

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Факультет комп'ютерних наук

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій

_____ М. І. Сіделєв
«__» _____ 2026 р

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА

на тему **«СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМЕНШЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ
МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ ПРОМИСЛОВИХ МАНІПУЛЯТОРІВ»**

Спеціальність G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

Освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Здобувач

Роман ІЛЬІН

«__» _____ 20__ р.

Керівник роботи

Викладач кафедри

Олексій СІЛЬВЕЙСТРОВ

«__» _____ 20__ р.

Консультат

к. т. н., доцент

кафедри

Анна АЛЕКСЄЄВА

«__» _____ 20__ р.

Завдання на виконання кваліфікаційної роботи

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Факультет	Комп'ютерних наук
Кафедра	Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Рівень вищої освіти	Бакалаврський
Освітній ступінь	Бакалавр
Спеціальність	G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Освітня програма	Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

_____ М. І. Сіделєв

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну бакалаврську роботу здобувача

Ільїна Романа Олександровича

1. Тема кваліфікаційної роботи «Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових маніпуляторів» затверджена наказом ректора ЧНУ ім. Петра Могили № ____ від «__» _____ 2026 р.
2. Строк представлення кваліфікаційної роботи «__» червня 2026 р.
3. Очікуваний результат роботи та початкові дані:

Очікуваним результатом роботи є: розроблена інженерна концепція та 3D-модель навчально-дослідного стенду для оцінювання ефективності зменшення інтенсивності механічних коливань промислових маніпуляторів. Початковими даними є вимоги до стенду, параметри змінних ланок, схеми кріплення демпфера, склад вимірювальної системи та матеріали САД-моделювання.

4. Перелік питань, що підлягають розробці:

- аналітичний огляд джерел виникнення механічних коливань промислових маніпуляторів;
- аналіз пасивних, конструктивних, алгоритмічних, активних та напіваактивних методів зменшення коливань;
- обґрунтування конструктивної схеми стенду, складу вузлів та вимірювальних каналів;
- розробка 3D-моделі стенду, змінних ланок, пружно-демпфувального модуля і газового амортизатора;
- опис порядку встановлення змінних ланок, датчиків та точок кріплення демпфера;
- формування методики експериментального вимірювання та обробки сигналів;
- розробка розділу охорони праці та безпечної експлуатації лабораторного стенду.

5. Перелік графічних матеріалів:

- класифікація методів зменшення інтенсивності механічних коливань;
- структурна схема стенду для дослідження коливань маніпулятора;
- загальний вигляд стенду та схема встановлення змінних ланок;
- наочне пояснення роботи демпфера на стенді;
- розріз газового амортизатора і схема його встановлення на ланці;
- функціональна схема автоматизованого вимірювання параметрів коливань;
- алгоритм проведення досліду та схема зон безпеки.

6. Консультанти:

Консультант	Кафедра (організація)	Частина роботи
Алексєєва А. О. канд. техн. наук, доцент	кафедра екології ЧНУ імені Петра Могили	Спеціальна частина з охорони праці

Дата видачі завдання «___» _____ 20__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
виконання кваліфікаційної роботи

Тема: **«Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових маніпуляторів»**

№	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	Обговорення пропозицій теми від керівника	23.09.2025	
2	Обговорення із студентом теми, яка вибрана	01.10.2025	
3	Формування завдання, затвердження теми	30.10.2025	
4	Визначення актуальності, об'єкту, предмету	01.11.2025	
5	Пошук літератури, патентний пошук, уточнення задач дослідження	15.11.2025	
6	Виконання першої частини	02.12.2025	
7	Аналіз керівником записки першої частини (ЕВ*), формування зауважень та пропозицій	27.12.2025	
8	Опрацювання другої частини	14.03.2026	
9	Робота над третьою частиною (при наявності)	18.04.2026	
10	Робота над розділом з охорони праці	05.05.2026	
11	Передзахисти	12.05.2026	
12	Передача (ЕВ) кваліфікаційної роботи	15.06.2026	
13	Передача (ДВ) кваліфікаційної роботи	20.06.2026	

*ЕВ – електронний варіант, ДВ – друкований варіант.

Здобувач

Р. О. Ільїн

«__» _____ 20__ р.

Керівник роботи

О. В. Сільвейстров

викладач кафедри

«__» _____ 20__ р.

АНОТАЦІЯ

до кваліфікаційної роботи бакалавра

«Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових маніпуляторів»

Студент 471 гр.: Ільїн Роман Олександрович

Керівник: викладач кафедри Сільвейстров О. В.

Дана кваліфікаційна робота присвячена розробці навчально-дослідного стенду для моделювання механічних коливань ланок промислових маніпуляторів та оцінювання способів зменшення їх інтенсивності. Актуальність роботи обумовлена тим, що залишкові коливання знижують точність позиціонування кінцевого ефектора, збільшують час стабілізації та підвищують динамічні навантаження на вузли маніпулятора.

У роботі розглянуто джерела виникнення коливань, динамічні особливості ланок маніпулятора та основні методи їх зниження. Обґрунтовано застосування змінних ланок, кінцевого вантажу, пружно-демпфувального вузла, газового амортизатора, акселерометрів, датчика переміщення та блока збору даних.

Розроблено конструктивну схему стенду та описано порядок створення 3D-моделі у САD-середовищі. Практична частина містить моделювання рами, шарнірного вузла, ланок, демпфера, кріплень, датчиків і кінематичних з'єднань. Також сформовано методику проведення дослідів, порівняння режимів без демпфера та з демпфером і вимоги безпечної експлуатації стенду.

Кваліфікаційна бакалаврська робота викладена на 48 сторінках (без додатків), містить 4 розділи, 13 рисунків, 16 таблиць та 17 джерел посилання.

Ключові слова: *промисловий маніпулятор, механічні коливання, демпфер, газовий амортизатор, акселерометр, 3D-модель, Fusion 360, DAQ, охорона праці.*

ABSTRACT

of the Bachelor`s Thesis

«Bench for Studying the Reduction of Mechanical Oscillation Intensity of Industrial Manipulators»

Student of group 471: Ilin Roman Oleksandrovych

Supervisor: Lecturer Silveistrov O. V.

This bachelor qualification work is devoted to the development of a laboratory research bench for modelling mechanical oscillations of industrial manipulator links and evaluating methods for reducing their intensity. The relevance of the work is determined by the influence of residual oscillations on positioning accuracy, stabilization time and dynamic loading of manipulator joints.

The paper analyzes vibration sources, dynamic features of manipulator links and basic vibration reduction methods. The proposed bench includes interchangeable links, a payload, a spring-damper module, a gas shock absorber, accelerometers, a displacement sensor and data acquisition equipment.

The practical part describes CAD modelling of the bench structure, including the frame, joint assembly, manipulator links, damper mounts, sensor brackets and kinematic connections. The work also presents an experimental procedure for comparing oscillations without damping and with damping, as well as occupational safety requirements for operating the laboratory bench.

The bachelor qualification work is presented on 48 pages (excluding appendices), contains 4 sections, 13 figures, 16 tables and 17 references.

Keywords: *industrial manipulator, mechanical oscillations, damping, gas shock absorber, accelerometer, 3D model, Fusion 360, data acquisition, occupational safety*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ ПРОМИСЛОВИХ МАНІПУЛЯТОРІВ	7
1.1 Джерельна база та актуальність теми.....	7
1.2 Динамічні особливості ланок маніпулятора	8
1.3 Методи зменшення інтенсивності коливань.....	9
1.4 Постановка задачі розробки стенду	11
Висновки до розділу 1.....	12
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА КОНСТРУКТИВНА СХЕМА СТЕНДУ	13
2.1 Вимоги до стенду	13
2.2 Конструктивна будова стенду	14
2.3 Пружинно-демпфувальний вузол і газовий амортизатор	16
2.4 Вимірювальна система стенду.....	18
Висновки до розділу 2.....	20
3 ПРАКТИЧНА РОБОТА. СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛІ СТЕНДУ	21
3.1 Підготовка САД-моделі та структури компонентів.....	21
3.2 Моделювання рами, шарнірного вузла та ланок	23
3.3 Моделювання галового амортизатора, демпфера і кріплень	24
3.4 Складання моделі та імітація руху	26
3.5 Підготовка моделі до експериментів.....	27
Висновки до розділу 3.....	29
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ ПРОМИСЛОВИХ МАНІПУЛЯТОРІВ	30

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових маніпуляторів

4.1 Характеристика лабораторного стенду та умов проведення досліджень .	31
4.2 аналіз небезпечних та шкідливих факторів	33
4.3 Заходи забезпечення безпечної експлуатації	37
4.4 Ергономіка, надзвичайні ситуації та інженерний розрахунок безпеки	40
Висновки до розділу 4	44
ВИСНОВКИ	46
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	47
ДОДАТОК А	49
ДОДАТОК Б	50
ДОДАТОК В	51

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

A	—	амплітуда коливань контрольної точки, мм або м
a(t)	—	прискорення ланки маніпулятора, м/с ²
DAQ	—	модуль збирання даних
E-STOP	—	аварійна кнопка зупинки стенду
f	—	частота коливань, Гц
IMU	—	інерціальний вимірювальний модуль
k	—	еквівалентна жорсткість пружного елемента, Н/м
c	—	коефіцієнт в'язкого демпфування, Н·с/м
m	—	приведена маса коливальної системи, кг
Q	—	добротність коливальної системи
RMS	—	середньоквадратичне значення сигналу
T	—	період коливань, с
β	—	коефіцієнт затухання, с ⁻¹
δ	—	логарифмічний декремент затухання
ω	—	циклічна частота, рад/с

ВСТУП

Промислові маніпулятори є основою сучасних автоматизованих виробничих комплексів. Вони застосовуються для переміщення деталей, зварювання, складання, сортування, пакування, завантаження технологічного обладнання та виконання повторюваних операцій з високою швидкістю. У таких системах точність руху залежить не тільки від алгоритму керування, а й від динамічної поведінки механічної частини.

Під час розгону, гальмування, зміни напрямку руху або різкої зупинки у ланках маніпулятора виникають механічні коливання. Їх джерелами є інерція рухомих мас, пружність ланок, люфти у шарнірах, деформації приводних передач, неточність монтажу і зміна корисного навантаження. Навіть за невеликої амплітуди залишкові коливання можуть призводити до зниження точності позиціонування кінцевого ефектора.

Для промислового обладнання проблема коливань має практичне значення. Якщо маніпулятор після завершення руху повинен очікувати стабілізації, зменшується продуктивність автоматизованої лінії. Якщо очікування не передбачене, виникає похибка позиціонування, погіршується якість зварного шва, точність складання або стабільність захоплення деталі. Тому дослідження методів зменшення інтенсивності коливань є актуальним інженерним завданням.

У навчальному процесі доцільно використовувати стенд, який дає змогу не лише продемонструвати коливання, а й кількісно виміряти їх параметри. Такий стенд повинен мати модель ланки маніпулятора, змінні вантажі, демпфувальні елементи, акселерометри, датчик переміщення, блок збирання даних, осцилограф і персональний комп'ютер для побудови графіків.

Метою роботи є розроблення стенду для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових маніпуляторів та створення

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових маніпуляторів
практичної 3D-моделі конструкції, придатної для пояснення принципу роботи, проведення навчальних дослідів і підготовки технічної документації.

Об'єктом дослідження є механічні коливання промислових маніпуляторів.

Предметом дослідження є конструкція навчально-дослідного стенду, змінні ланки, пружно-демпфувальні елементи, газовий амортизатор, датчики та методика оцінювання ефективності зниження коливань.

Для досягнення мети необхідно виконати такі задачі:

- проаналізувати джерела виникнення коливань у промислових маніпуляторах; розглянути методи їх зниження;
- сформулювати вимоги до стенду; обґрунтувати конструктивну схему; створити 3D-модель стенду;
- описати порядок встановлення змінних ланок, демпфера і датчиків; сформулювати методику вимірювання; розглянути питання охорони праці.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованої конструкції як навчального стенду для демонстрації впливу маси, довжини ланки, жорсткості, демпфування та місця встановлення амортизатора на характер механічних коливань.

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ ПРОМИСЛОВИХ МАНІПУЛЯТОРІВ

Перший розділ присвячено аналізу фізичної природи механічних коливань промислових маніпуляторів, причин їх виникнення та інженерних методів зменшення інтенсивності. Для обґрунтування теми використано джерела з теорії коливань, динаміки машин, робототехніки, автоматичного керування та мехатроніки.

1.1 Джерельна база та актуальність теми

Теорія механічних коливань розглядає вільні, вимушені та затухаючі рухи механічних систем. Для стенду, що моделює ланку маніпулятора, особливо важливими є поняття власної частоти, амплітуди, демпфування, резонансу та добротності. Ці параметри дають змогу перейти від якісного спостереження до кількісної оцінки динамічного процесу [1-5].

Промисловий маніпулятор є багатоланковою системою з розподіленою масою. На відміну від простої балки або маятника, динаміка маніпулятора залежить від конфігурації, положення вантажу, інерції ланок, жорсткості передач, характеристик приводів і режиму керування [6-9]. Тому стенд повинен бути модульним і дозволяти змінювати основні параметри системи.

Актуальність створення стенду зумовлена тим, що у реальних автоматизованих системах зменшення коливань забезпечує підвищення точності, скорочення часу циклу, зменшення зношування механізмів і підвищення безпеки. Дослідження таких процесів на навчальній установці дає можливість пов'язати теоретичні розрахунки з реальною поведінкою механічної системи.

Джерельна база роботи охоплює класичні праці з механічних коливань, підручники з робототехніки, роботи з автоматичного керування та мехатроніки. Це дозволяє розглядати стенд не як окрему механічну модель, а як комплексну

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
 Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
 маніпуляторів
 мехатронну систему, що поєднує механіку, сенсори, електроніку і програмну
 обробку даних.

Таблиця 1.1 – Основні напрями джерельного аналізу

Напря́м	Змі́ст використання	Значення для роботи
Теорія коливань	затухаючі коливання, демпфування, резонанс	вибір показників оцінювання
Динаміка машин	інерційні навантаження, жорсткість, вібрації	обґрунтування конструкції стенду
Робототехніка	ланки, шарніри, приводи, кінцевий ефектор	формування моделі маніпулятора
Мехатроніка	датчики, DAQ, комп'ютерна обробка	побудова вимірювальної схеми
Охорона праці	механічні та електричні ризики	визначення безпечних режимів роботи

1.2 Динамічні особливості ланок маніпулятора

Ланка промислового маніпулятора під час руху сприймає інерційні сили, моменти від корисного навантаження, реакції у шарнірах і збурення від приводу. Якщо конструкція має недостатню жорсткість або значні люфти, після зупинки виникають залишкові коливання. Найбільші переміщення, як правило, спостерігаються в зоні кінцевого ефектора, оскільки ця точка має найбільше плече відносно осі обертання.

Для навчального стенду достатньо розглядати спрощену одномасову або приведену модель. У ній рухома ланка з вантажем подається як система з еквівалентною масою m , жорсткістю k та коефіцієнтом демпфування c . Така модель не описує усі просторові режими реального робота, але дає можливість дослідити основну залежність між параметрами конструкції та коливальним процесом.

Власна частота системи залежить від співвідношення жорсткості та приведеної маси. Збільшення маси вантажу або довжини ланки зменшує частоту і може збільшувати амплітуду. Підвищення жорсткості ланки, навпаки, збільшує власну частоту і зменшує деформації. Демпфер не усуває саму пружність системи, але зменшує енергію коливань і скорочує час стабілізації.

На практиці важливо оцінювати не тільки максимальну амплітуду, а й RMS-значення, логарифмічний декремент, час затухання і добротність. Такий набір показників дозволяє порівнювати різні конструкції ланок, різні точки встановлення демпфера і різні режими збурення.

$$m \cdot x'' + c \cdot x' + k \cdot x = F(t) \quad (1.1)$$

де m – приведена маса рухомої частини; c – коефіцієнт демпфування; k – еквівалентна жорсткість; x – переміщення контрольної точки; $F(t)$ – зовнішнє збурення.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (1.2)$$

Формула (1.2) показує, що збільшення маси зменшує власну частоту, а збільшення жорсткості її підвищує. Саме тому у стенді доцільно передбачити змінні ланки, змінні вантажі та декілька варіантів кріплення демпфера.

1.3 Методи зменшення інтенсивності коливань

Методи зменшення інтенсивності механічних коливань можна поділити на пасивні, конструктивні, алгоритмічні, активні та напівактивні. У дипломній роботі основну увагу приділено тим методам, які можна наочно реалізувати на лабораторному стенді: встановленню демпфера, застосуванню пружинно-демпфувального вузла, зміні жорсткості ланки, зміні маси вантажу та зміні точки прикладання демпфувальної дії.

Пасивне демпфування реалізується за допомогою елемента, який створює силу опору, напрямлену проти швидкості руху. У стенді таким елементом може

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових маніпуляторів

бути газовий амортизатор або в'язкий демпфер. Під час коливань він розсіює енергію механічної системи, внаслідок чого амплітуда зменшується швидше.

Конструктивні методи полягають у зміні геометрії та матеріалу ланки. Наприклад, посилена ланка з ребрами жорсткості матиме менші деформації порівняно з полегшеною ланкою з великими вирізами. Це дозволяє дослідити компроміс між масою конструкції та її динамічною жорсткістю.

Алгоритмічні методи передбачають зміну профілю руху: плавний розгін, плавне гальмування, обмеження ривка та уникнення різких команд. У навчальному стенді ці методи можуть бути змодельовані через різні способи початкового збурення або через анімацію руху в CAD-моделі.

Активні та напівактивні методи потребують датчиків, регулятора і керованого виконавчого елемента. Для базового стенду вони розглядаються як перспективний напрям модернізації, однак вимірювальна частина одразу проектується так, щоб у майбутньому можна було додати зворотний зв'язок.



Результат застосування: зменшення амплітуди, скорочення часу затухання, підвищення точності позиціонування

Рисунок 1.1 – Класифікація методів зниження інтенсивності механічних коливань

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

Таблиця 1.2 – Порівняння методів зменшення інтенсивності коливань

Метод	Принцип дії	Переваги	Обмеження
Пасивний демпфер	розсіювання енергії у демпфувальному елементі	простота, наочність, надійність	ефективність залежить від положення і параметрів
Газовий амортизатор	опір руху штока під час стискання/розтягування	компактність, просте кріплення	має обмежений хід і силу
Віброізоляція	зменшення передачі коливань на основу	захист рами і столу	може змінити власні частоти системи
Посилення ланки	підвищення жорсткості конструкції	зменшення деформацій	може збільшити масу
Плавний закон руху	зменшення різких прискорень і ривків	не потребує механічних змін	потребує керування приводом

1.4 Постановка задачі розробки стенду

На основі аналізу встановлено, що стенд повинен забезпечувати не тільки демонстрацію коливань, а й порівняльне дослідження способів їх зменшення. Для цього необхідна модульна конструкція, у якій можна встановлювати різні ланки, змінювати вантаж, переставляти демпфер і реєструвати сигнали в декількох точках.

Основними інженерними вимогами є жорстка база, повторюване фланцеве кріплення ланок, наявність монтажних точок для акселерометрів А1-А3, декілька точок кріплення демпфера D1-D3, змінний кінцевий вантаж, датчик переміщення, блок збору даних та аварійне вимкнення.

Задача розробки полягає у створенні такої 3D-моделі стенду, яка відображає реальну конструктивну логіку: окремі компоненти, шарнірні з'єднання, демпфер з верхньою і нижньою точкою кріплення, пружинний модуль, датчики, кабельні підключення і місце оператора.

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

Таблиця 1.3 – Відповідність задач роботи очікуваним результатам

№	Задача	Очікуваний результат
1	Проаналізувати джерела коливань маніпуляторів	визначені основні причини та параметри коливального процесу
2	Розглянути способи зменшення інтенсивності	обґрунтовано використання демпфера, пружини, змінних ланок і датчиків
3	Сформувати конструктивну схему стенду	визначено склад вузлів і принцип їх взаємодії
4	Створити 3D-модель стенду	отримано практичну CAD-модель для дипломної роботи
5	Розробити методикау дослідів	визначено порядок вимірювань і критерії ефективності
6	Оцінити безпеку	розроблено заходи охорони праці

Висновки до розділу 1

Встановлено, що механічні коливання промислових маніпуляторів впливають на точність позиціонування, час стабілізації, ресурс вузлів і безпечність роботи.

Проаналізовано пасивні, конструктивні, алгоритмічні, активні та напівактивні методи зменшення коливань.

Обґрунтовано необхідність розробки модульного стенду з вимірювальною системою, змінними ланками, демпфувальними елементами та автоматизованою обробкою сигналів.

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА КОНСТРУКТИВНА СХЕМА СТЕНДУ

Другий розділ містить інженерне обґрунтування конструкції стенду, вибір основних вузлів, пояснення роботи пружно-демпфувального модуля, газового амортизатора і вимірювальної системи. На цьому етапі визначаються принципові рішення, які надалі реалізуються у 3D-моделі.

2.1 Вимоги до стенду

Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань повинен виконувати три функції: механічно відтворювати коливання ланки маніпулятора, забезпечувати встановлення різних засобів зменшення коливань і автоматизовано реєструвати параметри руху.

Конструкція повинна бути достатньо жорсткою, щоб власні коливання рами не спотворювали результати. Основа стенду має спиратися на віброопори або регульовані опори. Рухома ланка повинна встановлюватися на поворотному вузлі через фланцеве кріплення, що забезпечує повторюваність монтажу.

Для навчального застосування важлива наочність. Оператор повинен бачити ланку, вантаж, демпфер, датчики, шкалу переміщення, осцилограф і графіки на ПК. При цьому зона руху ланки має бути відділена від робочого місця оператора, а аварійна кнопка повинна бути доступною.

Стенд має підтримувати дослідження декількох типів ланок: короткої, довгої, посиленої та полегшеної. Для кожної ланки передбачають однакові базові отвори кріплення, точки встановлення акселерометрів А1-А3 та точки приєднання демпфера D1-D3.

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

Таблиця 2.1 – Вимоги до стенду

Група вимог	Зміст
Механічні	жорстка основа, поворотний вузол, змінна ланка, змінний вантаж, демпфер
Вимірювальні	акселерометри, датчик переміщення, DAQ, осцилограф, ПК
Експериментальні	повторюване збурення, змінні точки кріплення, порівняння режимів
Безпекові	обмежувачі ходу, аварійна кнопка, кабелі поза зоною руху
Експлуатаційні	доступність кріплень, простота заміни ланок, наочність роботи

2.2 Конструктивна будова стенду

Конструктивно стенд складається з нерухомої рами, поворотного вузла, змінної ланки маніпулятора, кінцевого вантажу, пружно-демпфувального модуля, газового амортизатора, датчиків і блока збору даних. Основу доцільно виконувати з металевої плити або профільної рами, що забезпечує достатню масу і стійкість.

Поворотний вузол імітує шарнір промислового маніпулятора. До нього через універсальний фланець кріпиться досліджувана ланка. Фланець повинен мати центрувальне посадкове місце, отвори під болти та штифти для точного повторного встановлення. Завдяки цьому одна й та сама база може використовуватися для дослідження різних ланок.

Змінна ланка виконується як окремий компонент. На ній передбачають монтажні місця для акселерометрів у трьох зонах: біля основи, посередині та біля кінцевого вантажу. Таке розташування дозволяє оцінити розподіл вібрацій уздовж ланки.

Кінцевий змінний вантаж встановлюється на кінці ланки і змінює момент інерції системи. У реальному маніпуляторі це відповідає роботі з деталями різної

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
 Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
 маніпуляторів
 маси. Зі збільшенням вантажу система стає більш інерційною, а час затухання
 може збільшуватися.

Структурна схема навчально-дослідного стенду



Рисунок 2.1 – Структурна схема навчально-дослідного стенду

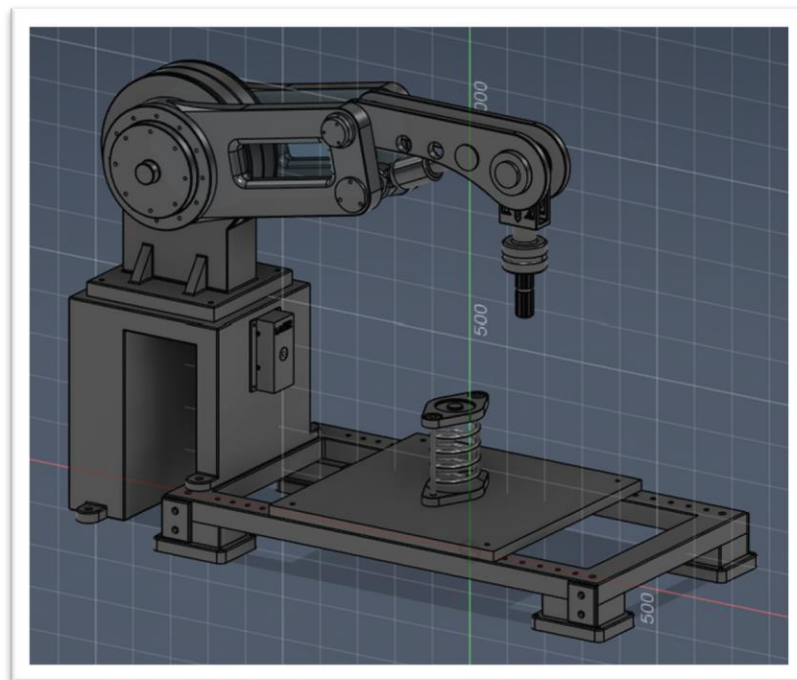


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд стенду для дослідження коливань маніпулятора

2.3 Пружинно-демпфувальний вузол і газовий амортизатор

Пружинно-демпфувальний вузол призначений для моделювання пружних властивостей конструкції та для створення контрольованих умов виникнення коливань. Пружина накопичує потенціальну енергію під час відхилення ланки, а після відпускання створює відновлювальну силу, яка повертає систему до положення рівноваги.

Демпфер виконує протилежну за фізичним змістом функцію: він не повертає систему, а гасить коливання шляхом розсіювання енергії. У спрощеній моделі демпфер створює силу, пропорційну швидкості руху. Чим більша швидкість переміщення ланки, тим більший опір створює демпфер.

Газовий амортизатор на стенді встановлюється між нерухомою основою та першою ланкою маніпулятора. Нижня точка кріплення з'єднується з рамою, верхня - з рухомою ланкою. Під час піднімання або опускання ланки амортизатор відповідно розтягується або стискається, створюючи опір руху і зменшуючи амплітуду коливань.

Наявність декількох точок кріплення D1-D3 потрібна для дослідження впливу плеча дії демпфера. Якщо демпфер встановлений ближче до осі обертання, переміщення точки кріплення менше і демпфувальна дія слабша. Якщо демпфер приєднаний ближче до кінця ланки, переміщення точки більше, а ефективність гасіння коливань зростає.

Як працює демпфер на стенді

1. Без демпфера



- Ⓜ Амплітуда велика
- ⌚ Коливання довго не затухають



Пружинно-демпфувальний вузол

2. З демпфером



- Ⓜ Амплітуда менша
- ⌚ Коливання швидко затухають

Як працює пружинно-демпфувальний вузол



- ↕ Рух ланки
- ➡ Пружина повертає систему у положення рівноваги
- ⬅ Демпфер гасить коливання, розсіюючи енергію

Амплітуда коливань – час



Час

Висновки

- ✓ Пружина створює відновлювальну силу
- ✓ Демпфер зменшує амплітуду
- ✓ Час затухання стає меншим
- ✓ Можна порівнювати різні положення демпфера

Рисунок 2.3 – Наочне пояснення роботи демпфера на стенді



Рисунок 2.4 – Газовий амортизатор на ланці маніпулятора та його розріз

$$F_d = c \cdot v = c \cdot x' \quad (2.1)$$

де F_d – сила демпфування; c – коефіцієнт демпфування; $v = x'$ – швидкість переміщення точки кріплення демпфера.

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

$$\eta = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

де η – ефективність зменшення амплітуди; A_0 – амплітуда без демпфера; A_1 – амплітуда після встановлення демпфера.

2.4 Вимірювальна система стану

Вимірювальна система стану призначена для отримання об'єктивних даних про коливальний процес. Основними сигналами є переміщення $x(t)$, прискорення $a(t)$, кут повороту $\theta(t)$ та час проходження контрольних положень. Для цього використовуються датчик переміщення, акселерометри, енкодер або інший датчик кута, DAQ-модуль, осцилограф і ПК.

Акселерометри встановлюються у точках A1, A2 і A3. Велика кількість монтажних точок не означає, що всі датчики мають працювати одночасно. Це дає можливість або переставляти один датчик у різні місця, або встановлювати декілька датчиків для синхронного вимірювання. Так можна визначити, де на ланці виникають найбільші прискорення.

Датчик переміщення встановлюється на окремій стійці і спрямовується на контрольну точку ланки або кінцевий вантаж. Він дає змогу побудувати часову залежність переміщення. За піками цього сигналу визначають амплітуду, період і швидкість затухання.

Сигнали надходять до блока збору даних, де перетворюються у цифрову форму. Далі ПК виконує фільтрацію, побудову графіків, визначення піків, розрахунок RMS-значення, логарифмічного декремента і коефіцієнта ефективності.

Функціональна схема автоматизованого вимірювання параметрів коливань

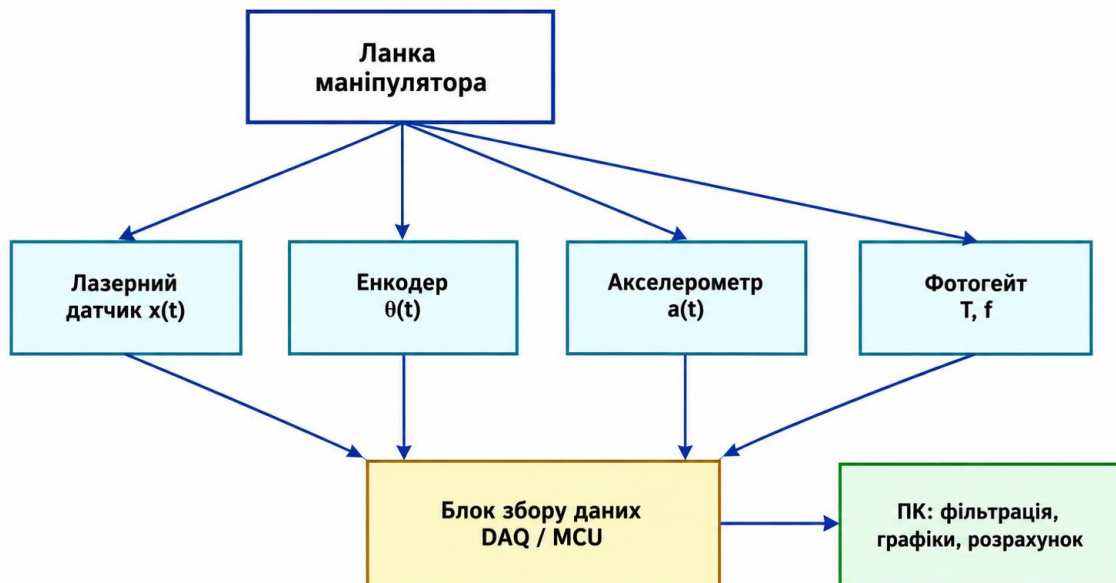


Рисунок 2.5 – Функціональна схема автоматизованого вимірювання параметрів коливань

Таблиця 2.2 – Призначення основних вимірювальних каналів

Канал	Місце встановлення	Вимірювана величина	Призначення
A1	біля основи ланки	прискорення	контроль коливань у зоні шарніра
A2	середина ланки	прискорення	оцінка розподілу вібрацій
A3	біля кінцевого вантажу	прискорення	фіксація максимальних вібрацій
S1	стійка датчика переміщення	переміщення	визначення амплітуди і періоду
DAQ	електронний блок	цифрові відліки сигналів	передача даних на ПК

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

Висновки до розділу 2

Сформовано конструктивну схему стенду, що складається з рами, поворотного вузла, змінної ланки, вантажу, демпфера, датчиків і блока збору даних.

Обґрунтовано функції пружини, демпфера і газового амортизатора у процесі зменшення інтенсивності коливань.

Пояснено призначення декількох точок кріплення акселерометрів і демпфера, що забезпечує універсальність дослідів.

Розроблено функціональну схему вимірювання, яка дає змогу автоматизовано реєструвати параметри коливального процесу.

3 ПРАКТИЧНА РОБОТА. СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛІ СТЕНДУ

Третій розділ є практичною частиною кваліфікаційної роботи. У ньому описано створення 3D-моделі стенду, компоновання вузлів, побудову змінних ланок, встановлення газового амортизатора, підготовку кріплень для акселерометрів і демпфера, а також перевірку рухомості механізму в CAD-середовищі.

3.1 Підготовка CAD-моделі та структури компонентів

3D-модель стенду доцільно створювати як збірку з окремих компонентів. Такий підхід відповідає реальному процесу виготовлення і дозволяє вносити зміни у кожний вузол незалежно. До основних компонентів належать: основа, стійка шарнірного вузла, поворотний вал, перша ланка, друга ланка, кінцевий вузол, змінний вантаж, корпус амортизатора, шток амортизатора, пружинний модуль, кронштейни датчиків і електронний блок.

Нерухомі деталі, які не повинні переміщуватися одна відносно одної, об'єднуються у жорсткі групи. До таких деталей належать основа, опори, стійка шарнірного вузла, кронштейни рами та монтажна плита. Рухомі ланки залишаються окремими компонентами, щоб між ними можна було задати обертальні з'єднання.

Для анімації і перевірки механізму необхідно використовувати не звичайне переміщення деталей, а кінематичні зв'язки. Між основою і першою ланкою створюється обертальний шарнір. Між першою і другою ланкою також задається обертальне з'єднання. Для газового амортизатора корпус і шток повинні бути окремими компонентами, з'єднаними поступальним зв'язком.

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

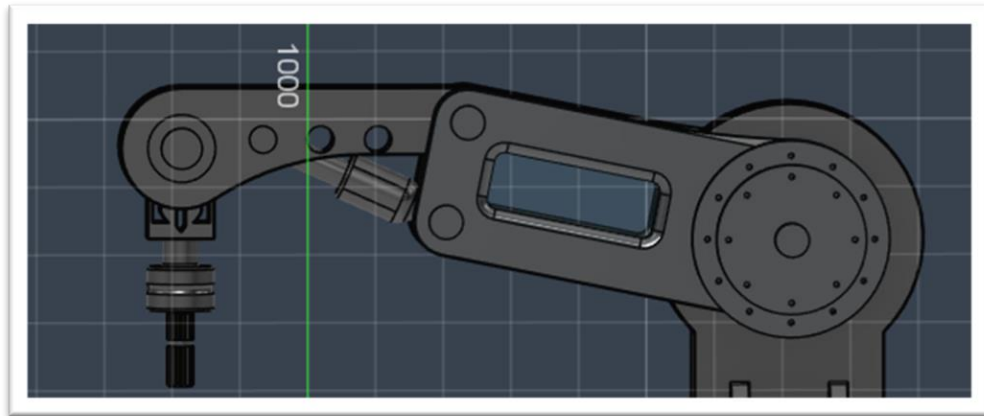


Рисунок 3.1 – Приклад структури 3D-моделі маніпулятора у Fusion 360

Таблиця 3.1 – Структура компонентів 3D-моделі

Компонент	Тип	Призначення
Основа стенду	нерухомий компонент	кріплення всіх вузлів і забезпечення стійкості
Стійка шарнірного вузла	нерухомий компонент	розміщення поворотного вала
Ланка 1	рухомий компонент	модель першої ланки маніпулятора
Ланка 2	рухомий компонент	модель другої ланки або кінцевої ділянки
Змінний вантажний тримач	змінний компонент	тримач імітаційного корисного навантаження
Корпус амортизатора	рухомий компонент	нижня частина газового амортизатора
Шток амортизатора	рухомий компонент	зміна довжини амортизатора
Кронштейни датчиків	допоміжні компоненти	встановлення акселерометрів і датчика переміщення

3.2 Моделювання рами, шарнірного вузла та ланок

Створення моделі починається з базової плити або рамної основи. Рекомендовано приймати габаритні розміри у межах 600-900 мм по довжині та 400-520 мм по ширині, щоб стенд мав достатню площу для розміщення маніпулятора, демпфера, датчиків і блока збору даних. На основі передбачають отвори під кріплення стійки, опор, пружинного модуля та датчиків.

Стойка шарнірного вузла моделюється як жорсткий опорний елемент з ребрами жорсткості. Її задача - сприймати реакції від рухомої ланки і передавати їх на основу стенду. У зоні шарніра створюється вал або вісь, навколо якої обертається перша ланка.

Змінні ланки доцільно моделювати у кількох варіантах: коротка, довга і посилена. Для всіх варіантів зберігається однакова зона приєднання до фланця. На ланці створюються отвори під акселерометри A1-A3 та отвори під точки кріплення демпфера D1-D3. Така уніфікація дозволяє порівнювати ланки без зміни основної конструкції стенду.

Кінцевий вантаж моделюється як циліндричний або пакетний елемент, що кріпиться до кінця ланки болтом або фланцем. Його масу можна змінювати, додаючи або видаляючи диски. У CAD-моделі це відображається як змінний компонент, який може бути вимкнений або замінений іншим варіантом.

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів



Рисунок 3.2 – Встановлення та дослідження змінних ланок маніпулятора

3.3 Моделювання галового амортизатора, демпфера і кріплень

Газовий амортизатор у 3D-моделі виконується з двох основних рухомих частин: корпусу і штока. Корпус має циліндричну форму і нижнє вушко кріплення. Шток має менший діаметр і верхнє вушко кріплення. Між корпусом і штоком задається поступальне з'єднання, яке імітує стискання та розтягування амортизатора.

Нижня точка кріплення амортизатора встановлюється на основі або на окремому кронштейні рами. Верхня точка кріплення з'єднується з першою ланкою маніпулятора. В обох точках доцільно передбачити шарнірне кріплення, оскільки під час руху ланки кут між амортизатором і ланкою змінюється.

Для моделювання достатньо прийняти орієнтовні розміри: довжина у розтиснутому стані 250 мм, довжина у стиснутому стані 170 мм, хід штока 80 мм, діаметр циліндра 18 мм, діаметр штока 8 мм, отвори кріплення $\varnothing 8$ мм. Ці значення не є характеристиками конкретного серійного виробу, але придатні для побудови навчальної 3D-моделі.

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових маніпуляторів

Кріплення акселерометрів моделюються у вигляді невеликих монтажних майданчиків або отворів під гвинти М6-М8. Вони повинні бути розташовані так, щоб не заважати руху ланки і кабельному підключенню. Кабелі у моделі можуть бути показані як гнучкі траси або як умовні лінії, що йдуть до блока збору даних.



Рисунок 3.3 – Модель газового амортизатора з розрізом та орієнтовними розмірами

Таблиця 3.2 – Орієнтовні параметри газового амортизатора для моделі

Параметр	Значення	Призначення
Довжина у розтиснутому стані	250 мм	визначення максимальної довжини між вушками
Довжина у стиснутому стані	170 мм	перевірка мінімального положення
Хід штока	80 мм	допустиме переміщення під час руху ланки
Діаметр циліндра	18 мм	зовнішня геометрія корпусу

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

Діаметр штока	8 мм	геометрія рухомої частини
Отвори кріплення	Ø8 мм	підбір пальців або болтів кріплення

3.4 Складання моделі та імітація руху

Після побудови всіх деталей виконується складання моделі. Нерухома основа фіксується як базовий компонент. Далі встановлюється стійка шарнірного вузла, вал, перша ланка, друга ланка, кінцевий вантаж, пружинний модуль, газовий амортизатор і датчики.

Для перевірки руху у Fusion 360 або іншому CAD-середовищі необхідно задати кінематичні зв'язки. Між основою і першою ланкою встановлюється Revolute Joint. Між ланками також використовується Revolute Joint. Між корпусом і штоком амортизатора доцільно застосувати Slider або Cylindrical Joint. Верхнє та нижнє вушка амортизатора з'єднуються з кронштейнами через Revolute Joint.

Після налаштування зв'язків перевіряється, чи не виникають перетини деталей під час руху, чи достатній хід амортизатора, чи не натягуються кабелі датчиків, чи не виходить вантаж за межі безпечної зони. Якщо виявлено перетин або недостатній хід, коригують положення кронштейнів або довжину ланки.

Для демонстрації принципу затухаючих коливань можна створити анімацію руху ланки: 0° , $+20^\circ$, -15° , $+10^\circ$, -6° , $+3^\circ$, 0° . Така послідовність імітує зменшення амплітуди після початкового збурення. У режимі без демпфера амплітуда зменшується повільніше, а у режимі з демпфером - швидше.

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових маніпуляторів

Алгоритм проведення експерименту та обробки даних

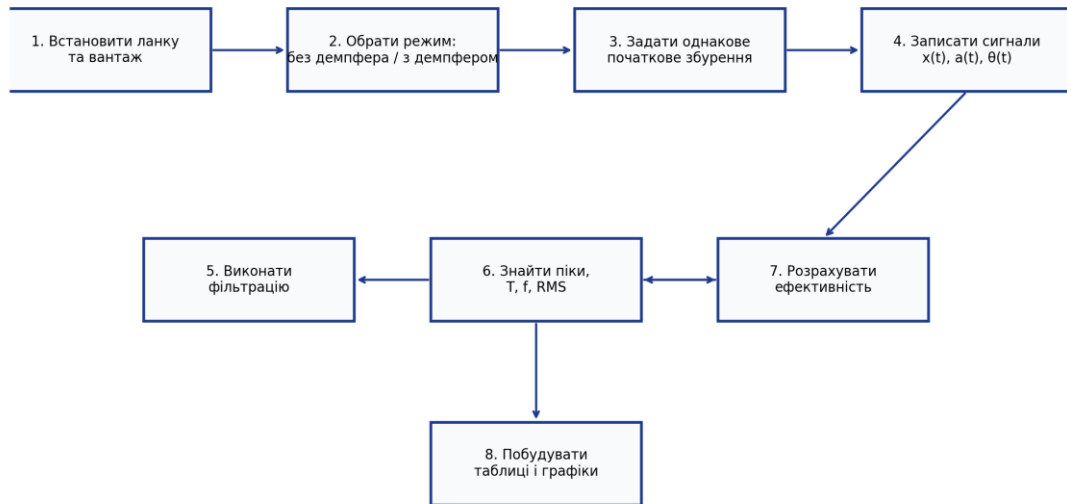


Рисунок 3.4 – Алгоритм проведення дослідів та обробки даних

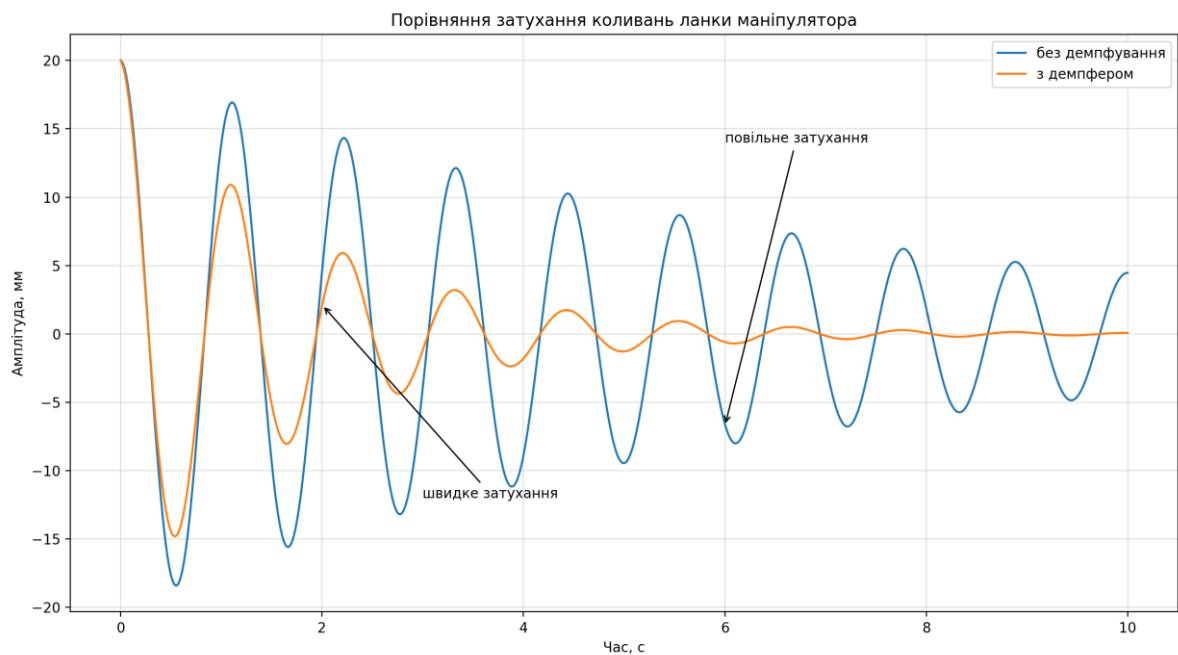


Рисунок 3.5 – Порівняння коливань ланки без демфера та з демфером

3.5 Підготовка моделі до експериментів

Готова 3D-модель повинна відображати не тільки зовнішній вигляд стенду, а й логіку проведення дослідів. Для цього у моделі залишають видимими точки

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

A1-A3 для акселерометрів, точки D1-D3 для демпфера, фланець змінної ланки, змінний вантаж, датчик переміщення, блок збору даних, осцилограф, ПК і аварійну кнопку.

Перед проведенням експерименту у реальному стенді або при демонстрації віртуальної моделі обирається тип ланки, маса вантажу, положення демпфера і місце встановлення акселерометра. Після цього задається однакове початкове відхилення, наприклад 20 мм або відповідний кут повороту, і реєструється реакція системи.

Результати дослідів подаються у вигляді таблиць і графіків. Порівнюються амплітуда, RMS-значення, період, час затухання і відсоткова ефективність зменшення коливань. Якщо демпфер встановлений у точці D3 і забезпечує найменший час затухання, це свідчить про більшу ефективність такого положення для конкретної конфігурації ланки.

Практична 3D-модель також може бути використана для підготовки креслень, візуальних матеріалів до захисту, пояснення роботи газового амортизатора і демонстрації заміни ланок маніпулятора.

Таблиця 3.3 – Приклад програми досліджень на стенді

№	Конфігурація	Змінний параметр	Оцінюваний результат
1	ланка без демпфера	базовий режим	початкова амплітуда і час затухання
2	ланка + демпфер D1	точка кріплення ближче до осі	слабка демпфувальна дія
3	ланка + демпфер D2	середнє плече	середнє зменшення амплітуди

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
 Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
 маніпуляторів

4	ланка + демпфер D3	більше плече	найбільше гасіння коливань
5	довга ланка	довжина ланки	зміна власної частоти
6	посилена ланка	жорсткість конструкції	зменшення деформацій

Висновки до розділу 3

Описано практичний порядок створення 3D-моделі стенду як збірки з окремих компонентів.

Обґрунтовано структуру рухомих і нерухомих вузлів, необхідну для подальшої анімації та перевірки кінематики.

Показано порядок моделювання газового амортизатора, кріплень, змінних ланок і монтажних точок для датчиків.

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ ПРОМИСЛОВИХ МАНІПУЛЯТОРІВ

Четвертий розділ присвячено аналізу умов безпечної експлуатації лабораторного стенду для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових маніпуляторів. Стенд є електромеханічною дослідною установкою, у якій одночасно присутні рухома ланка, змінний вантаж, пружинно-демпфувальний вузол, газовий амортизатор, вимірювальні датчики, блок збирання даних, осцилограф і персональний комп'ютер. Тому вимоги безпеки повинні охоплювати не лише електричну частину, а й механічну стійкість конструкції, обмеження зони руху, правильне розміщення оператора та організацію порядку виконання дослідів.

Особливість досліджуваного об'єкта полягає в тому, що під час експерименту ланка маніпулятора навмисно виводиться з положення рівноваги або отримує короткочасне збурення. Після цього система здійснює вільні або вимушені затухаючі коливання, а їх параметри реєструються датчиками. У таких умовах небезпечними є не тільки привідні елементи, а й інерційний рух вантажу, раптове стискання пружини, зміна довжини амортизатора, розхитування кронштейнів і можливе потрапляння кабелів у зону руху.

Метою розділу є встановлення небезпечних і шкідливих виробничих факторів, визначення організаційних і технічних заходів безпеки, опис дій оператора під час нормальної роботи та аварійних ситуацій, а також виконання інженерної оцінки стійкості стенду і ефективності демпфування. Викладений матеріал може бути використаний як інструктивна частина для лабораторної роботи, пов'язаної з дослідженням механічних коливань промислових маніпуляторів.

4.1 Характеристика лабораторного стенду та умов проведення досліджень

Лабораторний стенд призначений для моделювання динамічної поведінки однієї або кількох ланок промислового маніпулятора та для порівняння ефективності засобів зниження інтенсивності механічних коливань. Конструктивно стенд складається з жорсткої металевої основи, поворотного вузла, змінної ланки маніпулятора, кінцевого вантажу, пружинно-демпфувального модуля, газового амортизатора, змінних точок кріплення демпфера, монтажних місць для акселерометрів і датчика переміщення.

Робочий процес полягає в тому, що оператор встановлює потрібну конфігурацію стенду, закріплює змінну ланку, задає масу кінцевого вантажу, підключає датчики та створює початкове відхилення. Після відпускання ланки виникає коливальний рух, параметри якого надходять до блоку збирання даних. На екрані осцилографа і ПК відображаються сигнали переміщення, кута або прискорення. Порівняння графіків без демпфера та з демпфером дозволяє визначити ефективність зменшення коливань.

З точки зору охорони праці стенд належить до малогабаритного лабораторного електромеханічного обладнання. Незважаючи на відносно невелику потужність, він створює потенційні ризики через наявність рухомих частин, пружних елементів, інерційного вантажу і електронної вимірювальної апаратури. Тому експлуатація стенду має виконуватися за встановленим алгоритмом: огляд конструкції, перевірка кріплень, увімкнення живлення, пробний пуск без контакту з рухомими вузлами, виконання вимірювання, зупинка і лише після цього зміна конфігурації.

До складу вимірювальної системи входять акселерометри, датчик переміщення, енкодер або фотогейт, DAQ/MCU-блок, осцилограф і ПК. Датчики встановлюються так, щоб вони не обмежували рух ланки і не потрапляли в небезпечну зону. Сигнальні кабелі прокладаються вздовж нерухомих частин

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
 Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових маніпуляторів
 стенду, фіксуються стяжками і підключаються до підписаних роз'ємів електронного блока.

Робоче місце оператора повинно бути винесене за межі зони можливого руху ланки. Оператор має спостерігати за процесом із безпечної відстані, керувати збиранням даних за допомогою ПК і мати швидкий доступ до аварійної кнопки. Осцилограф, блок збирання даних і ПК розмішують збоку від стенду, щоб під час аналізу сигналів не потрібно було нахилитися над рухомою ланкою.

Таблиця 4.1 – Склад лабораторного стенду та вимоги безпечного використання

Вузол стенду	Призначення	Основні вимоги безпеки
Металева основа	забезпечує жорсткість і стійкість конструкції	не допускаються перекид, хитання, пошкодження опор або ослаблення болтів
Поворотний вузол	створює вісь обертання ланки маніпулятора	необхідний контроль люфту, мастила та справності кріплення
Змінна ланка	імітує частину промислового маніпулятора	фіксація через фланець, заборона запуску при незатягнутих болтах
Змінний вантаж	формує інерційне навантаження	обов'язкова перевірка фіксатора і обмеження максимальної маси
Пружинно-демпфувальний вузол	створює пружну силу та гасить коливання	контроль ходу, відсутність перекосу, захист від заземлення
Датчики і кабелі	реєстрація переміщення, кута та прискорення	прокладання поза траєкторією руху, підключення за вимкненого живлення
DAQ/MCU, осцилограф, ПК	збирання, візуалізація та обробка сигналів	справна ізоляція, корпус, підписані роз'єми, відсутність перевантаження

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

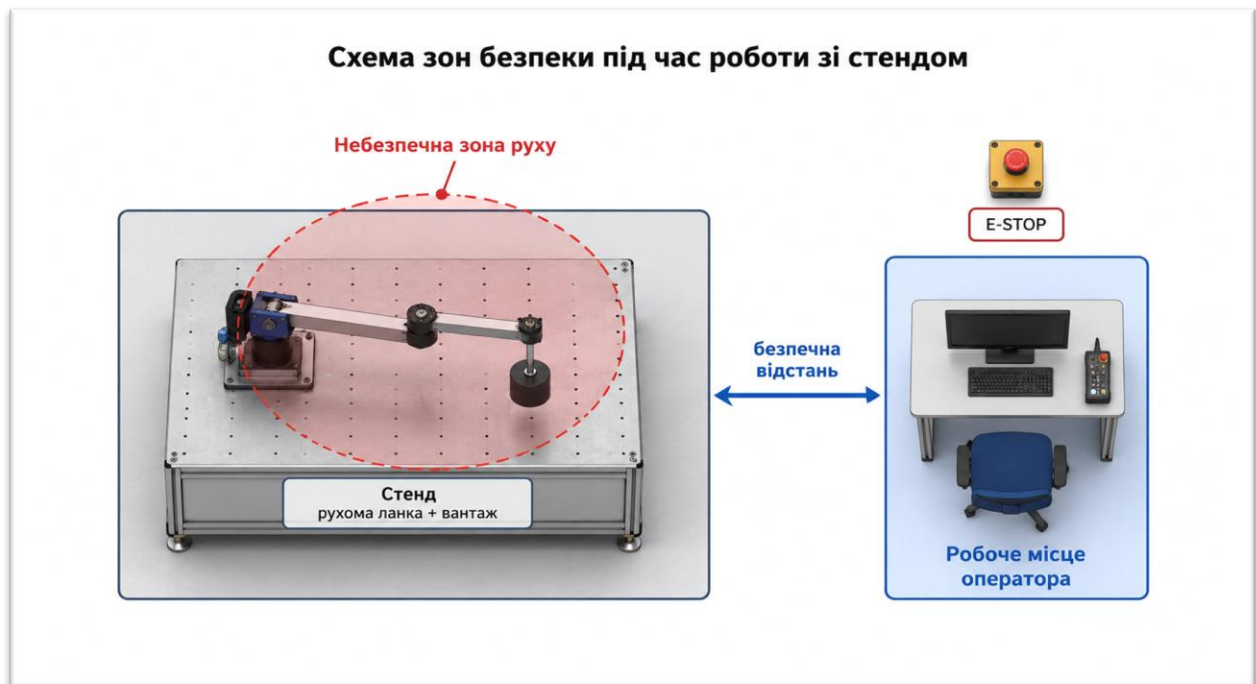


Рисунок 4.1 – Схема зон безпеки під час роботи зі стендом

4.2 аналіз небезпечних та шкідливих факторів

Під час роботи зі стендом виникають небезпечні та шкідливі фактори, які можна поділити на механічні, динамічні, електричні, ергономічні та організаційні. Найбільш суттєвими є механічні фактори, оскільки саме вони безпосередньо пов'язані з рухомою ланкою маніпулятора і змінним вантажем. Якщо оператор наближається до стенду під час коливань, можливий удар ланкою, зачеплення вантажем або защемлення пальців у зоні шарніра.

Механічна небезпека зростає під час заміни ланок, перестановки демпфера, зміни маси вантажу та встановлення акселерометрів. У ці моменти оператор працює безпосередньо біля шарнірів і кронштейнів. Небезпечними є неповністю затягнуті болти, зношені штифти, перекіс фланця, руйнування різьбового з'єднання, а також встановлення вантажу без контрвайки або стопорного елемента.

Динамічні фактори пов'язані з коливальним рухом системи. При збільшенні амплітуди ланка може вийти за межі розрахункової траєкторії,

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

пошкодити датчик переміщення або створити різке навантаження на амортизатор. Якщо частота збурення наближається до власної частоти системи, можливе резонансне зростання амплітуди, що підвищує ризик зміщення стенду на столі.

Окремої уваги потребує пружинно-демпфувальний вузол. Пружина накопичує потенціальну енергію при стисканні або розтягуванні, тому її раптове звільнення може спричинити різкий рух рухомої частини. Газовий амортизатор, у свою чергу, працює як елемент опору руху, але при неправильному встановленні може зазнати бокового навантаження, заклинювання штока або руйнування вушка кріплення.

Електричні небезпеки пов'язані з живленням електронних модулів, осцилографа, ПК і датчиків. Навіть коли датчики живляться від низької напруги 5-12 В, небезпеку становлять короткі замикання, перегрів блока живлення, пошкодження USB-кабелю, контакт оголеного проводу з металевою основою та помилки підключення сигнальних ліній.

Шкідливі ергономічні фактори проявляються під час тривалого спостереження за графіками, налаштування програми збору даних, фіксації результатів і повторення однотипних дослідів. Неправильне розташування монітора, недостатнє освітлення або необхідність постійно нахилитися до стенду спричиняють втому, зниження уваги і збільшення ймовірності помилки оператора.

Таблиця 4.2 – Розширений аналіз небезпечних факторів під час експлуатації
стенду

Фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Заходи запобігання
Рухома ланка	коливальний рух після збурення	удар, защемлення, травмування кисті	зона заборони, обмежувачі ходу, дистанційне спостереження

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

Кінцевий вантаж	інерційна маса на кінці ланки	від'єднання, падіння, різке збільшення моменту	фіксатор, контргайка, контроль маси, пробний пуск
Пружина	накопичення потенціальної енергії	раптове стискання або розтягування	кожух, контроль ходу, відсутність роботи руками в зоні стискання
Газовий амортизатор	опір руху та зміна довжини	заклинювання, руйнування вушка, бокове навантаження	співвісність шарнірів, справні кронштейни, контроль допустимого ходу
Резонансний режим	збіг частоти збурення з власною частотою	зростання амплітуди, зміщення стенду	обмеження амплітуди, аварійна зупинка, віброопори
Кабельні з'єднання	проводи датчиків біля рухомої частини	обрив кабелю, коротке замикання, помилка вимірювання	кабельні канали, стяжки, маркування роз'ємів
Електронний блок	DAQ, MCU, блок живлення	перегрів, замикання, відмова датчика	корпус, запобіжник, перевірка ізоляції, вимкнення перед підключенням
Робота оператора	тривале налаштування і аналіз	зорова втома, помилки під час заміни деталей	перерви, освітлення, порядок дій за інструкцією

Для якісної оцінки рівня ризику доцільно використовувати матрицю, у якій враховуються ймовірність події та тяжкість наслідків. Найвищий рівень ризику мають операції, пов'язані з рухомою ланкою, змінним вантажем і пружинно-демпфувальним вузлом. Середній рівень мають електричні та кабельні фактори.

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
 Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
 маніпуляторів

Низький, але постійний рівень небезпеки пов'язаний із тривалою роботою за ПК та організаційними помилками.

Таблиця 4.3 – Якісна оцінка ризиків під час виконання дослідів

Операція	Ймовірність	Тяжкість наслідків	Рівень ризику	Пріоритет заходів
заміна ланки маніпулятора	середня	середня/висока	підвищений	виконувати тільки при вимкненому живленні та знятій масі
запуск коливань із вантажем	середня	висока	високий	обмежити амплітуду, відійти на безпечну відстань
перестановка демпфера	середня	середня	підвищений	спочатку зняти навантаження, перевірити шарніри
підключення датчиків	низька/середня	середня	середній	виконувати за вимкненого живлення, маркувати канали
аналіз даних на ПК	висока	низька	низький	організувати освітлення і регламентовані перерви

4.3 Заходи забезпечення безпечної експлуатації

Безпечна експлуатація стенду забезпечується поєднанням конструктивних, організаційних та електротехнічних заходів. Конструктивні заходи передбачають використання жорсткої основи, надійних кронштейнів, обмежувачів ходу, центрувальних штифтів, фланцевого кріплення ланки, віброопор і захисної зони. Організаційні заходи встановлюють порядок підготовки, запуску, спостереження, зупинки і зміни конфігурації стенду.

Перед початком роботи оператор повинен оглянути стенд і переконатися, що основа не має перекосу, усі опори контактують із поверхнею столу, ланка закріплена на фланці без люфту, вантаж зафіксований, а демпфер встановлений без бокового перекосу. Після цього перевіряється справність аварійної кнопки, стан кабелів, правильність підключення каналів датчиків і готовність програмного забезпечення до запису сигналів.

Особливо важливим є контроль зони руху. Навколо траєкторії ланки встановлюється небезпечна зона, у межах якої забороняється перебувати під час експерименту. Оператор має розташовуватися збоку, на безпечній відстані, а запуск вимірювання виконувати з ПК або окремого пульта. Якщо стенд використовується під час навчального заняття, інші студенти повинні спостерігати за дослідом поза межами небезпечної зони.

Заміна змінної ланки, перестановка акселерометрів або зміна положення демпфера виконуються тільки після повної зупинки рухомої системи. Послідовність дій повинна бути незмінною: вимкнути живлення, дочекатися зупинки ланки, зняти вантаж, від'єднати датчики, послабити кріплення демпфера, відкрутити фланець, встановити нову ланку, затягнути болти хрест-навхрест і повторно перевірити зазори.

Для зменшення ризику електричних відмов електронний блок повинен бути розміщений у закритому корпусі. Роз'єми необхідно підписати відповідно до каналів вимірювання: A1, A2, A3 для акселерометрів, S1 для датчика

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

переміщення, Е1 для енкодера або фотогейта. Забороняється підключати датчики до невідомих контактів, змінювати полярність живлення або виконувати перемикання при ввімкненому живленні.

Під час виконання досліду оператор не повинен торкатися ланки, вантажу, пружини, амортизатора або кронштейнів. Допускається лише спостереження за графіками та візуальний контроль за поведінкою стану. Якщо виникає нетиповий шум, різке збільшення амплітуди, зміщення стану або обрив сигналу датчика, експеримент негайно припиняється.

Таблиця 4.4 – Контрольний перелік дій перед запуском стану

№	Контрольна дія	Критерій справності	Рішення оператора
1	перевірити положення стану на столі	основа не хитається, опори рівномірно навантажені	допустити до роботи або вирівняти
2	перевірити фланець ланки	болти затягнуті, люфт відсутній	затягнути кріплення при потребі
3	перевірити вантаж	вантаж зафіксований, стопорний елемент встановлений	не запускати без фіксатора
4	перевірити демпфер і пружину	хід вільний, перекошу немає, кронштейни справні	усунути перекошу або замінити вузол
5	перевірити датчики	датчики закріплені, кабелі не торкаються ланки	закріпити кабелі стяжками
6	перевірити аварійну кнопку	кнопка доступна оператору і справна	не виконувати дослід при несправності
7	перевірити програму збору даних	канали підписані, частота дискретизації задана	запустити запис після команди

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

Використання демпфера на стенді має не лише дослідницьке, а й захисне значення. При правильному встановленні він зменшує швидкість руху ланки, обмежує різкі переміщення та скорочує час затухання. Однак сам демпфер не повинен розглядатися як єдиний засіб безпеки, оскільки у випадку неправильного кріплення або перевищення ходу він може стати джерелом додаткової небезпеки.

Таблиця 4.5 – Безпечний порядок заміни ланки і демпфера

Етап	Зміст операції	Небезпека при порушенні	Безпечне виконання
1	зупинка експерименту	рух ланки за інерцією	дочекатися повної зупинки
2	вимкнення живлення	коротке замикання при від'єднанні кабелів	вимкнути блок живлення і ПК-інтерфейс
3	зняття вантажу	раптове падіння або перекіс ланки	тримати вантаж двома руками, зняти стопор
4	від'єднання датчиків	обрив кабелю або пошкодження роз'єму	тягнути за корпус роз'єму, не за кабель
5	послаблення демпфера	раптове зміщення ланки	підтримати ланку, послабити обидва вушка кріплення
6	заміна ланки	падіння деталі, перекіс фланця	використати центрувальні штифти і рівномірне затягування
7	контроль після складання	прихований люфт або неправильна траєкторія	виконати пробне переміщення без збурення

4.4 Ергономіка, надзвичайні ситуації та інженерний розрахунок безпеки

Робоче місце оператора повинно забезпечувати одночасне спостереження за стендом, осцилографом і монітором ПК. Монітор розміщують на відстані 50-70 см від очей, клавіатуру і мишу - у зоні природного положення рук. Оператор не повинен нахилитися над стендом під час руху ланки, тому всі елементи керування, зокрема аварійна кнопка, мають бути доступні з робочого місця.

Освітлення лабораторного місця має забезпечувати чітку видимість шкали, фланцевих кріплень, маркування роз'ємів, положення датчиків і траєкторії ланки. Недостатнє освітлення збільшує ймовірність помилки під час заміни ланки або демпфера. Надмірні відблиски на екрані осцилографа і ПК також небажані, оскільки ускладнюють спостереження за формою сигналу.

Надзвичайна ситуація може бути спричинена механічною несправністю, обривом кабелю, коротким замиканням, надмірним нагріванням блока живлення, неконтрольованим зростанням амплітуди або відмовою датчика. У будь-якому з цих випадків першою дією є припинення експерименту і натискання аварійної кнопки. Після цього оператор повинен дочекатися повної зупинки рухомих частин і тільки потім наближатися до стенду.

Якщо під час досліду виникає сторонній шум, стукіт у шарнірі або помітне розхитування основи, експеримент не продовжують. Система переводиться у безпечний стан, після чого перевіряються болтові з'єднання, стан пружини, цілісність амортизатора, положення вантажу і наявність люфтів. Повторний запуск дозволяється лише після усунення причини несправності.

У разі короткого замикання або займання електронного блока потрібно негайно вимкнути живлення, не торкатися пошкоджених проводів і застосовувати первинні засоби пожежогасіння, придатні для електрообладнання. Під час повітряної тривоги експеримент припиняють, стенд переводять у

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
 Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
 маніпуляторів
 безпечний стан, за можливості зберігають дані, після чого персонал прямує до
 укриття згідно з інструкцією закладу освіти.

Таблиця 4.6 – Дії оператора у типових аварійних ситуаціях

Ситуація	Ознака	Першочергова дія	Подальші заходи
надмірна амплітуда	ланка виходить за межі допустимої зони	натиснути аварійну кнопку	перевірити демпфер, пружину, масу вантажу
ослаблення кріплення	стукіт, люфт, зміна траєкторії	зупинити стенд	затягнути болти, перевірити фланець і штифти
обрив сигналу датчика	на графіку відсутній сигнал або різкий стрибок	зупинити запис	перевірити кабель, роз'єм і канал DAQ
коротке замикання	іскріння, запах нагрівання, вимкнення живлення	знеструмити обладнання	огляд кабелів, блока живлення, роз'ємів
пожежна небезпека	дим або нагрів корпусу	вимкнути живлення	застосувати придатний вогнегасник, повідомити відповідальну особу
повітряна тривога	сигнал оповіщення	припинити дослід	перевести стенд у безпечний стан і пройти до укриття

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів



Рисунок 4.2 – Газовий амортизатор маніпулятора та його елементи

Інженерна оцінка безпеки стенду включає перевірку стійкості, контроль допустимого ходу демпфера, оцінку ефективності демпфування та обмеження амплітуди руху. Стійкість стенду можна оцінити порівнянням стабілізуючого моменту від власної ваги з перекидальним моментом, який створюється горизонтальною інерційною силою рухомої частини.

$$M_{\text{ст}} = G \cdot b, \quad M_{\text{пер}} = F \cdot h, \quad S = \frac{M_{\text{ст}}}{M_{\text{пер}}} > 1,5 \quad (4.1)$$

де $M_{\text{ст}}$ - стабілізуючий момент; G - вага стенду; b - відстань від центра мас до ребра перекидання; $M_{\text{пер}}$ - перекидальний момент; F - горизонтальна інерційна сила; h - висота прикладання сили; S - коефіцієнт запасу стійкості.

Для навчального стенду доцільно приймати запас стійкості не менше 1,5, оскільки під час коливань виникають змінні динамічні навантаження.

Ефективність демпфування визначають за зменшенням амплітуди або середньоквадратичного значення сигналу після встановлення демпфера. Якщо A_0 - амплітуда без демпфера, а A_1 - амплітуда після встановлення демпфера, то відносне зменшення амплітуди визначається за формулою:

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

$$A_A = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100 \% \quad (4.2)$$

Якщо без демпфера амплітуда коливань становила 20 мм, а після встановлення газового амортизатора зменшилася до 8 мм, ефективність зниження амплітуди дорівнює 60 %. Такий результат означає, що демпфер суттєво зменшує інтенсивність механічних коливань і скорочує час стабілізації ланки.

$$\eta_A = \frac{20 - 8}{20} \cdot 100 \% = 60 \% \quad (4.3)$$

Для перевірки допустимого ходу амортизатора необхідно порівняти максимальне переміщення точки кріплення з паспортним ходом штока. Якщо робочий хід амортизатора менший за переміщення ланки в обраному режимі, він може вийти на механічний упор і створити ударне навантаження. Тому положення точок D1, D2, D3 обирають так, щоб під час найбільшого відхилення залишався запас ходу.

$$\Delta l_{min} + \Delta l_{роб} < \Delta l_{max}, \quad \Delta l_{роб} \leq 0,8 \cdot \Delta l_{доп} \quad (4.4)$$

де Δl_{min} і Δl_{max} - мінімальна та максимальна довжини амортизатора; $\Delta l_{роб}$ - робоча зміна довжини під час досліджу; $\Delta l_{доп}$ - допустимий хід штока. Використання запасу 20 % дозволяє уникнути роботи амортизатора на кінцевих упорах і знижує ризик руйнування вушок кріплення.

Таблиця 4.7 – Приклад інженерної перевірки параметрів безпеки стенду

Показник	Прийняте значення	Розрахунок або критерій	Висновок
маса стенду	25 кг	$G = 25 \cdot 9,81 \approx 245 \text{ Н}$	достатня для лабораторної основи
плече стійкості	0,22 м	$M_{ст} = 245 \cdot 0,22 \approx 53,9 \text{ Н}\cdot\text{м}$	створює стабілізуючий момент

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

горизонтальна інерційна сила	20 Н	$M_{\text{пер}} = 20 \cdot 0,45 = 9$ Н·м	перекидальний момент менший
запас стійкості	$S \approx 6,0$	$S = 53,9 / 9$	стенд має запас стійкості
хід амортизатора	80 мм	робочий хід не більше 64 мм	запас 20 % виконується
амплітуда без демпфера	20 мм	базовий режим	потрібне демпфування
амплітуда з демпфером	8 мм	$\eta_A = 60 \%$	ефективність достатня

Таким чином, безпека під час роботи зі стендом забезпечується не одним окремим засобом, а системою заходів: правильною геометрією конструкції, достатньою масою основи, справними кріпленнями, обмеженням амплітуди, контролем ходу демпфера, винесенням оператора за межі небезпечної зони та застосуванням автоматизованої реєстрації сигналів.

Висновки до розділу 4

У розділі охорони праці розглянуто умови безпечної експлуатації лабораторного стенду для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових маніпуляторів. Встановлено, що основними джерелами небезпеки є рухома ланка, змінний вантаж, пружинно-демпфувальний вузол, газовий амортизатор, кабельні з'єднання та електронна вимірювальна апаратура.

Виконано розширений аналіз механічних, динамічних, електричних, ергономічних і організаційних факторів. Найбільший ризик мають операції, пов'язані із запуском коливань, заміною ланки, перестановкою демпфера та роботою поблизу кінцевого вантажу.

Запропоновано технічні заходи безпеки: обмежувачі ходу, фланцеве кріплення зі штифтами, надійна фіксація вантажу, віброопори, аварійна кнопка,

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів
закритий корпус електроніки, маркування роз'ємів і прокладання кабелів поза
траєкторією руху.

Сформовано організаційні вимоги до роботи оператора: попередній огляд
стенду, запуск лише після перевірки кріплень, заборона торкання рухомих
частин, виконання заміни ланок тільки при вимкненому живленні, дотримання
безпечної відстані та фіксація аварійних дій.

Розглянуто ергономічні вимоги до робочого місця, порядок дій у разі
механічної несправності, короткого замикання, пожежної небезпеки або
повітряної тривоги. Наведено інженерні співвідношення для оцінки стійкості
стенду, запасу ходу амортизатора та ефективності демпфування.

Запропоновані заходи дозволяють використовувати стенд у навчальній
лабораторії для демонстрації коливань, роботи демпфера, реєстрації сигналів та
оцінювання методів зниження інтенсивності механічних коливань без
перевищення допустимого рівня ризику для оператора.

ВИСНОВКИ

Сформовано конструктивну схему стенду, яка включає основу, поворотний вузол, змінну ланку, кінцевий вантаж, пружно-демпфувальний вузол, датчики, блок збору даних, осцилограф і ПК.

Пояснено функцію демпфера: він розсіює енергію коливань, зменшує амплітуду і скорочує час затухання ланки маніпулятора.

Обґрунтовано застосування декількох точок А1-А3 для акселерометрів і D1-D3 для демпфера, що дозволяє досліджувати розподіл вібрацій уздовж ланки і вибирати ефективне положення демпфувального елемента.

У третьому розділі виконано практичну частину - описано створення 3D-моделі стенду, моделювання ланок, газового амортизатора, кріплень, датчиків і кінематичних зв'язків у CAD-середовищі.

Розроблено методику підготовки стенду до експериментів, у якій передбачено порівняння базового режиму без демпфера з режимами встановлення демпфера у різних точках.

У четвертому розділі сформовано заходи охорони праці, визначено небезпечні фактори, порядок безпечної заміни ланок і демпфера, вимоги до електробезпеки, ергономіки та дій у надзвичайних ситуаціях.

Запропонований стенд може використовуватися у навчальному процесі для демонстрації принципів механічних коливань, демпфування, автоматизованого вимірювання сигналів і практичного CAD-моделювання елементів промислових маніпуляторів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Timoshenko S., Young D. H., Weaver W. V. Vibration Problems in Engineering / URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/aeronautical-journal/article/vibration-problems-in-engineering-4th-edition-s-p-timoshenko-d-h-young-and-w-weaver-wiley-chichester-1974-538-pp-illustrated-895/F4751EAF3928ADF22E472A4D9C27470A>
2. Den Hartog J. P. Mechanical Vibrations / URL: https://books.google.com/books/about/Mechanical_Vibrations.html?id=IshIAwA_AQBAJ
3. Rao S.S. Mechanical Vibrations / URL: https://books.google.com/books/about/Mechanical_Vibrations.html?id=t6gHswE_ACAAJ
4. Inman D. J. Engineering Vibration / URL: <https://www.mathworks.com/academia/books/engineering-vibration-inman.html>
5. Thomson W. T., Dahleh M. D. Theory of Vibration with Applications / URL: <https://www.chamblinbookmine.com/pages/books/104498/william-thomson-marie-dillon-dahleh/theory-of-vibration-with-applications>
6. Craig J. J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control / URL: https://books.google.com/books/about/Introduction_to_Robotics_Global_Edition.html?id=Bjw1EAAAQBAJ
7. Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot Modeling and Control / URL: <https://www.amazon.com/Robot-Modeling-Control-Mark-Spong/dp/0471649902>
8. Sciavicco L., Siciliano B. Modelling and Control of Robot Manipulators / URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4471-0449-0>
9. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: Modelling, Planning and Control / URL: <https://books.google.com/books/about/Robotics.html?id=jPCAFmE-logC>

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

10. Ogata K. Modern Control Engineering / URL:
https://books.google.com/books/about/Modern_Control_Engineering.html?id=Wu5GpNAelzkC

11. Bolton W. Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and
Electrical Engineering / URL:
https://books.google.com/books/about/Mechatronics_eBook_PDF.html?id=ql1TDwAAQBAJ

12. Гандзюк М. П., Желібо Є. П., Халімовський М. О. Основи охорони
праці / URL: <https://studies.in.ua/bjd-gandzyuk>

13. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила
оформлення / URL:
https://science.kname.edu.ua/images/dok/derzhstandart_3008_2015.pdf

14. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та
правила складання / URL: <https://nv-oneu.com.ua/downloads/dstu-8302-2015.pdf>

15. ДСТУ ISO 128-1:2005. Кресленики технічні. Загальні принципи
оформлення / URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=54573

16. ДСТУ ГОСТ 2.307:2013. Нанесення розмірів і граничних відхилів /
URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60472

17. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. Оцінювання ризиків
та зменшення ризиків / URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71627

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів
ДОДАТОК А

ПРИКЛАД ПОСЛІДОВНОСТІ СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛІ СТЕНДУ

1. Створити основну плиту стенду та задати її габарити.
2. Побудувати стійку шарнірного вузла і ребра жорсткості.
3. Створити вал або вісь поворотного вузла.
4. Змоделювати змінні ланки з однаковою базою кріплення.
5. Додати отвори A1-A3 для акселерометрів і D1-D3 для демпфера.
6. Створити кінцевий змінний вантаж.
7. Змоделювати корпус і шток газового амортизатора окремими компонентами.
8. Задати обертальні та поступальні з'єднання між компонентами.
9. Перевірити рух, хід амортизатора, зазори і відсутність перетинів.
10. Підготувати зображення моделі, креслення і специфікацію деталей.

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів
ДОДАТОК Б

ПРИКЛАД ФОРМИ ПРОТОКОЛУ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Таблиця Б.1 – Протокол дослідження коливань

Режим	Ланка	Вантаж, кг	Точка демпфера	A, мм	RMS	Час затухання, с	η, %
Без демпфера	базова	1,0	-				
Демпфер D1	базова	1,0	D1				
Демпфер D2	базова	1,0	D2				
Демпфер D3	базова	1,0	D3				

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для дослідження зменшення інтенсивності механічних коливань промислових
маніпуляторів

ДОДАТОК В

ПЕРЕЛІК ІЛЮСТРАЦІЙ, ПІДГОТОВЛЕНИХ ДЛЯ РОБОТИ

1. Класифікація методів зниження інтенсивності механічних коливань.
2. Структурна схема навчально-дослідного стенду.
3. Загальний вигляд стенду у лабораторному середовищі.
4. Наочне пояснення роботи демпфера на стенді.
5. Газовий амортизатор на ланці маніпулятора у розрізі.
6. Структура моделі у Fusion 360.
7. Встановлення змінних ланок маніпулятора.
8. Алгоритм проведення експерименту.
9. Графік порівняння коливань без демпфера і з демпфером.
- 10.Схема зон безпеки.