
- сукупний орієнтаційний – усі положення центру мас, які можуть бути досягнуті з усіма орієнтаціями серед набору, заданого діапазонами кутів орієнтації;
- спритний – усі положення центру інструмента, для яких можлива будь-яка орієнтація робочої поверхні;
- скорочений сукупний орієнтаційний – усі положення центру інструмента, які можуть бути досягнуті з кутами орієнтації, що лежать

у певних межах, при довільних значеннях інших.

Далі потрібно побудувати алгоритм, щоб були задоволені два критерію: об'єм робочого простору та загальне число конфігурацій при можливих орієнтаціях робочої поверхні.

Формування робочого простору здійснюється чисельними методами за спеціальним алгоритмом (рис. 3.13). Сутність алгоритму полягає у скануванні межі замкнутого простору, що й утворює робочий простір з урахуванням обмежень кінематичної структури. Кожен окремий блок алгоритму є сукупністю безлічі елементарних математичних обчислень.

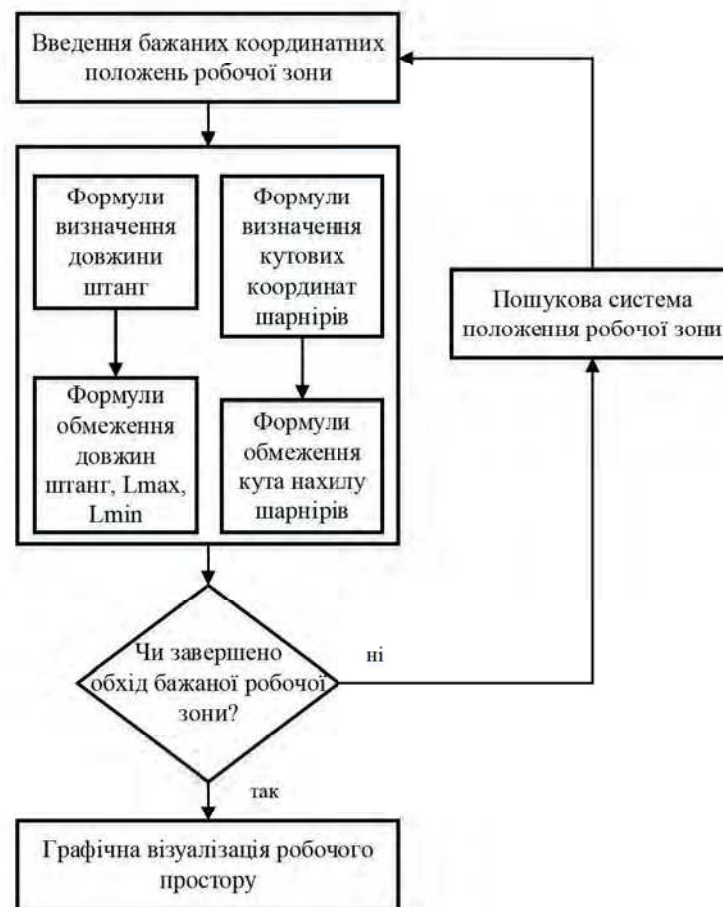


Рисунок 3.13 Блок-схема алгоритму побудови робочої зони механізму з паралельної структурою

Для попередньої оцінки робочої області пропонується будувати її перерізи трьома ортогональними площинами (ZOX , ZOY та YOX), що проходять через точку центру платформи у вихідному положенні механізму. Цей метод дозволяє з малими обчислювальними витратами оцінити робочу сферу проектованого механізму з урахуванням обмежень мінімальної та максимальної величин переміщення приводів штанг; відсутності взаємних

перетинів ланок механізму, тобто. механізм не повинен потрапляти до особливих положень. Алгоритм обчислень представлений на рисунку 3.14.

За відповідними алгоритмами була побудована програма розрахунку робочого простору (додаток Б). Вихідними даними є межі інтервалів перевірки робочого простору по осям координат, максимальні і мінімальні довжини штанг, кути просторової орієнтації робочого органу механізму.

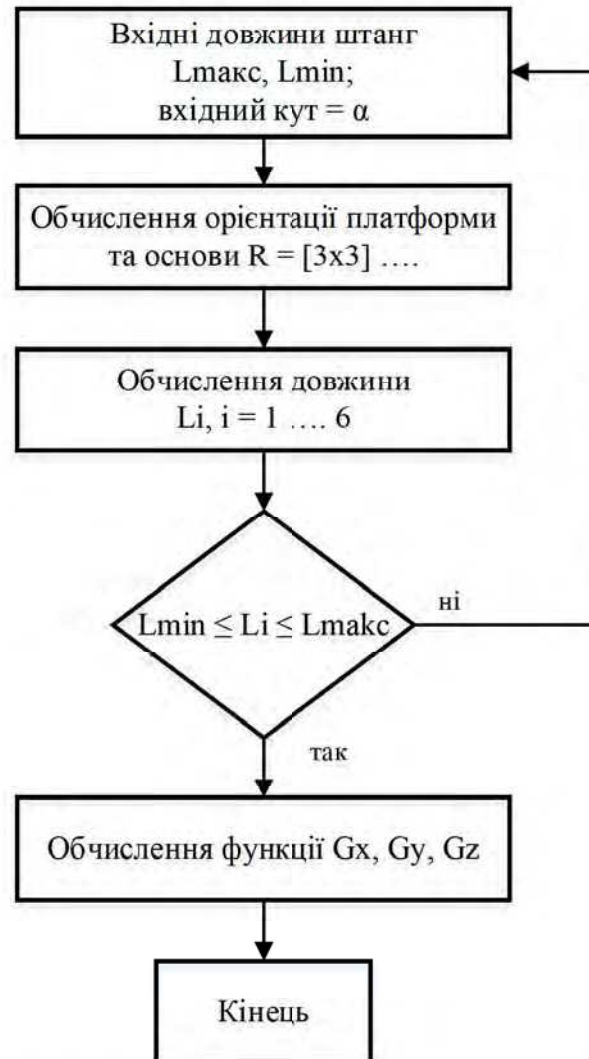


Рисунок 3.14 Блок-схема обчислювального алгоритму

Побудований відповідно з геометричними параметрами механізму паралельної структури тривимірний графік робочого простору механізму показаний на рисунку 3.15.

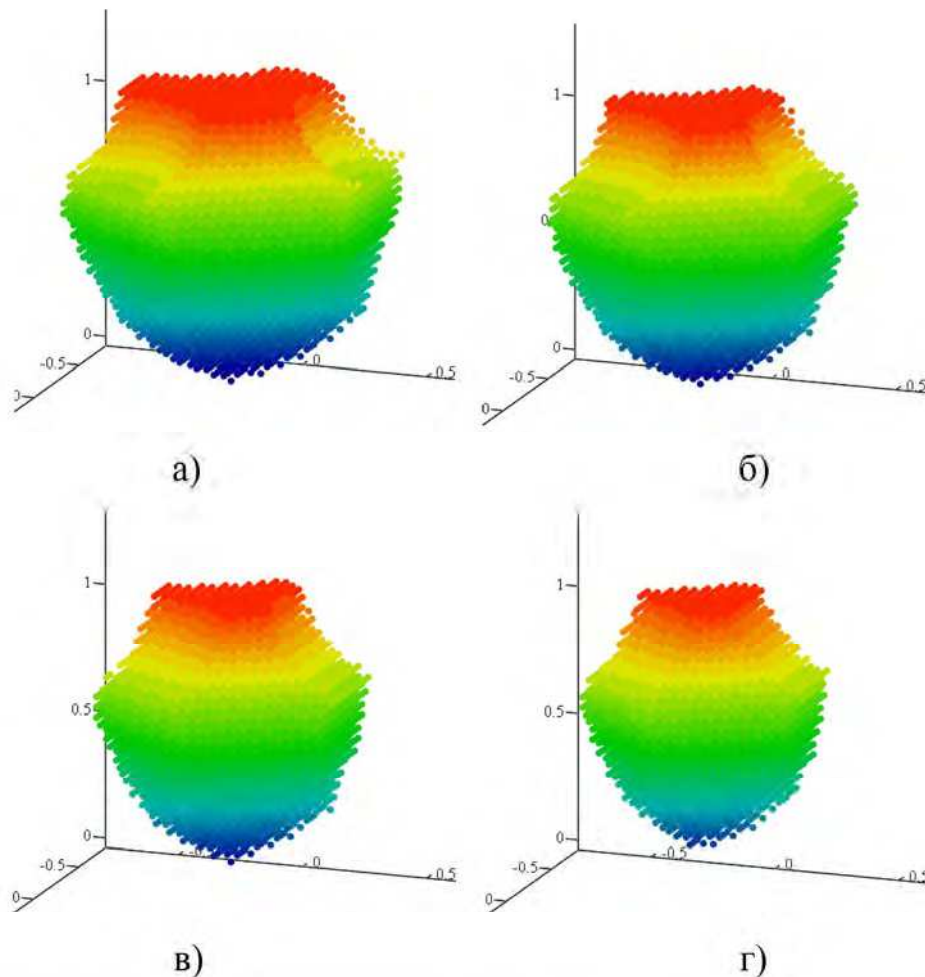


Рисунок 3.15 Робочий простір механізму з паралельної структурою при відхиленні робочого органу від осі на: а) 0° ; б) $\pm 15^\circ$; в) $\pm 30^\circ$; г) $\pm 45^\circ$

3.5 Моделювання механізму з паралельної структурою

Генерується синусоїдальне бажане обертання навколо осей x , y і z та бажана траєкторія по осях x , y і z . Як початковий випадок, платформа з паралельною структурою не піддається жодним збуренням. Верхня платформа рухається за синусоїдальною траєкторією. Точніше, бажана траєкторія центра мас верхньої платформи має вигляд:

$$\begin{aligned} x &= 5 \sin 3t \text{ см} & \theta_x &= -0,3 \sin 3t \text{ рад;} \\ y &= 7,5 \sin 3t \text{ см} & \theta_y &= 0,3 \sin 3t \text{ рад;} \\ z &= 35,75 + 5 \sin 3t \text{ см} & \theta_z &= 0,3 \sin 3t \text{ рад.} \end{aligned}$$

Приклад налаштування блоку «*Sine Wave4*» поступового руху платформи та «*Sine Wave1*» кутового руху платформи (рис. 3.11) зображено на рисунку 3.16.

Початкова висота верхньої платформи становить 35,75 см. Термін

моделювання встановлюється 5 с. Моделювання запускається в середовищі MatLab/Simulink/ командою Run в закладці Simulation Для перегляду результатів обчислень та демонстрації результатів моделювання на екрані дисплея використовуємо блок «Scope». Положення верхньої платформи на осях x, y та z під час руху по бажаній траєкторії показано на рисунку 3.17.

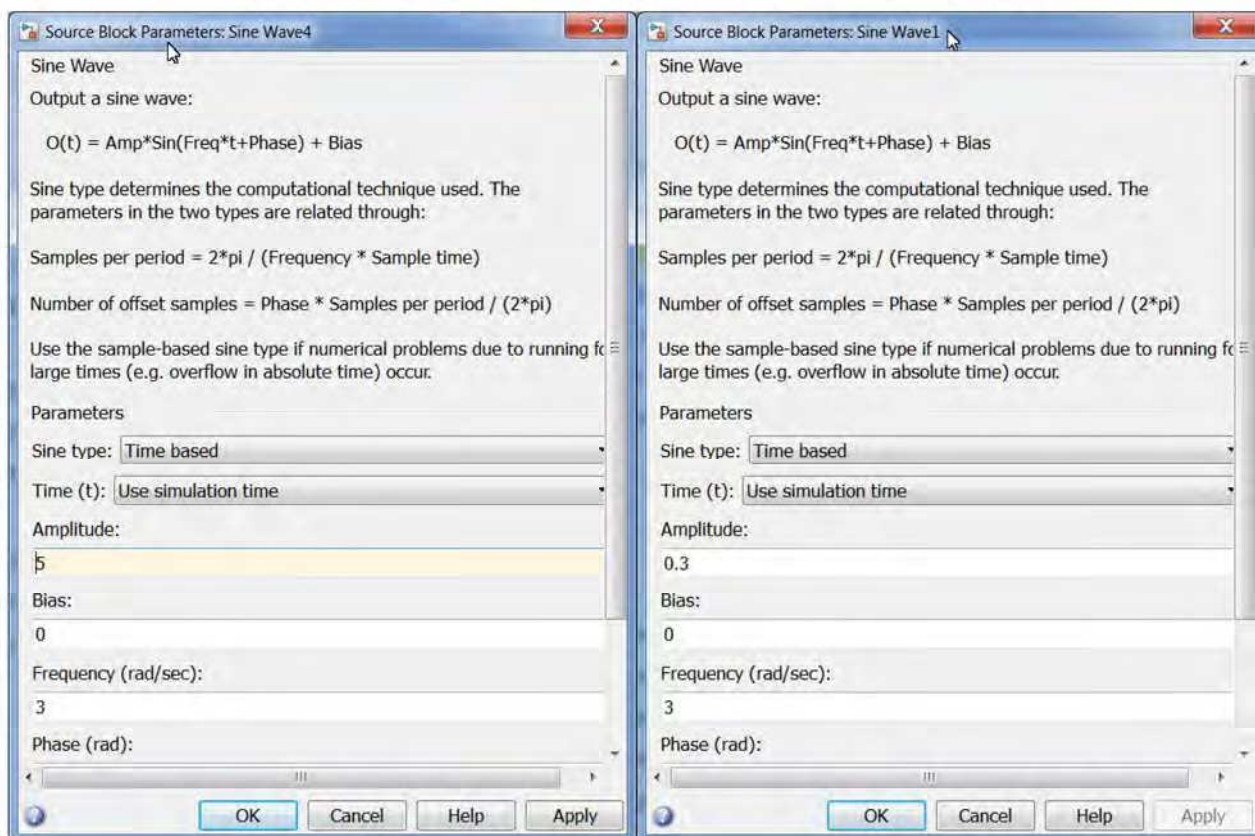


Рисунок 3.16 Налаштування блоку «Sine Wave»

Похибки положення по осях x, y та z наведено на рисунку 3.18. Сила, яку повинен прикласти кожен привід, щоб слідувати заданій траєкторії, показана на рисунку 3.19.

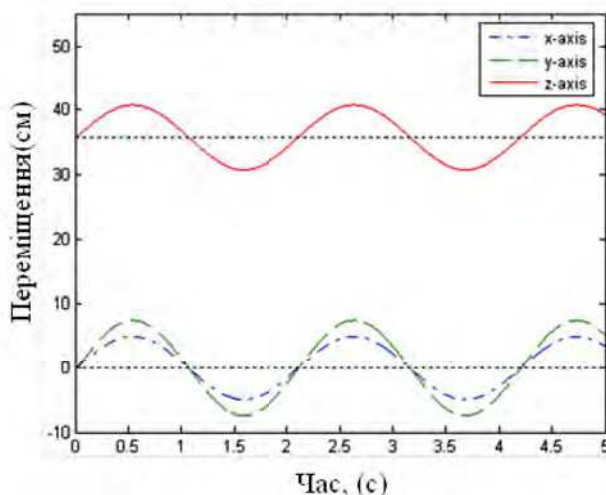


Рисунок 3.17. Положення центру маси верхньої платформи

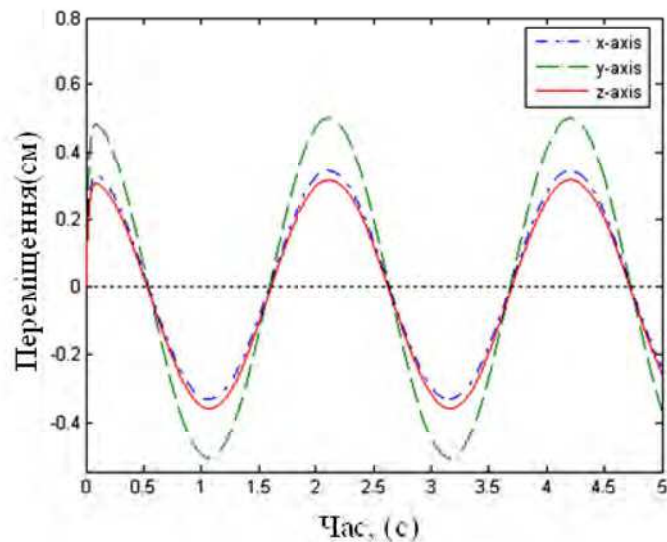


Рисунок 3.18. Похибки положення по всіх трьох осях

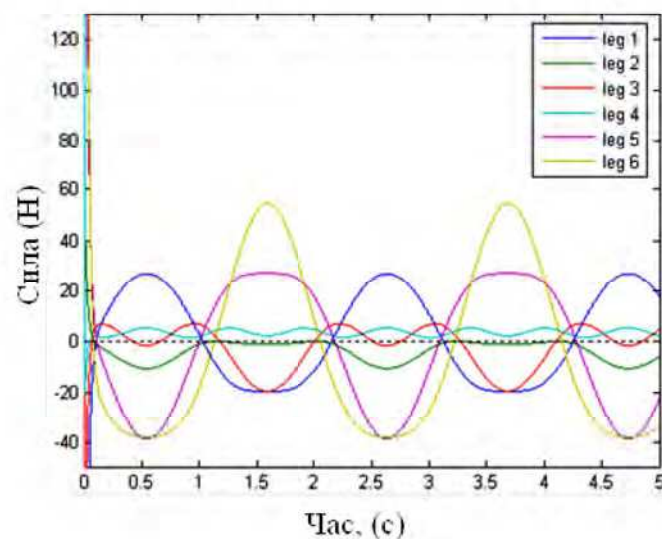


Рисунок 3.19 Сила, що прикладається до приводів

3.5.1 Позиціонування з лінійним збуренням по осі z

Лінійне синусоїдальне збурення вздовж осі z прикладається до центра мас базової платформи, у той час як центр мас верхньої платформи рухається за синусоїдальною траєкторією вздовж осі z. Вхідна збурювальна сила задається:

$$F_{in} = 30\sin(11,43 t + \pi/2), \text{ Н.}$$

Частоту цієї сили вибрано рівною резонансній частоті. Початкова висота верхньої платформи становить 35,75 см, а бажана траєкторія задається:

$$z = 35,75 + 5\sin 3t, \text{ см.}$$

На рисунку 3.7 порівнюється положення центра мас верхньої платформи напівактивного механізму з двоступінчастими штангами для трьох випадків:

- платформа не піддається жодним збуренням;

- платформа піддається описаному вище синусоїдальному збуренню вздовж осі z ;
- платформа піддається описаному вище синусоїдальному збуренню вздовж осі z , і використовується система контролю.

З рисунка 3.20 видно, що система керування усуває коливання траєкторії, спричинені збуренням, але амплітуда фактичного руху залишається меншою, ніж амплітуда бажаного руху. Це також можна побачити на рисунку 3.21, який показує порівняння похибок положення по осі z для трьох випадків.

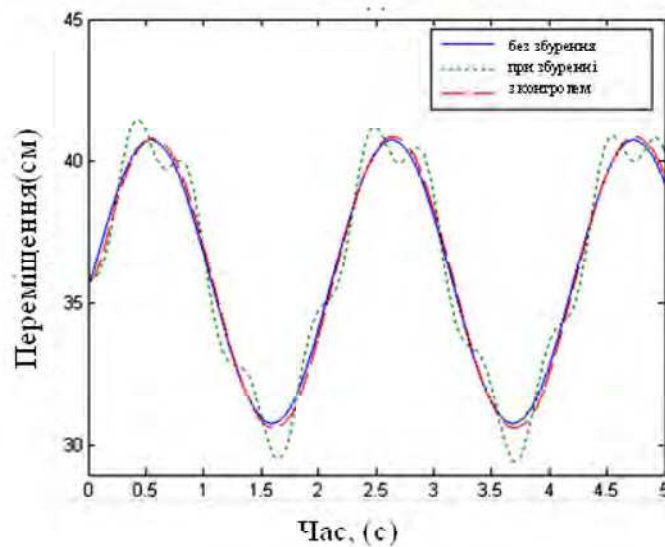


Рисунок 3.20 Положення центра мас верхньої платформи вздовж осі z з контролем і без нього при синусоїдальному збуренні вздовж осі z , а також без збурення.

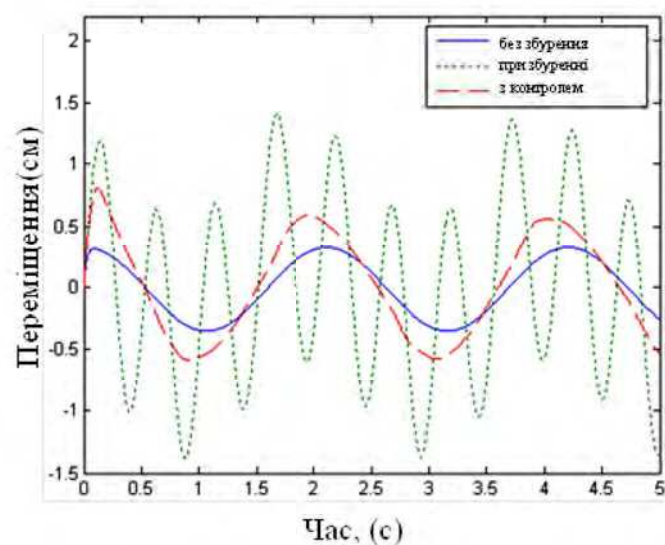


Рисунок 3.21 Похибка положення центра мас верхньої платформи вздовж осі z з контролем і без нього при синусоїдальному збуренні вздовж осі z , а також без

збурення.

Окрім усунення коливань у русі, система контролю також істотно зменшує величину сили, яку мають прикладати приводи для відстеження бажаної траєкторії, що видно на рисунку 3.22.

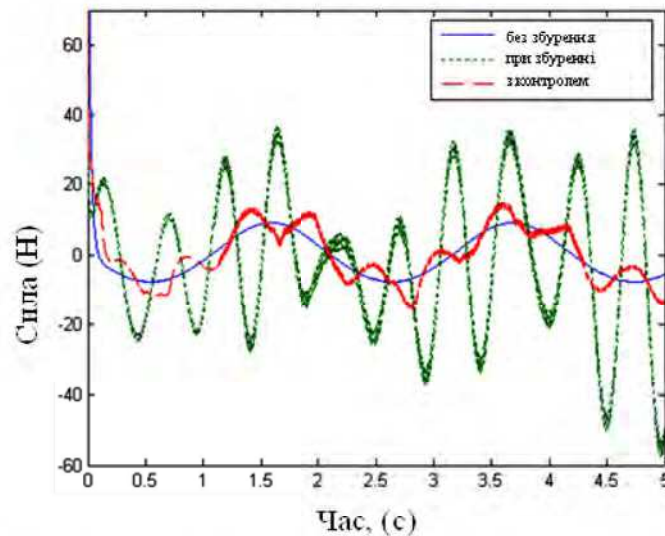


Рисунок 3.22 Сила, прикладена одним приводом, з контролем і без нього при синусоїдальному збуренні вздовж осі z, а також без збурення.

3.5.2 Позиціонування за наявності лінійного збурення вздовж осі Y

Лінійне синусоїдальне збурення вздовж осі y прикладається до центра мас базової платформи, тоді як центр мас верхньої платформи рухається за синусоїдальною траєкторією вздовж осі y. Вхідна збурювальна сила задається:

$$F_{in} = 30\sin(7,91 t + \pi/2), \text{ Н.}$$

Частоту цієї сили вибрано рівною резонансній частоті. Оскільки механізм платформи є симетричним відносно осей x та y, результати цього розділу також відповідають випадку, коли позиціонування вздовж осі x виконується за наявності збурення вздовж осі x.

Бажана траєкторія вздовж осі y має вигляд:

$$y = 5\sin 3t \text{ см.}$$

На рисунку 3.23 наведено порівняння положення центра мас верхньої платформи механізму з двоступінчастими штангами для трьох випадків.

Окрім усунення коливань у русі, як показано на рисунках 3.23 і 3.24, система контролю також істотно зменшує величину сили, яку прикладають приводи для відстеження бажаної траєкторії, що видно на рисунку 3.25.

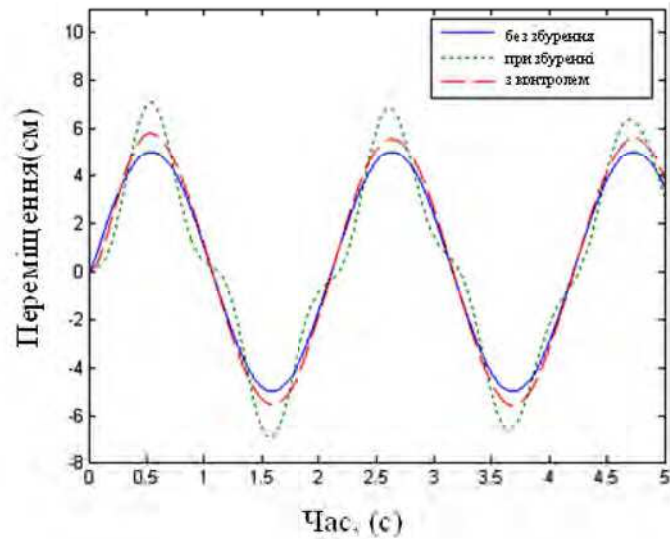


Рисунок 3.23 Положення центра мас верхньої платформи вздовж осі у з контролем і без нього при синусоїдальному збуренні вздовж осі у, а також без збурення.

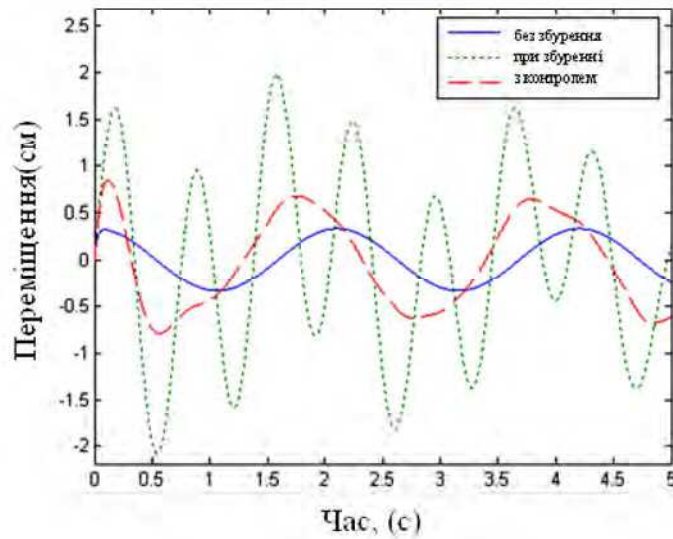


Рисунок 3.24 Похибка положення центра мас верхньої платформи вздовж осі у з контролем і без нього при синусоїдальному збуренні вздовж осі у, а також без збурення.

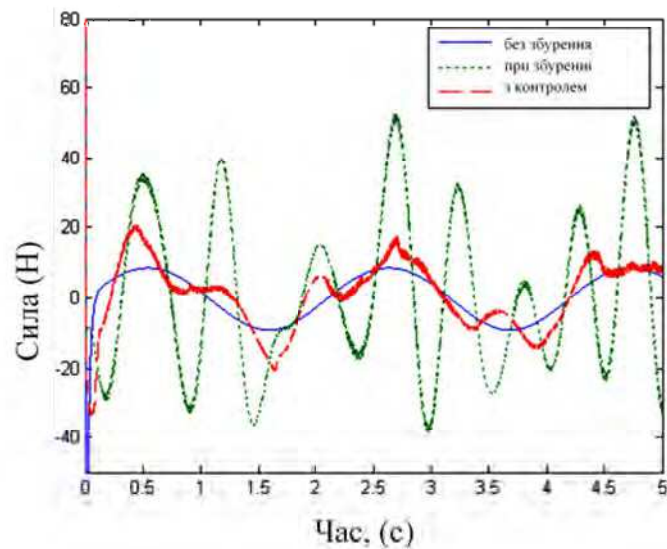


Рисунок 3.25 Сила, прикладена одним приводом, з контролем і без нього при синусоїдальному збуренні вздовж осі у, а також без збурення.

3.5.3 Позиціонування за наявності кутового збурення навколо осі Z

Кутове синусоїдальне збурення навколо осі z прикладається до центра мас базової платформи, тоді як центр мас верхньої платформи рухається за синусоїдальною траєкторією навколо осі z . Вхідний збурювальний момент задається як

$$\tau_{in} = 10\sin(12,56t + \pi/2), \text{ Нм.}$$

Частоту цього моменту вибрано рівною резонансній частоті. Бажана траєкторія навколо осі z задається як:

$$\theta_z = 5\sin 3t, \text{ рад.}$$

На рисунку 3.26 наведено порівняння положення центра мас верхньої платформи механізму з двоступінчастими штангами для трьох випадків. Окрім усунення коливань у русі, як показано на рисунках 3.26 і 3.27, система контролю також значно зменшує величину сили, яку прикладають приводи для відстеження бажаної траєкторії, що видно на рисунку 3.28.

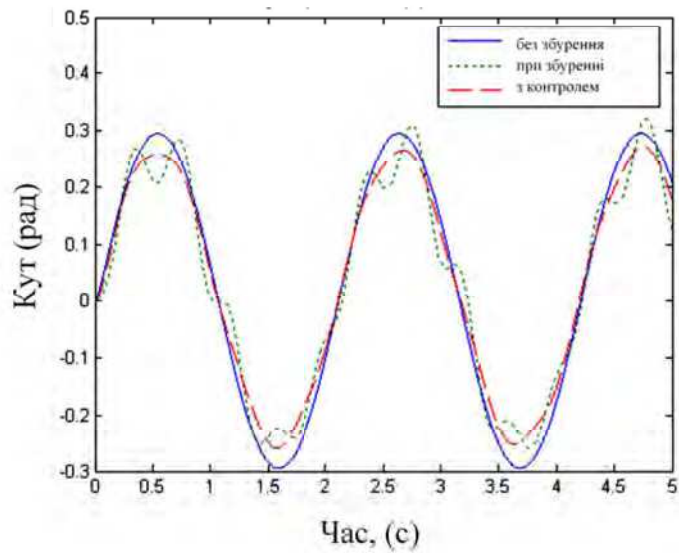


Рисунок 3.26 Положення центра мас верхньої платформи навколо осі z з контролем і без нього при синусоїдальному кутовому збуренні навколо осі z , а також без збурення.

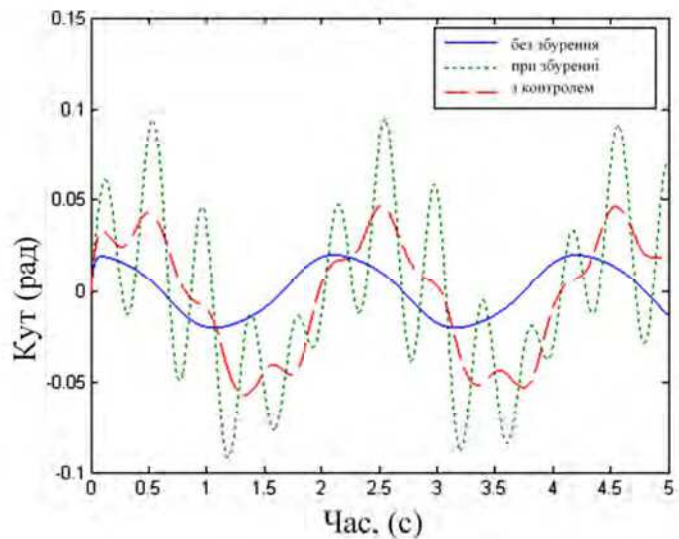


Рисунок 3.27 Похибка положення центра мас верхньої платформи навколо осі z з контролем і без нього при синусоїдальному кутовому збуренні навколо осі z , а також без збурення.

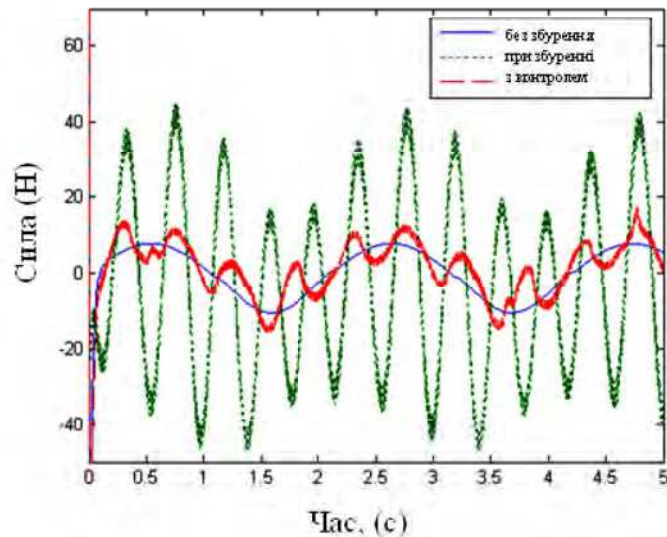


Рисунок 3.28 Сила, прикладена одним приводом, з контролем і без нього при синусоїдальному кутовому збуренні навколо осі z, а також без збурення.

3.5.4 Позиціонування за наявності кутового збурення навколо осі Y

Кутове синусоїдальне збурення навколо осі y прикладається до центра мас базової платформи, тоді як центр мас верхньої платформи рухається за синусоїдальною траєкторією навколо осі y. Вхідний збурювальний момент задається як

$$\tau_{in} = 10\sin(12,56t + \pi/2), \text{ Нм.}$$

Частота цього моменту вибрана рівною резонансній частоті. Оскільки механізм платформи є симетричним відносно осей x і y, результати цього розділу також стосуються випадку, коли позиціонування виконується вздовж осі x за наявності кутового збурення навколо осі x.

Бажана траєкторія навколо осі y задається рівнянням:

$$\theta_y = 5\sin 3t, \text{ рад.}$$

На рисунку 3.29 наведено порівняння положення центра мас верхньої платформи механізму з двоступінчастими штангами для трьох випадків. Окрім усунення коливань у русі, як показано на рисунках 3.29 і 3.30, система контролю також істотно зменшує величину сили, яку прикладають приводи для відстеження бажаної траєкторії, що видно на рисунку 3.31.

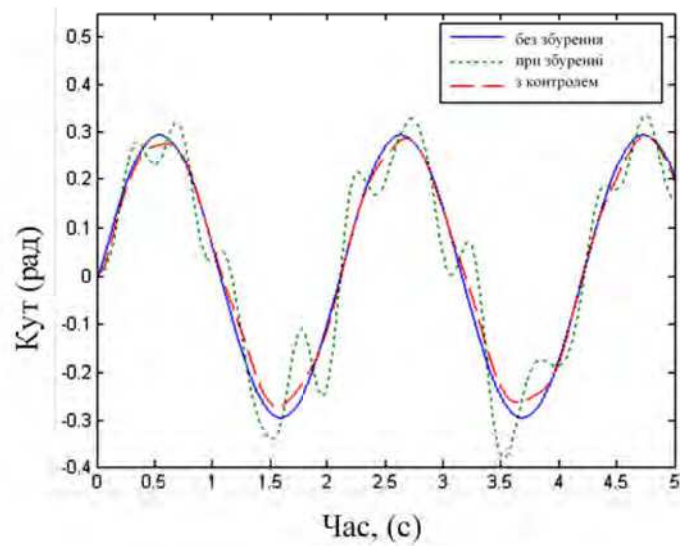


Рисунок 3.29 Положення центра мас верхньої платформи навколо осі y з контролем і без нього при синусоїдальному кутовому збуренні навколо осі y , а також без збурення.

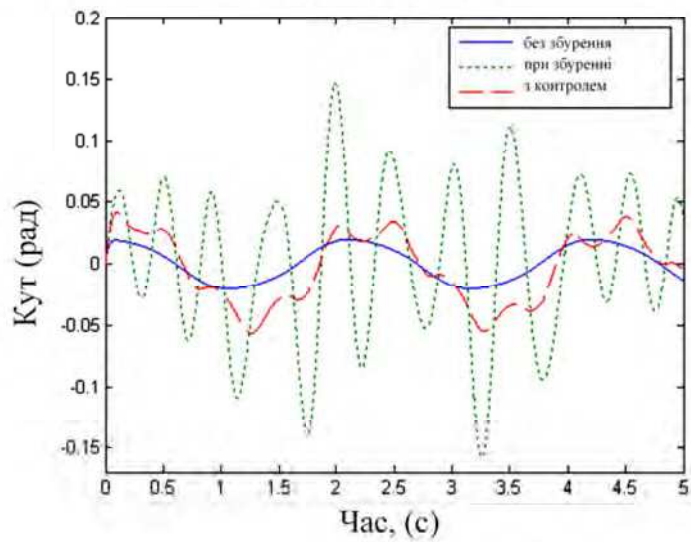


Рисунок 3.30 Похибка положення центра мас верхньої платформи навколо осі y з контролем і без нього при синусоїдальному кутовому збуренні навколо осі y , а також без збурення.

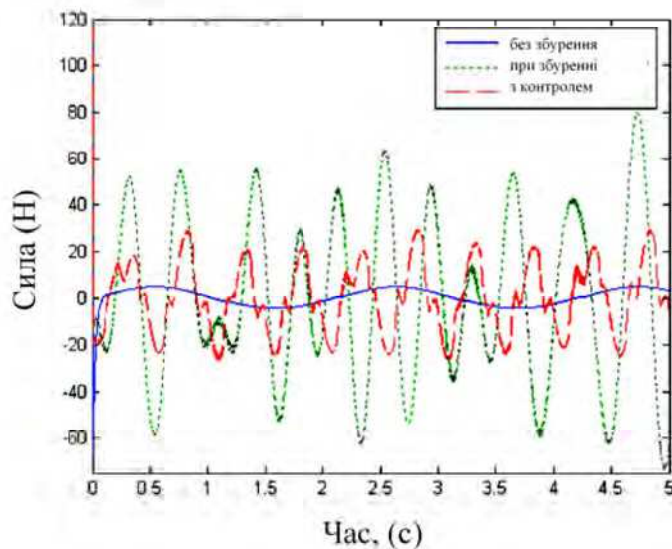


Рисунок 3.31 Сила, прикладена одним приводом, з контролем і без нього при синусоїдальному кутовому збуренні навколо осі y , а також без збурення.

Усі попередньо описані моделювання стосувалися збурення, прикладеного вздовж осі z , і передавальні коефіцієнти прискорення верхньої та базової платформ обчислювалися також уздовж осі z . Продуктивність платформи з паралельною структурою та двоступінчастими з'єднаннями була оцінена й для інших ступенів вільності.

Оскільки механізм платформи є симетричним відносно осей x та y , для цих двох осей були отримані аналогічні, очікувані результати. Було встановлено, що збільшення демпфування у штангах не покращує контролем вздовж осей x та y , коли лінійне збурення прикладається до базової платформи в цих напрямках. Невелике додаткове зменшення передавання вібрацій спостерігалось на резонансній частоті навколо осі z , коли кутовий момент навколо цієї осі прикладався до базової платформи. Найкраще контроль працював навколо осей x та y , коли до базової платформи прикладалися відповідно моменти навколо цих осей.

При моделюванні руху верхньої платформи здійснювалося за кутовою траєкторією навколо осей x , y та z відповідно, коли кутове збурення прикладалося до базової платформи навколо тих самих осей. Система контролю усувала невеликі коливання у позиціонуванні, викликані синусоїдальним збуренням, і забезпечувала точніше відстеження бажаної траєкторії порівняно з випадком, коли контроль був вимкнений. За відсутності контролю активний

привід намагався протидіяти збуренням під час руху за бажаною траєкторією, що призводило до збільшення прикладених сил. Система контролю зменшувала величину сили, яку мав прикладати кожен привід.

Висновок до розділу 3

У третьому розділі виконано повний цикл побудови та дослідження механізму з паралельною структурою на базі платформи Стюарта. На основі геометричних параметрів реального дослідного зразка сформовано твердотільну 3D-модель у середовищі SolidWorks, у якій детально відтворено станину, карданні опори та актуатори з гвинтовими приводами. Побудована модель була адаптована для коректної трансляції до Matlab/Simulink/SimMechanics із урахуванням особливостей CAD-транслятора та необхідністю відновлення реальних ступенів свободи між тілами.

У SimMechanics сформовано динамічну модель механізму, яка містить масоінерційні характеристики всіх компонентів і дозволяє виконувати моделювання руху під дією керуючих сил. Реалізовано систему керування з перетворенням бажаних лінійних і кутових переміщень у зміни довжин штанг за допомогою кінематичних співвідношень.

Проведено розрахунок та візуалізацію робочого простору механізму з урахуванням геометричних, кінематичних та конструктивних обмежень. Показано, що зміна кутів орієнтації рухомої платформи суттєво впливає на форму й об'єм доступної робочої зони.

У ході динамічного моделювання досліджено поведінку платформи за відсутності та за наявності лінійних і кутових збурень. Найбільший позитивний ефект спостерігається при кутових збуреннях навколо осей X та Y, що підтверджує працездатність та адекватність побудованої моделі.

Таким чином, у розділі створено повну геометричну та динамічну модель платформи Стюарта, проведено її випробування у різних режимах і доведено можливість застосування моделі для подальших досліджень оптимізації параметрів механізму.

4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ

4.1 Вступ

Сучасні мехатронні системи та механізми з паралельною структурою, зокрема платформа Стюарта, широко застосовуються у робототехніці, авіаційній та морській галузях, медицині, системах стабілізації та високоточному позиціонуванні. Для забезпечення високої точності роботи таких систем необхідним є створення імітаційних моделей, що дозволяють досліджувати їхні динамічні властивості, силових взаємодій та інші.

Розробка імітаційної моделі платформи Стюарта дає змогу зменшити витрати на виготовлення фізичних макетів, прискорити етап проєктування та забезпечити високу точність аналізу руху й силових взаємодій у кінематичних ланках.

Завдяки використанню CAD-технологій (SolidWorks Motion) і засобів динамічного моделювання (MATLAB/Simulink, Simscape Multibody) економія проявляється у таких аспектах:

- скорочення часу проєктування;
- зменшення вартості експериментів;
- зниження кількості конструкторських помилок;
- підвищення ефективності системного аналізу.

4.2 Розрахунок витрат на створення та експлуатацію імітаційної моделі

Витрати складаються з:

1. Заробітної плати розробника.

Розробка програмного забезпечення для моделювання та управління мехатронною системою потребує значних інвестицій у програмістів та інженерів. Припустимо, що над створенням моделі працює один інженер-розробник мехатронних систем з місячним окладом:

- основна зарплата — 15 000 грн;
- додаткова зарплата (20%) — 3 000 грн.

Таким чином, разом місячні витрати:

$$C_{\text{зп}} = 18\,000 \text{ грн.}$$

Тривалість розробки імітаційної моделі — 1 місяць.

2. Амортизації комп'ютерної техніки.

Для створення і тестування системи буде використано сучасне технічне обладнання, включаючи комп'ютери та спеціалізовані контролери. Наприклад, для САД- та динамічного моделювання використовується робоча станція:

- вартість комп'ютера (Core i7/16 ГБ/GPU 4 ГБ) — 24 000 грн;
- строк амортизації — 3 роки;

Таким чином, місячна амортизація:

$$C_{\text{ам}} = 24000/36 = 666.7 \text{ грн/міс.}$$

3. Витрат на експлуатацію ЕОМ.

Під час розробки система працює у середньому по 6 год/день.

Споживання ПК — 0.35 кВт, тариф — 4.32 грн/кВт·год. Таким чином, місячні витрати:

$$C_{\text{ел}} = 0.35 \times 4.32 \times 6 \times 22 = 199.6 \text{ грн} \approx 200 \text{ грн/міс.}$$

4. Витрат на програмне забезпечення.

При розробці моделі використовується наступне програмне забезпечення:

- MATLAB/Simulink/Simscape — орієнтовно 2000 грн (за період);
- SolidWorks + Motion — орієнтовно 1000 грн (за період).

Таким чином, орієнтовні витрати за період розробки $C_{\text{пз}} = 3000$ грн (пропорційно вартості річної ліцензії).

5. Інші витрати.

Включають витрати на технічну підтримку, оновлення програмного забезпечення, навчання персоналу. Це додатково складе $C_{\text{ін}} = 500$ грн.

Загальні витрати на створення моделі розраховуються наступним чином:

$$C = C_{\text{зп}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{ел}} + C_{\text{пз}} + C_{\text{ін}} = 22367 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.1 Витрат на розробку імітаційної моделі

№	Стаття витрат	Позначення	Сума, грн
1	Заробітна плата розробника	$C_{зп}$	18 000
2	Амортизація комп'ютерної техніки	$C_{ам}$	667
3	Витрати на електроенергію	$C_{ел}$	200
4	Витрати на програмне забезпечення	$C_{пз}$	3 000
5	Інші витрати (сервіс, підтримка тощо)	$C_{ін}$	500
	Усього витрат на розробку моделі	C	22 367

4.3 Економічна ефективність впровадження імітаційної моделі

Основним результатом впровадження є зниження витрат на проектування та дослідження механізму з паралельною структурою, оскільки більшість експериментів проводиться у віртуальному середовищі.

Впровадження моделі дозволяє:

1. Зменшити витрати на фізичні випробування.

Замість виготовлення прототипів, що коштують десятки тисяч гривень, дослідження проводяться у MATLAB та SolidWorks. Економія: до 40–60% витрат на тестування.

2. Підвищити точність і якість рішень.

Використання програмного забезпечення для моделювання динамічних характеристик платформи Стюарта дозволяє значно скоротити час на розробку та верифікацію системи. Це підвищує ефективність і точність, що є ключовим у високоточних робототехнічних системах. Зокрема, імітаційна модель дозволяє:

- прогнозувати реакції в ланках;
- оцінювати вплив збурень;
- перевіряти крайні режими роботи без ризику поломки.

Це знижує вірогідність виробничих помилок — економія 10–15% витрат на корекцію конструкції.

3. Скоротити час проектування.

Завдяки швидким ітераціям моделювання термін проектування скорочується на 20–30%.

4. Вивільнення робочого часу.

Інженери менше часу витрачають на механічні вимірювання та ручні розрахунки. Економія — еквівалент 0,4–0,6 робочої ставки.

Пряма економічна вигода.

Оцінимо економію підприємства за рік:

- економія на прототипуванні $E_{\text{прот}} = 30\,000$ грн;
- зменшення перевитрат через помилки $E_{\text{пом}} = 10\,000$ грн;
- вивільнення робочого часу $E_{\text{час}} = 15\,000$ грн.

Сумарна річна економія розраховуються наступним чином:

$$E = E_{\text{прот}} + E_{\text{пом}} + E_{\text{час}} = 55\,000 \text{ грн/рік.}$$

Таблиця 4.2 Річна економія від впровадження

№	Джерело економії	Позначення	Економія за рік, грн
1	Зменшення витрат на натурні прототипи та випробування	$E_{\text{прот}}$	30 000
2	Зменшення витрат через скорочення конструкторських помилок	$E_{\text{пом}}$	10 000
3	Економія робочого часу інженерів (0,4–0,6 ставки)	$E_{\text{час}}$	15 000
	Сумарна річна економія	E	55 000

Оцінка ефективності:

$$E_{\text{ч}} = E - C = 55\,000 - 22\,367 = 32\,633 \text{ грн.}$$

Економічний ефект є позитивним, а строк окупності впровадження:

$$T_{\text{ок}} = C/E = 22\,367/55\,000 \approx 0.41 \text{ року} \approx 5 \text{ місяців.}$$

Коефіцієнт економічної ефективності розраховується наступним чином:

$$K_{\text{еф}} = E/C = 55\,000/22\,367 \approx 2.46.$$

Тобто кожна вкладена гривня повертається 2,46 рази.

Таблиця 4.3 Інтегральні показники економічної ефективності

Показник	Позначення	Значення
Загальні одноразові витрати	C	22 367 грн
Сумарна річна економія	E	55 000 грн/рік
Чистий річний економічний ефект	$E_{\text{ч}}$	32 633 грн/рік
Строк окупності	$T_{\text{ок}}$	0,41 року (~5 міс.)
Коефіцієнт економічної ефективності	$K_{\text{еф}}$	2,46 раз

Висновок до розділу 4

Проведені розрахунки підтверджують економічну доцільність створення та впровадження імітаційної моделі мехатронної системи просторового механізму з паралельною структурою (платформа Стюарта). Аналіз витрат (табл. 4.1) показує, що одноразові витрати на розробку моделі становлять 22 367 грн, включаючи витрати на заробітну плату розробника, амортизацію обладнання, програмне забезпечення та експлуатаційні витрати.

У той же час річна економія (табл. 4.2), отримана за рахунок скорочення витрат на натурні експерименти, зниження кількості конструкторських помилок, оптимізації часу проєктування та підвищення продуктивності інженерної праці, становить 55 000 грн. Це дозволяє досягти чистого економічного ефекту у розмірі 32 633 грн на рік.

Строк окупності проєкту становить лише 0,41 року, що еквівалентно приблизно п'яти місяцям, а коефіцієнт економічної ефективності дорівнює 2,46, що свідчить про високу результативність інвестицій у розробку імітаційної моделі.

Таким чином, створення імітаційної моделі платформи Стюарта не лише забезпечує значне підвищення точності інженерних розрахунків і зниження ризиків при подальшому конструюванні, але й гарантує швидке повернення вкладених коштів та довгостроковий економічний ефект у процесі експлуатації системи.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Загальні положення

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності працівників у процесі трудової діяльності. В Україні правові основи охорони праці визначені Законом України «Про охорону праці» № 2694-ХІІ (1992) [24]. Безпечна організація роботи в лабораторіях регламентується також галузевими нормативними актами: правилами з охорони праці під час експлуатації комп'ютерної техніки [25], правилами електробезпеки [26], державними санітарними нормами для роботи з відеотерміналами ЕОМ [27] та правилами пожежної безпеки [28]. У цьому розділі стисло викладені основні вимоги цих нормативних документів, що забезпечують безпеку працівників лабораторій.

5.2 Аналіз шкідливих і небезпечних факторів в лабораторії

У процесі роботи в лабораторіях обчислювальної техніки на працівників можуть впливати різноманітні шкідливі та небезпечні виробничі фактори. До шкідливих (шкодочинних) факторів відносяться, зокрема, підвищене навантаження на зір від роботи з відеодисплейними терміналами, електромагнітне випромінювання моніторів, статична електрика, підвищена запиленість (пил від техніки), шум та вібрація від комп'ютерного обладнання чи периферійних пристроїв. Неправильне освітлення (занадто тьмяне або надто яскраве, з відблисками) спричиняє зорове напруження і втому. Тривала вимушена робоча поза при роботі за комп'ютером може призводити до перенапруження м'язів та розвитку професійних захворювань опорно-рухового апарату.

У лабораторії до основних небезпечних факторів слід віднести ризик ураження електричним струмом та можливість виникнення пожежі. Електрообладнання під напругою, пошкоджені дроти чи недбало виконані електромонтажні роботи створюють загрозу електротравми. Несправні або перевантажені електроприлади можуть стати причиною короткого замикання та пожежі. Іншими потенційно небезпечними ситуаціями є захаращені проходи

(ризик спіткнутися), ненадійно встановлене обладнання, яке може впасти та травмувати персонал.

Аналіз умов праці в лабораторіях дозволяє виявити зазначені шкідливі і небезпечні чинники та розробити заходи щодо їхнього усунення або зменшення. Зокрема, для зменшення впливу шкідливих факторів необхідно забезпечити відповідні санітарно-гігієнічні умови (оптимальне освітлення, мікроклімат, рівень шуму), ергономічну організацію робочих місць і регламентовані режими праці та відпочинку. Для нейтралізації небезпечних факторів запроваджуються технічні засоби захисту (заземлення, захисні вимикачі, пожежна сигналізація, вогнегасники тощо) та організаційні заходи (інструктажі, контроль справності обладнання, дотримання правил експлуатації). Нижче розглянуті основні вимоги електробезпеки, гігієни праці та техніки безпеки при роботі в комп'ютерних лабораторіях.

Електробезпека при роботі

Оскільки більшість обладнання працює від електричної мережі, то електробезпека – один із ключових аспектів охорони праці в лабораторії. Щоб запобігти ураженню електричним струмом, необхідно дотримуватися вимог Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів [26]. Передусім, усе електрообладнання в лабораторії повинно бути правильно змонтоване і заземлене. Кабелі живлення та подовжувачі слід розміщувати так, щоб виключити їх пошкодження і мінімізувати ризик випадкового дотику або спотикання. Розетки, вимикачі та інша електрофурнітура мають бути справними, із корпусами з негорючих матеріалів.

Важливим профілактичним заходом є дотримання встановлених навантажень на електромережу: сумарна потужність підключеного обладнання не повинна перевищувати проєкту. Рекомендується прокладати електромережу прихованим способом і використовувати кабелі, розраховані на навантаження із запасом (в 3–5 разів більше робочого). Увімкнення та вимкнення апаратури слід виконувати штатними вимикачами на її корпусах, а не шляхом висмикування вилки з розетки – це зменшує зношення контактів і іскріння. Для захисту мережі обов'язково використовуються автоматичні

вимикачі та пристрої захисного відключення, які оперативно відключають живлення при перегрузці чи короткому замиканні.

Робота з відкритими струмоведучими частинами в навчальних лабораторіях, як правило, не проводиться. Якщо ж є необхідність налаштування або ремонту електронного обладнання під напругою, це повинні виконувати лише спеціально навчені та атестовані працівники з відповідною групою з електробезпеки. Всі інші особи під час таких робіт мають триматися на безпечній відстані.

Заходи пожежної безпеки. Електробезпека тісно пов'язана з пожежною безпекою: несправності електропроводки часто спричиняють загорання. Тому слід виконувати і вимоги Правил пожежної безпеки в Україні [28]. Зокрема, рекомендується: підтримувати чистоту всередині комп'ютерів та іншого обладнання (регулярно очищати від пилу, який може стати горючим матеріалом); не встановлювати апаратуру поблизу легкозаймистих матеріалів або на нагрівальних приладах; не перевантажувати електромережу і подовжувачі. У приміщенні лабораторії мають бути вогнегасники відповідного типу (вуглекислотні або порошкові – для гасіння електрообладнання). Персонал повинен знати місце їх розташування та вміти ними користуватися. Усі працівники зобов'язані негайно повідомляти керівника про будь-які помічені несправності електропроводки чи обладнання (наприклад, іскріння, перегрів кабелів, запах горілої ізоляції) і не розпочинати роботу при виявленні несправностей до їх усунення [28].

Дотримання наведених вимог електро- та пожежобезпеки значно знижує ризик електротравм та пожеж у комп'ютерних лабораторіях. Всі роботи з обслуговування електромережі і ремонт обладнання повинні проводитися з відключеним живленням і тільки кваліфікованим персоналом. Працівники лабораторій у своїй повсякденній діяльності мають уважно ставитися до стану електрообладнання, користуватися ним відповідально і відповідно до інструкцій.

Освітлення

Правильне освітлення робочих місць в лабораторії – важлива умова збереження здоров'я зору і високої продуктивності праці. Система освітлення повинна відповідати державним санітарним нормам для приміщень з комп'ютерною технікою [27]. Зокрема, рівень освітленості на робочих столах має відповідати характеру зорової роботи: чим дрібніші деталі відображаються на екрані чи папері, тим вища потрібна освітленість. Освітлення повинно бути достатнім і рівномірним – на поверхні екрана і в робочій зоні не допускаються різкі тіні або різкі перепади яскравості. В полі зору працівника не повинно бути відблисків: сліпуче світло від ламп чи сонячних променів, що потрапляють напряду в очі або відбиваються від екрану, значно підвищує напруження зору. Тому слід уникати розташування моніторів прямо перед вікнами або світильниками.

Для створення сприятливих умов природного освітлення робочі місця доцільно розташовувати так, щоб денне світло падало збоку (найкраще – зліва для правші). Вікна бажано оснащувати жалюзі або шторами, щоб регулювати потік сонячного світла і запобігати появі відблисків на екранах. Штучне освітлення має бути комбінованим: загальне рівномірне освітлення всього приміщення доповнюється місцевим освітленням при необхідності. Рекомендується використовувати світильники, розміщені з обох боків від лінії погляду оператора паралельно напрямку погляду – такий підхід мінімізує відблиски на екрані монітора чи клавіатурі [27]. Колірна температура та спектральний склад світла повинні бути оптимальними для зору (як правило, застосовуються лампи нейтрально-білого світла).

Контрастність та фон. Екран не повинен бути занадто яскравим порівняно з навколишнім середовищем. Також бажано, щоб оточуючі стіни і предмети були спокійних тонів, не створювали різких колірних контрастів. В полі зору корисно мати деяку «неоднорідність» – наприклад, постери чи картини у приглушених тонах, щоб око могло періодично перевести погляд і відпочити на них [28]. Під час роботи з текстовою інформацією найбільш комфортним для очей є відображення темних символів на світлому фоні (наприклад, чорний

текст на білому екрані) [27]. Таке поєднання забезпечує кращу контрастність та знижує напруження зору в порівнянні зі світлими літерами на темному фоні.

Обладнання

До основного обладнання робочого місця оператора ЕОМ (електронно-обчислювальної машини) належать персональний комп'ютер (системний блок), монітор (дисплейний екран) та периферійні пристрої (клавіатура, миша, принтер тощо). Безпечна та зручна організація такого робочого місця передбачає правильне розташування обладнання згідно з ергономічними вимогами. Робочі місця слід розставити таким чином, щоб дотримувались мінімальні безпечні відстані: між сусідніми комп'ютерами – не менше 1,5 м, від задньої стінки монітора одного ПК до спини працівника, що сидить позаду, – не менше 1 м, від екрана до очей користувача – 0,4–0,7 м [27]. Не рекомендується розміщувати робочі столи впритул до вікна; оптимально – боком до вікна, щоб денне світло падало збоку. Якщо монітор все ж стоїть напроти вікна, обов'язково використовувати засоби проти відблисків (штори, жалюзі).

Монітор слід встановлювати прямо перед користувачем, екраном перпендикулярно до напрямку погляду [27]. Верхня межа екрану повинна знаходитися приблизно на рівні очей або трохи нижче; так очі спрямовані трохи донизу при погляді на центр екрану. Нахил монітора бажано відрегулювати так, щоб нижній край екрана був трохи ближче до оператора ніж верхній (легкий нахил назад) – це забезпечує більш природний кут огляду. Якщо екран розташований під невдалим кутом або збоку, працівник змушений приймати неправильну позу (нахилятися, повертатися), що призводить до сутулості та напруження ший [27]. Тому після посадки за комп'ютер слід витратити час на правильне позиціонування монітора і крісла під себе.

Щоб уникнути відблисків на екрані, потрібно ретельно продумати розташування всіх джерел світла. Як зазначалося вище, яскраві лампи не повинні світити напряду в очі чи на екран. У разі потреби можна застосувати спеціальні засоби захисту від відблисків: козирки над екраном, антиблікові фільтри на монітор (краще скляні поляризаційні, які зберігають чіткість зображення), антивідблискові накладки на світильники або екрани.

Розташування периферійних пристроїв повинно забезпечувати зручність і безпеку. Клавіатура має лежати стійко на столі, не хитатися під час друку. Бажано передбачити підставку під зап'ястки, щоб кисті рук були прямими і не перенапружувалися. «Миша» розташовується на великій рівній ділянці столу праворуч (або ліворуч для лівші) від клавіатури; простір для неї має бути достатнім, щоб рука не звисала з краю столу. Принтер та інше периферійне устаткування ставиться так, щоб під час роботи з ним не доводилося приймати незручну позу або тягтися через перешкоди. Всі кабелі між системним блоком і пристроями повинні бути акуратно вкладені, щоб не перетинати зону переміщення ніг працівника і не звисати зі столу.

Перевірка правильного розміщення обладнання має здійснюватися перед початком роботи кожного дня (цей пункт включено до вимог перед роботою, див. нижче). Дотримання ергономічних вимог до обладнання робочого місця значною мірою зменшує ризик професійного стомлення, порушень постави та зору, а також підвищує продуктивність праці при роботі з комп'ютером.

Робоча поза

Правильна робоча поза і зручне робоче місце – основа профілактики втоми і захворювань опорно-рухового апарату при тривалій роботі за комп'ютером. Поза оператора вважається раціональною, якщо він сидить прямо, не напружуючись, і всі частини тіла знаходяться у зручному положенні. Оптимально, коли ступні ніг розташовані горизонтально на підлозі або на спеціальній підставці, стегна паралельні підлозі, а верхня частина корпусу (спина) пряма і спирається на спинку крісла. Руки повинні розташовуватися таким чином, щоб плечі були розслаблені (верхні частини рук опущені вертикально вниз), передпліччя – приблизно горизонтально, а лікті зігнуті під кутом близько 90°. Кисті при роботі з клавіатурою й мишею мають бути продовженням передпліччя (вигин зап'ястка не більше ~20°) [27]. Голова нахилена вперед на невеликий кут (близько 15°), тобто погляд спрямований трохи вниз на екран. Така поза мінімізує статичне напруження м'язів.

Для забезпечення правильної пози велике значення має робочий стілець (крісло). Крісла для роботи з ПК повинні бути регульованими по висоті сидіння

і куту нахилу спинки. Бажано, щоб спинка крісла мала анатомічну форму, повторюючи природний вигин хребта, і підтримувала спину в області попереку. Надто м'які або надто тверді сидіння небажані – крісло має бути достатньо жорстким, щоб підтримувати корпус, але комфортним. Висоту крісла налаштовують так, щоб ноги користувача не висіли у повітрі і не надмірно згиналися: якщо стіл занадто високий і не регулюється, обов'язково використовується підставка для ніг. Наявність підлокітників (бильців) на кріслі вітається – вони дозволяють розслабити плечовий пояс під час пауз або при читанні з екрану. Крісло ставлять на такій відстані від столу, щоб працювати з клавіатурою можна було, не нахиляючись вперед і не тягнучись далеко руками.

Динаміка поз. Навіть при найбільш зручній позі важливо не залишатися нерухомим занадто довго. Рекомендовано щогодини робити короткі перерви. При інтенсивній роботі за комп'ютером через кожну годину слід відпочивати 10–15 хвилин, бажано зайнятися при цьому іншою діяльністю (розминка, вправи для очей, ходьба) [27]. Кілька разів на годину варто виконувати прості вправи – обертати кистями, розгинати спину, повертати шию, щоб зняти напруження м'язів. Під час перерв корисно відводити погляд від екрану і фокусуватися на далеких об'єктах або робити гімнастику для очей (кругові рухи очима, часте моргання, зміна фокусної відстані).

Важливо підтримувати сприятливий мікроклімат у приміщенні. Рекомендована температура повітря в комп'ютерних класах зазвичай +18...+22 °С, відносна вологість – 40–60%. Сухе повітря сприяє накопиченню статичного заряду та пересушує слизові оболонки очей. Тому при роботі комп'ютерів доцільно застосовувати зволожувачі повітря або інші способи підвищення вологості [28]. Це також зменшує кількість пилу в повітрі. Одяг користувачів має бути з натуральних тканин; синтетичний одяг небажаний, оскільки він електризується і притягує пил, що може викликати подразнення шкіри. Дотримання цих рекомендацій створює комфортні умови для працюючих і попереджає ряд професійних шкідливостей.

5.3 Розрахунок системи захисного заземлення

Захисне заземлення — це технічний засіб безпеки, який полягає у навмисному підключенні до землі (або до штучного заземлювача) струмонепровідних металевих частин електрообладнання, що можуть випадково опинитися під напругою при порушенні ізоляції.

Головна функція системи заземлення полягає в перетворенні аварійного струму замикання корпусу на струм замикання на землю, що дозволяє зменшити потенціали дотику й кроку до безпечного рівня, відповідно до вимог електробезпеки.

При аварійному замиканні на корпус напруга на неструмоведучих елементах визначається головним чином опором заземлювального пристрою. Такий пристрій включає заземлювальні електроди (вертикальні та горизонтальні) і струмопровідні з'єднувальні елементи.

У проекті передбачається контурне розміщення вертикальних електродів по периметру майданчика (або всередині приміщення), де встановлено електрообладнання. У будівлях прокладають заземлювальну магістраль уздовж стін, підключаючи до неї окремі захищені корпуси приладів паралельними провідниками.

Метою розрахунку є встановлення необхідної кількості електродів, визначення їхніх розмірів і розміщення таким чином, щоб сумарний опір розтікання струму не перевищував нормативного значення, яке допускається при замиканні фази на заземлені елементи установки.

У межах цієї магістерської роботи виконується інженерний розрахунок захисного заземлення в мережі з ізолюованою нейтраллю, що живить лабораторне електрообладнання. Приміщення розташоване у Кіровоградській області (кліматична зона І). Ґрунт — супіщаний, із нормальною вологістю та середньою корозійною агресивністю.

Тип заземлювачів — сталеві труби, вертикально заглиблені у ґрунт. Геометричні характеристики електродів (довжина, діаметр), а також відстані між ними, глибина прокладання, параметри стрічкового з'єднувача та опір природного заземлювача беруться згідно з вихідними умовами проекту.

1. Схема заземлювального пристрою з умовними позначеннями:

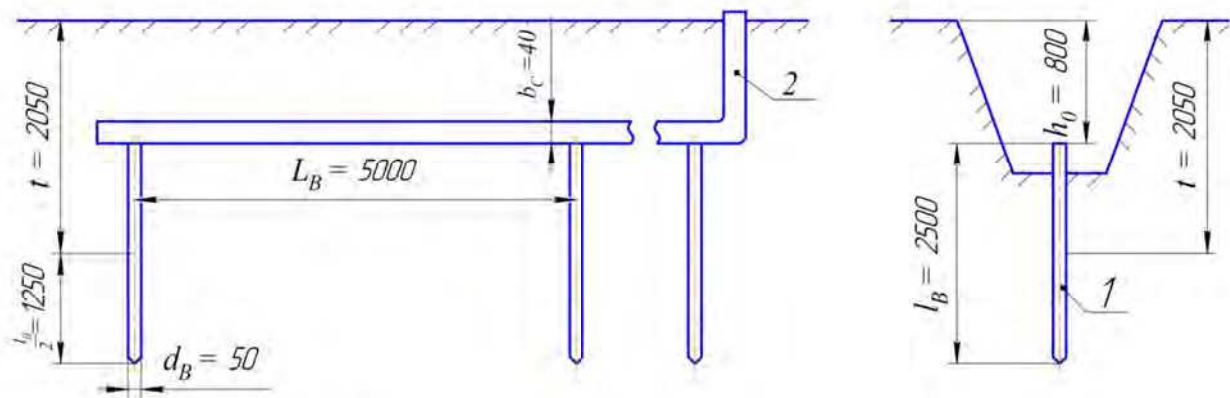


Рисунок 5.1 Схема позначення розмірів для розрахунку захисного заземлення: 1 – заземлювач; 2 – з'єднувальна стрічка; h_0 – глибина закладання вертикальних заземлювачів; L – відстань між заземлювачами; t – відстань від середини заземлювача до поверхні ґрунту; l – довжина заземлювача; b_c – ширина стрічки

2. Допустиме (нормативне) значення опору розтікання струму в заземлюваному пристрої, згідно з правилами устаткування установок, взятє з таблиці 7.1 [29] та рівне $R_\partial = 4 \text{ Ом}$.

3. Розрахунковий опір розтікання електроструму в штучному заземленні, при відомому природному опорі розтікання струму рівний:

$$R_{\text{розр.ш.з}} = \frac{R_\partial \cdot R_{\text{н.з.}}}{R_{\text{н.з.}} - R_\partial}; \quad (5.1)$$

$$R_{\text{розр.ш.з}} = \frac{4 \cdot 17}{17 - 4} \approx 5.23 [\text{Ом}].$$

4. Відповідно до таблиці 7.2 [29] обирається наближене значення питомого опору ґрунту, що дорівнює $\rho_{\text{табл}} = 300 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

5. Коефіцієнт сезонності для вертикальних заземлювачів довжиною $l_B = 2.5 \text{ м}$ та кліматичною зоною I, відповідно до таблиці 7.4, [29] приймається $K_{\text{С.В.}} = 1.7$;

6. Розрахунковий питомий опір ґрунту для вертикальних заземлювачів:

$$\rho_{\text{розр.в}} = \rho_{\text{табл}} \cdot K_{\text{С.В.}}; \quad (5.2)$$

$$\rho_{\text{розр.в}} = 300 \cdot 1.7 = 510 [\text{Ом} \cdot \text{м}].$$

7. Відстань від поверхні землі до середини заземлювача:

$$t = h_0 + \frac{l_B}{2}; \quad (5.3)$$

$$t = 0.8 + \frac{2.5}{2} = 2.05 [м].$$

8. Опір розтікання струму в одному вертикальному заземлювачі:

$$R_B = 0.366 \cdot \frac{\rho_{розр.в}}{l_B} \left(\lg \frac{2l_B}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t + l_B}{4t - l_B} \right); \quad (5.4)$$

$$R_B = 0.366 \cdot \frac{510}{2.5} \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot 2.5}{0.05} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4 \cdot 2.05 + 2.5}{4 \cdot 2.05 - 2.5} \right) \approx 159.54 [Ом].$$

9. Теоретичне число вертикальних заземлювачів без врахування коефіцієнта використання ($\eta_{B.B.} = 1$):

$$\eta_{T.B.} = \frac{R_B}{R_{розр.ш.з} \cdot \eta_{B.B.}}; \quad (5.5)$$

$$\eta_{T.B.} = \frac{159.54}{5.23 \cdot 1} \approx 31;$$

10. Коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів при розташуванні за чотирикутним контуром, при числі заземлювачів $\eta_{T.B.} = 31$ та при відношенні $\frac{l_B}{l_B} = 2$, відповідно до таблиці 7.5, [29] приймається: $\eta_{B.B.} = 0.58$.

11. Необхідна кількість вертикальних однакових заземлювачів (стержнів) з врахуванням $\eta_{B.B.}$:

$$n_{H.B.} = \frac{R_B}{R_{розр.ш.з} \cdot \eta_{B.B.}}; \quad (5.6)$$

$$n_{H.B.} = \frac{159.54}{5.23 \cdot 0.58} \approx 52.59.$$

Приймається $n_{H.B.}$ рівним 53 стержня.

12. Розрахунковий опір розтікання струму у вертикальних заземлювачах при $n_{H.B.} = 53$ без врахування горизонтального заземлювача (з'єднувальної стрічки):

$$R_{розр.в} = \frac{R_B}{n_{H.B.} \cdot \eta_{B.B.}}; \quad (5.7)$$

$$R_{розр.в} = \frac{159.54}{53 \cdot 0.58} \approx 5.19 [Ом].$$

13. Довжина з'єднувальної стрічки — горизонтального заземлювача:

$$L_{з.с.} = 1.05 \cdot L_B (n_{H.B.} - 1); \quad (5.8)$$

$$L_{3.C.} = 1.05 \cdot 5(53 - 1) = 273 \text{ [м]}.$$

14. Коефіцієнт сезонності для горизонтального заземлювача, що з'єднує вертикальні заземлювачі та природний заземлювач при довжині $L_{3.C.} = 273 \text{ м}$ і при нормальній вологості ґрунту для кліматичної зони I за таблиці 7.4 [29] приймається $K_{C.I.} = 1.4$.

15. Розрахунковий опір ґрунту для горизонтального заземлювача:

$$\rho_{розр.г} = \rho_{табл} \cdot K_{C.I.}; \quad (5.9)$$

$$\rho_{розр.г} = 300 \cdot 1.4 = 420 \text{ [Ом} \cdot \text{м]}.$$

16. Опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі (з'єднувальній стрічці):

$$R_{\Gamma} = 0.366 \cdot \frac{\rho_{розр.г}}{L_{3.C.}} \cdot \lg \frac{2 \cdot L_{3.C.}^2}{h_0 \cdot b_c}; \quad (5.10)$$

$$R_{\Gamma} = 0.366 \cdot \frac{420}{273} \cdot \lg \frac{2 \cdot 273^2}{0.8 \cdot 0.04} \approx 3.76 \text{ [Ом]};$$

17. Коефіцієнт використання горизонтального заземлювача при розташуванні вертикальних заземлювачів згідно з вихідними даними (за чотирикутним контуром) при відношенні $\frac{L_B}{l_B} = 2$ і необхідній кількості заземлювачів $n_{H.B.} = 53$ за таблиці 7.6 [29] приймається $\eta_{B.I.} = 0.29$.

18. Розрахунковий опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі (з'єднувальній стрічці) при числі електродів $n_{\Gamma} = 1$:

$$R_{розр.г} = \frac{R_{\Gamma}}{n_{\Gamma} \cdot \eta_{B.I.}}; \quad (5.11)$$

$$R_{розр.г} = \frac{3.76}{1 \cdot 0.29} \approx 12.97 \text{ [Ом]};$$

19. Розрахунковий теоретичний опір розтікання струму у заземлювачах:

$$R_{розр.в.г} = \frac{1}{\frac{1}{R_{розр.в}} + \frac{1}{R_{розр.г}}}; \quad (5.12)$$

$$R_{розр.в.г} = \frac{1}{\frac{1}{5.19} + \frac{1}{12.97}} \approx 3.71 \text{ [Ом]}$$

або

$$R_{розр.в.г.} = \frac{R_{розр.в} \cdot R_{розр.г}}{R_{розр.в} + R_{розр.г}}; \quad (5.13)$$

$$R_{розр.в.г.} = \frac{5.19 \cdot 12.97}{5.19 + 12.97} \approx 3.71 [Ом].$$

20. Загальний опір розтікання струму в штучному та природному заземлювачах:

$$R_{заг.п.ш} = \frac{1}{\frac{1}{R_{п.з.}} + \frac{1}{R_{розр.в.г.}}}; \quad (5.14)$$

$$R_{заг.п.ш} = \frac{1}{\frac{1}{17} + \frac{1}{3.71}} \approx 3.05 [Ом]$$

або

$$R_{заг.п.ш} = \frac{R_{п.з.} \cdot R_{розр.в.г.}}{R_{п.з.} + R_{розр.в.г.}}; \quad (5.15)$$

$$R_{заг.п.ш} = \frac{17 \cdot 3.71}{17 + 3.71} \approx 3.05 [Ом].$$

21. План та розміщення електроустановки:

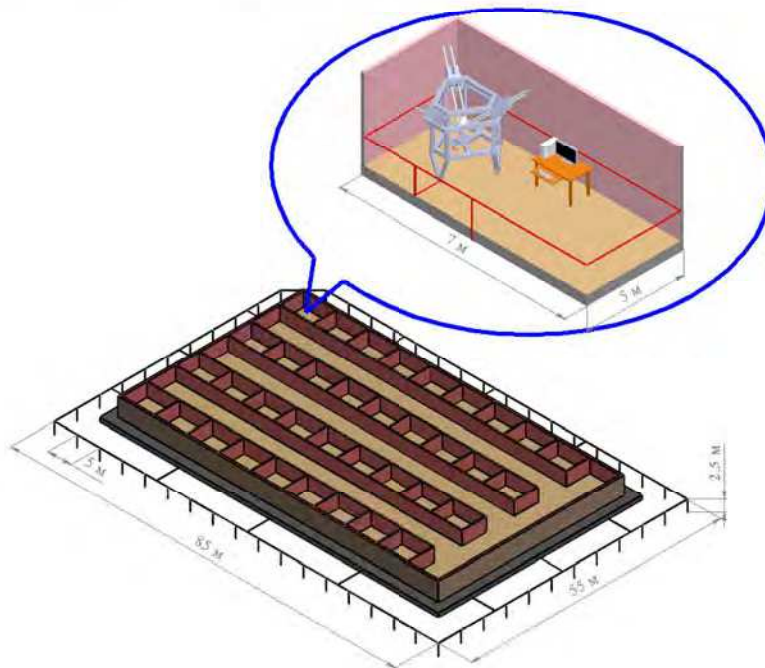


Рисунок 5.2 Схема стаціонарного захисного заземлення

Отримане загальне розрахункове значення опору розтікання струму в природному та штучному заземлювачах відповідає: правилам улаштування

електроустановок, правилам технічної експлуатації та правилам техніки безпеки.

5.4 Техніка безпеки на робочому місці

До самостійної роботи на комп'ютеризованому робочому місці допускаються лише особи, які: пройшли попередній медичний огляд, мають відповідну професійну підготовку, а також пройшли вступний інструктаж з охорони праці і первинний інструктаж на робочому місці [27]. Нові співробітники повинні ознайомитися з чинною інструкцією з охорони праці для роботи в лабораторії та засвідчити це підписом. Надалі працівники періодично проходять повторні інструктажі з охорони праці (як правило, один раз на 6 місяців) і періодичні медичні огляди (орієнтовно раз на 2 роки) [27] – ці вимоги встановлені як відомчими правилами, так і державними санітарними нормами для осіб, що працюють з ЕОМ.

Працівник зобов'язаний знати і виконувати всі настанови інструкції з охорони праці та інші нормативні акти з охорони праці, що стосуються його роботи. Згідно зі ст. 14 Закону «Про охорону праці» кожен співробітник повинен дотримуватися правил поведінки з обладнанням, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту, а також негайно повідомляти керівництво про ситуації, які створюють загрозу життю чи здоров'ю людей [24]. У свою чергу, роботодавець зобов'язаний створити безпечні умови праці та забезпечити працівників необхідними засобами захисту. В лабораторіях повинні бути доступні аптечка першої допомоги, інструкції (пам'ятки) щодо дій у аварійних ситуаціях (пожежа, ураження струмом), а відповідальні особи мають проводити регулярний інструктаж та тренування з евакуації.

Перед початком кожного робочого дня необхідно переконатися, що лабораторія готова до безпечної роботи. Нижче наведено основні вимоги безпеки, які слід виконати до включення комп'ютерів.

Вимоги безпеки перед початком роботи:

- Провітрити або кондиціювати приміщення. Перед роботою слід увімкнути систему вентиляції чи кондиціонер, щоб забезпечити приток свіжого

повітря та оптимальну температуру в лабораторії. Комфортний мікроклімат знижує втому і підвищує увагу.

- Перевірити розташування та стан обладнання. Упевнитися, що всі прилади встановлені стійко на робочих місцях, не блокують проходи. Монітор треба відрегулювати і повернути під прямим кутом до лінії погляду, злегка похиливши назад (нижній край трохи ближче до оператора) для зручності огляду. Клавіатура і миша – на зручних позиціях, дроти не натягнуті.

- Перевірити електропостачання. Оглянути кабелі живлення, вилки і розетки на відсутність пошкоджень. Переконатися в наявності заземлення корпусів і екранів (якщо передбачено). Усі вимикачі на обладнанні повинні бути в положенні «вимкнено» перед подачею живлення.

- Налаштувати робоче місце. Відрегулювати висоту крісла так, щоб ноги були в правильному положенні, а очі – навпроти центру екрану. Зафіксувати зручний нахил спинки крісла. Встановити оптимальну освітленість: при необхідності закрити жалюзі або ввімкнути додаткове освітлення, щоб не було відблисків.

- Підключити периферійні пристрої. Приєднати до системного блоку принтери, сканери та інше необхідне обладнання, обов'язково при вимкненому комп'ютері. Всі роз'єми повинні вставлятися щільно, без зусиль, відповідно до маркування.

- Увімкнути апаратуру в правильній послідовності. Спочатку ввімкнути живлення мережі (мережевий фільтр або стендовий рубильник, якщо є). Далі ввімкнути монітор, потім системний блок, а вже після завантаження системи – периферійні пристрої (принтер, сканер) [27]. Така послідовність захищає комп'ютер від стрибків напруги.

- Відрегулювати параметри екрану. Після завантаження перевірити встановлену яскравість і контрастність зображення на моніторі. Яскравість не повинна бути надмірною, щоб не стомлювати очі [28]. Налаштувати чіткість (фокус) зображення та розмір шрифту за потреби.

Якщо при огляді виявлено будь-які несправності або небезпечні відхилення (наприклад, пошкоджений провід, тріщини в корпусі, відсутність

заземлення, не працює вентилятор охолодження тощо), роботу розпочинати заборонено. Необхідно повідомити викладача або інженера (особу, відповідальну за лабораторію) і викликати спеціаліста для усунення несправності [27]. Лише переконавшись у безпечному стані обладнання, можна приступати до роботи.

Вимоги безпеки під час роботи:

- Дотримуватися правильної робочої пози та порядку на робочому місці. Працювати, сидячи прямо, спираючись на спинку крісла, не нахилитися надто близько до екрану. Клавіатура повинна лежати стійко, без хитання [28]. Не слід займатися сторонніми справами, які відволікають увагу від роботи.
- Уникати зайвого напруження при роботі з мишею. Для маніпулятора типу «миша» потрібно забезпечити достатньо простору на столі, щоб рука рухалася вільно, а лікоть мав опору на поверхні столу [27]. Це запобігає перенапруженню м'язів кисті і передпліччя.
- Дотримуватися трудової дисципліни і тиші. Не допускаються гучні розмови, жарти, які можуть відволікати або лякати інших працівників, особливо коли вони виконують відповідальні операції [27]. Сторонні звуки й розмови знижують увагу і можуть стати причиною помилок або травм.
- Регулярно очищувати обладнання від пилу. Не рідше одного разу на тиждень (а при інтенсивній експлуатації – частіше) потрібно знеструмити комп'ютер та протерти поверхні системного блоку, монітора, столу вологою (ледь змоченою мильним розчином) м'якою ганчіркою [27]. Екран дисплея та захисний екран слід протирати чистою серветкою, змоченою в спеціальному розчині або спирті. Заборонено використовувати рідинні або аерозольні розпилювачі безпосередньо на поверхнях комп'ютера – рідина може потрапити всередину пристроїв і спричинити замикання чи корозію. Пил, особливо всередині системних блоків, накопичуючись, погіршує охолодження і може призвести до перегріву, тому періодично техніку потрібно очищувати згідно з графіком обслуговування.

При виникненні аварійної ситуації (замикання, загорання, різке погіршення самопочуття оператора тощо) слід негайно знеструмити

обладнання (відключити живлення аварійним вимикачем або вийняти вилку з розетки, якщо це безпечно) і повідомити викладача чи відповідального за охорону праці. До усунення причин аварії продовжувати роботу не дозволяється. Якщо має місце пожежа – діяти згідно з інструкцією з пожежної безпеки: задіяти найближчий вогнегасник, викликати пожежну команду при необхідності, евакуювати людей з приміщення.

Висновки до розділу 5

У даному розділі наведено основні вимоги охорони праці для працівників комп'ютерних лабораторій, що охоплюють аналіз небезпечних факторів, електробезпеку, гігієну освітлення, ергономіку обладнання та робочої пози, а також правила безпечної поведінки перед початком і в процесі роботи. Дотримання цих вимог, заснованих на нормах чинного законодавства та державних правил (закон про охорону праці, правила роботи з ПК, електробезпека, санітарні норми, пожежна безпека), є запорукою збереження життя і здоров'я як персоналу лабораторій, так і студентів, що в них працюють. Керівники і співробітники зобов'язані приділяти постійну увагу питанням охорони праці, проводити регулярні інструктажі та контролювати виконання встановлених правил – це дозволить мінімізувати виробничий травматизм і створити безпечні та комфортні умови для навчання і наукової роботи.

6. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

6.1 Вступ

За останні десятиліття обсяги шкідливих викидів і відходів від виробничої діяльності суттєво зросли, через що природне середовище поступово втрачає здатність до самоочищення. Очевидно, що будь-яка нова техніка чи технологія, навіть високопродуктивна й економічно вигідна, але не відповідає сучасним вимогам екологічної безпеки, не може вважатися прогресивною. Тому охорона навколишнього середовища на сьогодні набуває першорядного значення в усіх галузях діяльності людини [30]. Сучасна екологічна політика держав у сфері виробництва ґрунтується на принципі «забруднювач платить», який передбачає, що витрати на заходи запобігання і контролю забруднення покладаються на того, хто його спричиняє. Цей принцип міжнародного екологічного права наразі імплементований і в Україні, стимулюючи підприємства мінімізувати шкоду довкіллю [30].

Не менш важливою умовою стійкого розвитку є забезпечення екологічної безпеки в процесах виробництва [30]. Промисловість — одна з базових галузей економіки, без якої неможливий прогрес цивілізації, проте саме промислові підприємства є головними джерелами забруднення довкілля. Найбільш небезпечними вважаються гірничо-металургійні, хімічні, нафтохімічні та інші підприємства важкої індустрії, що спричиняють значні викиди токсичних речовин у повітря (в тому числі виникнення кислотних дощів), утворюють відходи й порушують земельні ресурси (кар'єри), а також призводять до теплового та шумового забруднення [31]. Отже, проблема впливу виробництва на довкілля полягає у множинних негативних факторах: забрудненні атмосфери шкідливими газами і пилом, скиданні неочищених стічних вод у водойми, накопиченні твердих відходів, забрудненні ґрунтів, поширенні шуму та вібрації, а також у виснаженні природних ресурсів.

6.2 Джерела забруднення та екологічний моніторинг

Виробничі процеси генерують різноманітні джерела забруднення навколишнього середовища. До основних належать стаціонарні джерела викидів в атмосферу (топкові установки, котельні, димові труби підприємств),

пересувні джерела (автотранспорт, залізничний, авіаційний та інший транспорт), скиди стічних вод підприємств у водні об'єкти, відвали та полігони відходів, а також побічні продукти сільськогосподарського виробництва (надлишок добрив, пестицидів тощо). Вони забруднюють довкілля сотнями токсичних сполук, а також фізичними факторами (шум, вібрація, тепло) [31]. Окрему небезпеку становлять аварійні ситуації (наприклад, техногенні аварії з викидом небезпечних речовин чи розливом нафти), що можуть спричинити масштабне забруднення.

Для постійного контролю за станом навколишнього середовища на виробництві застосовують різні методи, одним із яких є екологічний моніторинг довкілля. Моніторинг навколишнього природного середовища – це система регулярних спостережень, оцінки і прогнозу змін стану довкілля, створена з метою виявлення антропогенного впливу та своєчасного реагування на відхилення. Іншими словами, екологічний моніторинг забезпечує постійну оцінку екологічних умов середовища життя людини і природних екосистем, а також створює умови для визначення коригувальних дій у випадках, коли показники якості довкілля виходять за нормативні межі [30].

Основні задачі моніторингу на виробництві включають спостереження за джерелами антропогенного впливу (викидами, стоками, відходами тощо), спостереження за факторами цього впливу (концентраціями забруднюючих речовин, рівнями шуму, радіаційним фоном тощо) та контроль стану компонентів природного середовища (атмосферного повітря, води, ґрунтів, біоти) під впливом зазначених факторів з оцінкою і прогнозом змін. В рамках моніторингу визначаються найбільш небезпечні забруднювачі та порівнюються їх концентрації з гранично допустимими концентраціями. На основі даних моніторингу підприємство може своєчасно вживати заходів для запобігання критичним екологічним ситуаціям.

При розробці проекту системи екологічного моніторингу для конкретного виробництва необхідно зібрати інформацію про всі можливі канали надходження забруднюючих речовин у довкілля. Зокрема, враховуються: викиди забрудників в атмосферу (від промислових та енергетичних установок,

транспортних засобів), скиди забруднених стічних вод у річки чи інші водойми, поверхневий стік з забруднених територій (змиви з полів добрив і пестицидів у сільському господарстві), місця накопичення відходів (шламосховища, звалища), а також можливі техногенні аварії й надзвичайні ситуації. Крім того, моніторинг охоплює відстеження процесів переносу і розповсюдження забруднювачів у довкіллі – атмосферного переносу на значні відстані, міграції забруднень у водному середовищі, переміщення полютантів у ґрунті та підземних водах. На основі цих даних оцінюється поточний екологічний стан і прогнозуються можливі наслідки впливу виробництва на природне середовище.

6.3 Заходи для зменшення впливу виробництва на довкілля

Охорона навколишнього середовища – це система різнопланових заходів (технічних, організаційних, правових, економічних тощо), спрямованих на раціональне використання природних ресурсів і обмеження негативного впливу діяльності людини на довкілля [30]. На рівні підприємства комплекс природоохоронних заходів має на меті повністю або максимально компенсувати шкоду, яку виробництво може завдати навколишньому природному середовищу. Основними напрямками таких заходів є попередження забруднення на джерелі його виникнення, мінімізація утворення відходів та викидів, а також очищення забруднень перед потраплянням у довкілля. Нижче розглянемо ключові заходи зі зменшення техногенного навантаження, які доцільно впроваджувати у виробничій діяльності.

Ресурсозбереження та підвищення екологічності виробництва. Одним із найдієвіших способів мінімізувати негативний вплив на довкілля є впровадження принципів ощадливого використання ресурсів на всіх етапах технологічного процесу. Такий підхід по суті вимагає зробити виробництво менш ресурсоемним. Досягти цього можна завдяки економному використанню сировини, води й енергії на одиницю продукції, а також упровадженню маловідходних і безвідходних технологій. Раціональне використання сировинних та енергетичних ресурсів має подвійний ефект: воно не лише скорочує витрати підприємства, а й зменшує обсяги викидів і відходів.

Очищення викидів та скидів. Для захисту атмосферного повітря використовуються пилогазоочисні установки (фільтри, електрофільтри, скрубери, циклони тощо), які вловлюють пил та токсичні гази до їх виходу з труб. Очищення промислових стоків здійснюється шляхом механічних, фізико-хімічних та біологічних методів, що дозволяють видалити забруднення з води перед її скиданням у водойми. Ефективні системи газо- та водоочистки здатні суттєво знизити концентрації шкідливих речовин, доводячи їх до встановлених нормативів. Крім того, для зменшення шумового впливу впроваджуються шумопоглинаючі екрани, кожухи на обладнанні, а для зниження вібрацій – демпфери та амортизатори.

Утилізація відходів та рециклінг. У цьому контексті важливу роль відіграє налагодження систем поводження з відходами, які спрямовані на їх максимальну утилізацію або повторне використання. Зокрема, тверді виробничі відходи (металобрухт, обрізки, відходи деревини, пластмас тощо) слід сортувати і, якщо це технічно можливо, направляти на переробку. Органічні відходи та побічні продукти сільськогосподарського виробництва доцільно використовувати для отримання біогазу або компосту.

Організаційно-правові та економічні заходи. Підприємство зобов'язане дотримуватися вимог природоохоронного законодавства, що включає нормативи граничнодопустимих викидів і скидів, правила поводження з відходами, вимоги до зберігання небезпечних речовин тощо. Регулярний екологічний аудит і оцінка впливу на довкілля нових проєктів дозволяють своєчасно виявити ризики та визначити необхідні компенсаторні заходи. Економічні механізми стимулювання екологічно відповідальної діяльності включають екологічний податок та платежі за забруднення: підприємству вигідніше інвестувати в очисне обладнання і технології, ніж сплачувати штрафи за понаднормові викиди [32]. Крім того, держава може надавати підтримку екологічним інноваціям через пільгове кредитування, гранти або субсидії на впровадження найкращих доступних технологій.

Моніторинг та управління екологічною безпекою. Необхідно вибудувати на підприємстві систему екологічного менеджменту, яка передбачає постійний

моніторинг стану довкілля і внутрішній контроль за дотриманням природоохоронних норм. Впровадження стандартів екологічного управління (наприклад, серії ISO 14000) сприяє систематизації роботи у сфері охорони природи. Періодичне навчання персоналу з питань екологічної безпеки та формування екологічної культури працівників також є важливими складовими: підвищення екологічної свідомості допомагає запобігати порушенням і аваріям.

Висновки до розділу 6

Таким чином, охорона навколишнього середовища на виробництві – це комплексна задача, що включає як технічні рішення (очищення, модернізація технологій, утилізація відходів), так і управлінські дії (контроль, планування, навчання, стимулювання). Реалізація сучасних природоохоронних заходів забезпечує екологічно безпечне середовище та стійкий стан екосистем, зменшуючи техногенне навантаження шляхом скорочення обсягів забруднень і раціонального використання ресурсів [33]. В результаті підприємство не лише виконує нормативні вимоги та запобігає штрафним санкціям, але й робить внесок у сталий розвиток, зберігаючи довкілля для майбутніх поколінь.

ВИСНОВОК

У магістерській роботі виконано системний аналіз мехатронної системи просторового механізму з паралельною структурою на основі платформи Стюарта та розроблено її імітаційну модель із застосуванням CAD- і CAE-технологій. Проведено огляд наявних рішень і методів моделювання механізмів паралельної структури, досліджено особливості конструкції платформи Стюарта та сфери її практичного використання. На основі зібраних даних сформовано концепцію моделювання та виконано побудову повної 3D CAD-моделі механізму в середовищі SolidWorks з урахуванням кінематичних і масово-інерційних характеристик.

Розроблена модель була трансльована до MATLAB/Simulink/SimMechanics, що дало змогу створити динамічну модель механізму та провести комплексне моделювання кінематичних і динамічних процесів. У результаті виконано аналіз руху платформи під дією зовнішніх збурень, визначено основні закономірності зміни положення, швидкостей і сил у виконавчих ланках, а також побудовано робочий простір механізму при різних орієнтаціях рухомої платформи. Отримані результати підтверджують можливість застосування імітаційних моделей для дослідження характеристик сучасних мехатронних систем та їх подальшої оптимізації.

У цілому магістерська робота вирішує ключову частину поставленого завдання — створення імітаційної моделі та проведення динамічного аналізу механізму платформи Стюарта — та може слугувати основою для подальших досліджень, орієнтованих на оптимізацію параметрів і верифікацію моделі за експериментальними даними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузнєцов Ю. М., Дмитрієв Д. О., Діневич Г. Ю. *Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури: монографія*. Київ; Херсон: НТУУ «КПІ», Херсонський НТУ, 2009. 456 с.
2. Merlet J.-P. *Parallel Robots*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2006. 394 p. DOI:10.1007/3-540-29378-2.
3. Taghirad H. D. *Parallel Robots: Mechanics and Control*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. 533 p. DOI:10.1201/b13906.
4. Tsai L.-W. Systematic Enumeration of Parallel Manipulators. *Technical Research Report T.R.* 98–33. Institute for Systems Research, University of Maryland, 1998. 9 p. URL: <http://www.isr.umd.edu> (дата звернення: 07.04.2025).
5. Stewart D. A platform with six degrees of freedom. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1965. Vol. 180, Pt. 1, No. 15. P. 371–386. DOI:10.1243/PIME_PROC_1965_180_029_02.
6. Gough V. E., Whitehall S. G. Universal tyre test machine. *Proceedings of the FISITA 9th International Technical Congress*. May 1962. P. 117–137.
7. Campos A., Quintero J., Saltarén R., Ferre M., Aracil R. An Active Helideck Testbed for Floating Structures Based on a Stewart-Gough Platform. *Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Nice, France, 22–26 Sept. 2008. P. 3705–3710. DOI:10.1109/IROS.2008.4651172.
8. Cai Y., Zheng S., Liu W., Qu Z., Han J. Model Analysis and Modified Control Method of Ship-Mounted Stewart Platforms for Wave Compensation. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 4505–4517. DOI:10.1109/ACCESS.2020.3048256.
9. Albus J., Bostelman R., Dagalakakis N. The NIST Robocrane. *Journal of Robotic Systems*. 1993. Vol. 10, No. 5. P. 709–724. DOI:10.1002/rob.4620100504.
10. Гофманн-Велленгоф Б., Легат К., Візер М. *Навігація. Основи визначення місцеположення та скеровування*. Пер. з англ.; ред. Я. С. Яцків. Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2006. 449 с.
11. Зозуля В. А., Осадчий С. І., Беляєв Ю., Pawłowski P. Класифікація завдань і принципів управління механізмом паралельної кінематичної структури. *Automation of Technological and Business Processes*. 2018. Т. 10, № 2. С. 18–29.

12. Dunlop G. R., Jones T. P. Position analysis of a two DOF parallel mechanism – the Canterbury tracker. *Mechanism and Machine Theory*. 1999. Vol. 34, No. 4. P. 599–614. DOI:10.1016/S0094-114X(98)00068-6.
13. Su X. S. et al. Singularity analysis of fine-tuning Stewart platform for large radio telescope using genetic algorithm. *Mechatronics*. 2003. Vol. 13, No. 5. P. 413–425. DOI:10.1016/S0957-4158(03)00020-5.
14. Defendini A., Vaillon L., Trouve F., Rouse Th., Sanctorum B., Griseri G. Technology predevelopment for active control of vibration & very high accuracy pointing systems. *4th ESA International Conference on Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems*. Noordwijk, The Netherlands, 18–21 Oct. 1999. 7 p.
15. Ryssel U., Ploennigs J., Kabitzsch K., Folie M. Generative Design of Hardware-in-the-Loop Models. *APGES'07*. Salzburg, Austria, 2007. P. 4–11.
16. Kelemenová T., Kelemen M., Miková Ľ. Model Based Design and HIL Simulations. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2013. Vol. 1, No. 7. P. 276–281. DOI:10.12691/ajme-1-7-21.
17. Dias B. M. D. et al. Model-Based Development of an Engine Control Module for a Spark Ignition Engine. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 53638–53649. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2869240.
18. Топораш Г. К., Мазур О. В., Ковальчук Д. О., Пушкін О. О. Модельно-орієнтоване проектування ПЗ для вбудованих систем у середовищі Matlab/Simulink. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2014. № 17. С. 26–29.
19. Зозуля В., Осадчий С., Тимошенко Г. Інформаційна технологія модельно-орієнтованого проектування контролеру реального часу. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2023. Т. 15, № 1. С. 1–10. DOI:10.15673/atbp.v15i1.2493.
20. Banaś W., Sękal A., Gwiazda A., Foit K., Kost G. Stewart platform simulation using the LabView environment. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 75, No. 2. P. 82–88.
21. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. *Комп'ютерна графіка: SolidWorks*. Київ: Універсальна книга, 2025. 252 с. ISBN 978-966-289-191-1.

22. MathWorks. Dryden Wind Turbulence Model (Continuous) [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/aeroblks/drydenwindturbulencemodelcontinuous.html> (дата звернення: 07.04.2025).
23. *Розробка фізичної моделі верстата на основі механізму паралельної структури...*: Звіт про НДР (заключний). Кіровоградський НТУ. № ДР 0109U00210. Кіровоград, 2011. 176 с.
24. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (дата звернення: 07.11.2025).
25. Про затвердження Правил охорони праці... Наказ Держгірпромнагляду від 26.03.2010 № 65. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0293-10> (дата звернення: 07.11.2025).
26. Про затвердження Правил безпечної експлуатації... Наказ Держнаглядохоронпраці від 09.01.1998 № 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98> (дата звернення: 07.11.2025).
27. Державні санітарні правила і норми... Наказ МОЗ України від 10.12.1998 № 7. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0007282-98> (дата звернення: 07.11.2025).
28. Про затвердження Правил пожежної безпеки... Наказ МВС від 30.12.2014 № 1417. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15> (дата звернення: 07.11.2025).
29. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Мельников О. В. *Основи охорони праці*. Львів: Афіша, 1999. 348 с.
30. Рижков С. С. та ін. *Екологія та охорона навколишнього середовища: методичні вказівки....* Миколаїв: НУК, 2006. 32 с.
31. Основні джерела антропогенного забруднення навколишнього середовища. URL: <https://kc.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/11/2021/02/General-and-chemical-ecology5.pdf> (дата звернення: 07.11.2025).
32. Про Концепцію розвитку водного господарства: Постанова ВРУ від 14.01.2000 № 1390-XIV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1390-14> (дата звернення: 07.11.2025).

33. Управління екології та природних ресурсів Миколаївської області.
Програма КП_2127. URL: <https://ecolog.mk.gov.ua/ua/programs/KP2127> (дата
звернення: 07.11.2025).

ДОДАТОК А. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

1 Загальні положення

1.1. Найменування роботи:

Системний аналіз мехатронної системи просторового механізму з паралельною структурою та побудова її моделі на основі імітаційних методів.

1.2. Підстава для виконання роботи:

Необхідність підвищення ефективності моделювання і керування просторовими механізмами з паралельною структурою, оптимізації їхніх динамічних характеристик і розробки адекватних імітаційних моделей з використанням CAD/CAM-технологій.

Підстави для розробки: Наказ № 1355-уч. від "14" листопада 2025 року «Про затвердження тем магістерських робіт».

1.3. Мета роботи:

Розробити імітаційну модель платформи Стюарта для аналізу її кінематичних та динамічних характеристик із використанням SolidWorks Motion і MATLAB SimMechanics, що дозволить підвищити точність розрахунків та надійність мехатронної системи.

2 Вимоги до виконання роботи

2.1. Перелік задач, які необхідно вирішити:

- провести аналіз існуючих методів побудови моделей механізмів із паралельною структурою;
- дослідити конструктивні особливості платформи Стюарта та область її практичного застосування;
- розробити структурну схему мехатронної системи платформи Стюарта;
- створити 3D CAD-модель платформи в SolidWorks з урахуванням масово-інерційних характеристик компонентів;
- імпортувати модель у MATLAB SimMechanics;
- побудувати моделі керування та збурень у середовищі Simulink;
- здійснити кінематичний і динамічний аналіз;
- формування висновків і підготовка звіту.

2.2. Очікувані результати:

- аналітичний огляд рішень і технологій моделювання механізмів з паралельною структурою;
- структурна схема мехатронної системи;
- 3D CAD-модель платформи Стюарта;
- модель в середовищі MATLAB/Simulink;
- результати імітаційного моделювання;
- діаграми взаємодії між елементами системи;
- висновки;
- пропозиції з охорони праці та безпечної експлуатації мехатронної системи.

2.3. Обмеження:

- моделювання виконується на базі програм SolidWorks, MATLAB/Simulink та SimMechanics;
- усі моделі повинні відповідати реальним фізичним параметрам компонентів;
- результати аналізу мають бути підтверджені графічними та числовими матеріалами.

3 Загальні вимоги

3.1 Вимоги до надійності

Система повинна забезпечувати стабільність роботи при тривалому моделюванні в умовах змінних динамічних навантажень.

Допустимий рівень похибки обчислень не повинен перевищувати **0,5%**.

Імітаційна модель має бути захищена від збоїв при імпорті або передачі даних між середовищами SolidWorks, MATLAB та Simulink.

Передбачити автоматичне збереження результатів у разі аварійного завершення роботи.

3.2 Вимоги до експлуатації

Програмно-імітаційний комплекс повинен мати зручний інтерфейс користувача та забезпечувати повторне використання моделей у подальших дослідженнях.

Моделі повинні бути сумісні з сучасними версіями **Windows 10/11**.

Передбачити можливість запуску обчислень у пакетному режимі без втручання користувача.

3.3 Вимоги до складу та параметрів технічних засобів

Для виконання роботи необхідно використовувати комп'ютер із такими мінімальними параметрами:

- Процесор — не нижче **Intel Core i7** або **AMD Ryzen 7**;
- Оперативна пам'ять — не менше **16 ГБ**;
- Відеокарта з підтримкою **OpenGL 4.5** і не менше **4 ГБ відеопам'яті**;
- Дисковий простір — не менше **100 ГБ** вільного місця;
- Програмне забезпечення: **SolidWorks (версія 2022 або новіша)**, **MATLAB/Simulink з пакетом SimMechanics** (опціонально).

3.4 Вимоги до програмної документації

До складу програмної документації повинні входити:

- опис структури імітаційної моделі та її основних блоків;
- інструкція користувача щодо запуску моделі та інтерпретації результатів;
- опис алгоритмів обробки даних та методів аналізу;
- звіт про верифікацію і тестування моделі;
- технічний опис реалізації зв'язку між CAD- і Simulink-моделями.

3.5 Вимоги до оформлення документації:

- звітна документація повинна містити текстові, графічні й табличні матеріали;
- усі схеми, діаграми та графіки оформлюються відповідно до стандартів ДСТУ та ISO;
- результати моделювання подаються у вигляді таблиць, графіків, візуалізацій і порівняльних характеристик.

4 Порядок здачі роботи:

- проміжний звіт після завершення кожного етапу;
- остаточний звіт з усіма результатами досліджень і рекомендаціями;

- захист технічного завдання перед керівником.

5 Очікувана ефективність роботи:

Впровадження результатів роботи дозволить:

- підвищити точність і швидкість моделювання складних мехатронних систем;
- зменшити витрати часу на розробку прототипів;
- покращити стабільність системи керування просторовими механізмами;
- забезпечити узагальнену методику для проектування аналогічних механізмів.

6 Відповідальні за виконання роботи:

Виконавець: Зозуля Валерій Анатолійович

Керівник: Книрик Наталія Ромуальдівна, к.т.н., доцент

Термін виконання: до 14.12.2025

Затверджено: [підпис та печатка відповідального органу]

ДОДАТОК Б. ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ

Функція обчислення обсягу робочого простору workspace_stewart.m

% WORKSPACE_STEWART Обчислення робочої зони платформи Стюарта

% для фіксованих кутів нахилу рухомої платформи.

% Для кожного кута нахилу будується:

% - проекція XY, XZ, YZ

% - 3D-хмара точок робочої зони

%%% --- ПАРАМЕТРИ ПЛАТФОРМИ -----

% мінімальна / максимальна довжини штанг, мм

Lmin = 100; % <-- поставити свої

Lmax = 300; % <-- поставити свої

% радіуси нижньої та верхньої плит, мм

Rb = 200; % radius of base

Rp = 120; % radius of platform

% півкут між кріпленнями в парі

delta_b = 10*pi/180; % на основі

delta_p = 10*pi/180; % на платформі

% кутове зміщення між трикутниками основи й платформи

offset = 30*pi/180;

% кути розташування кріплень на основі (6-6 конфігурація)

anglesBase = [...

delta_b, ...

pi/3 - delta_b, ...

pi/3 + delta_b, ...

pi - delta_b, ...

pi + delta_b, ...

5*pi/3 + delta_b];

% кути розташування кріплень на платформі (зміщені на offset)

anglesPlat = offset + [...

delta_p, ...

pi/3 - delta_p, ...

```

    pi/3 + delta_p, ...
    pi - delta_p, ...
    pi + delta_p, ...
    5*pi/3 + delta_p];

% Координати точок кріплення штанг на основі в базовій СК (3x6)
B = [ Rb*cos(anglesBase);
      Rb*sin(anglesBase);
      zeros(1,6) ];

% Координати точок кріплення на платформі в її власній СК (3x6)
P0 = [ Rp*cos(anglesPlat);
       Rp*sin(anglesPlat);
       zeros(1,6) ];

%% --- ДІАПАЗОН ПОЗИЦІЙ ЦЕНТРУ ПЛАТФОРМИ -----
% Тут задаєте обмеження бажаної робочої зони
Xmin = -150; Xmax = 150; stepX = 10;
Ymin = -150; Ymax = 150; stepY = 10;
Zmin = 100; Zmax = 300; stepZ = 10;
[xGrid, yGrid, zGrid] = ndgrid(Xmin:stepX:Xmax, ...
                                Ymin:stepY:Ymax, ...
                                Zmin:stepZ:Zmax);

poses = [xGrid(:), yGrid(:), zGrid(:)];

%% --- КУТИ НАХИЛУ ПЛАТФОРМИ (в градусах) -----
tiltList = [0 15 30 45];
figure;
for k = 1:numel(tiltList)
    tiltDeg = tiltList(k);
    alpha = deg2rad(tiltDeg); % нахил навколо осі X
    beta = 0;
    gamma = 0;
    R = rotationMatrixXYZ(alpha, beta, gamma);
    [Gx, Gy, Gz] = computeWorkspaceForOrientation(poses, R, B, P0, Lmin, Lmax);

```



```

if isempty(Gx)
    warning('Для кута %g° робоча зона порожня.', tiltDeg);
    continue;
end
% --- Графіка -----
subplot(4,4,(k-1)*4+1);
plot(Gx, Gy, 'b. ');
xlabel('X, мм'); ylabel('Y, мм');
title(sprintf('XY, \alpha = %g^\circ', tiltDeg));
axis equal; grid on;
subplot(4,4,(k-1)*4+2);
plot(Gx, Gz, 'b. ');
xlabel('X, мм'); ylabel('Z, мм');
title(sprintf('XZ, \alpha = %g^\circ', tiltDeg));
axis equal; grid on;
subplot(4,4,(k-1)*4+3);
plot(Gy, Gz, 'b. ');
xlabel('Y, мм'); ylabel('Z, мм');
title(sprintf('YZ, \alpha = %g^\circ', tiltDeg));
axis equal; grid on;
subplot(4,4,(k-1)*4+4);
scatter3(Gx, Gy, Gz, 8, Gz, 'filled');
xlabel('X, мм'); ylabel('Y, мм'); zlabel('Z, мм');
title(sprintf('3D, \alpha = %g^\circ', tiltDeg));
axis vis3d; grid on; view(135,30);
end
end
%
```

```

function [Gx, Gy, Gz] = computeWorkspaceForOrientation(poses, R, B, P0, Lmin,
Lmax)
```

```

% Повертає множину точок робочої зони для заданої орієнтації платформи
nPoints = size(poses,1);
Gx = []; Gy = []; Gz = [];
for i = 1:nPoints
    p = poses(i,:).';      % 3x1, положення центру платформи
    P = R * P0 + p;        % 3x6, точки кріплення на платформі в базовій СК
    d = P - B;             % вектори штанг
    L = sqrt(sum(d.^2,1));  % довжини кожної штанги
    if all(L >= Lmin) && all(L <= Lmax)
        Gx(end+1,1) = p(1); %ok<AGROW>
        Gy(end+1,1) = p(2); %ok<AGROW>
        Gz(end+1,1) = p(3); %ok<AGROW>
    end
end
end
%
```

```

function R = rotationMatrixXYZ(alpha, beta, gamma)
% Матриця повороту R = Rz(gamma)*Ry(beta)*Rx(alpha)
Rx = [1    0    0;
      0 cos(alpha) -sin(alpha);
      0 sin(alpha) cos(alpha)];
Ry = [ cos(beta) 0 sin(beta);
      0    1    0;
      -sin(beta) 0 cos(beta)];
Rz = [cos(gamma) -sin(gamma) 0;
      sin(gamma) cos(gamma) 0;
      0    0    1];
R = Rz * Ry * Rx;
end
```