

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(освітній ступінь)

на тему: «Розроблення та дослідження автоматизованої системи аналізу
динамічних характеристик промислового робота»
(комплексна тема)

Виконав: студент (ка) VI курсу, групи КАм-61

спеціальності (напряму
підготовки) 174 «Автоматизація

комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

(шифр і назва спеціальності (напряму підготовки))

Стефанчук М.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Кіт С.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Капаціла Ю.Б.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Козбур І.Р.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Дідич І.С.

(прізвище та ініціали)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Стефанчук Миколі Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Розроблення та дослідження автоматизованої системи аналізу динамічних характеристик промислового робота»

Керівник роботи к.т.н., доцент Капаціла Ю.Б.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «20» листопада 2025 року № 4/7-1007

2. Термін подання студентом завершеної роботи 24 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: кінематична схема та паспортні дані промислового робота; опис умов роботи; вихідні кінематичні та динамічні параметри; параметри системи керування; обмеження та допущення; перелік основних показників, як планується отримати

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналітична частина. Науково-дослідна частина. Технологічна частина. Конструкторська частина. Спеціальна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Блок-схема аналізу даних – 1 аркуш формату А1. Інтерфейс шини та схема декодування – 1 аркуш формату А1. Схема аналогово-цифрового перетворювача – 1 аркуш формату А2; Послідовний порт вводу-виводу – 1 аркуш формату А2. Структурна схема однокристального мікрокомп'ютера Zilog Z8 – 1 аркуш формату А1. Принципова схема аналого-цифрового перетворювача – 1 аркуш формату А1. Функціональна схема аналогових пристроїв AD7581 – 1 аркуш формату А1.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тотосько О.В., доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Теслюк В.О., асистент		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Студент		Стефанчук М.С.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник роботи		Капаціла Ю.Б.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Кіт Софії Богданівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Розроблення та дослідження автоматизованої системи аналізу динамічних характеристик промислового робота»

Керівник роботи к.т.н., доцент Капаціла Ю.Б.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «20» листопада 2025 року № 4/7-1007

2. Термін подання студентом завершеної роботи 24 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: кінематична схема та паспортні дані промислового робота; опис умов роботи; вихідні кінематичні та динамічні параметри; параметри системи керування; обмеження та допущення; перелік основних показників, як планується отримати

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналітична частина. Науково-дослідна частина. Технологічна частина. Конструкторська частина. Спеціальна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Структурна схема системи управління PUMA – 1 аркуш формату А1. Схема вимірювання напруги на серводвигунах – 1 аркуш формату А1. Блок-схема алгоритму збору даних – 1 аркуш формату А1. Блок-схема алгоритму зберігання даних – 1 аркуш формату А1. Блок-схема алгоритму аналізу даних – 1 аркуш формату А1. Результати експериментальних досліджень – 1 аркуш формату А1.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тотосько О.В., доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Теслюк В.О., асистент		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Студент		Кіт С.Б.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник роботи		Капаціла Ю.Б.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи на тему:
«Розроблення та дослідження автоматизованої системи аналізу динамічних характеристик промислового робота»
студентів групи КАМ-61 Стефанчук М.С., Кіт С.Б.

Розрахунково-пояснювальна записка: 122 аркуші формату А4, 34 рисунки, 28 формул, 5 таблиць, 22 літературних джерела, графічна частина – 12 аркушів формату А1.

Мета роботи: дослідити та розробити автоматизовану системи аналізу динамічних параметрів промислових роботів.

Для досягнення поставленої мети виконано завдання:

- вивчено сучасний стан питання, виконано літературний огляд за темою роботи, сформульовано висновки та основні завдання;
- розроблено систему аналізу динамічних характеристик робота;
- вибрано конфігурацію системи;
- вибрано компоненти апаратного забезпечення системи;
- розглянуто схему аналогово-цифрового перетворювача;
- проведено вибір акселерометрів;
- виконано аналіз взаємозв'язків системи збору даних;
- розроблено алгоритм аналізу даних;
- проведено експериментальні дослідження динамічних характеристик робота;
- отримано практичні навички з програмування промислового робота та дослідження його динамічних характеристик.
- розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Методи виконання роботи: економіко-статистичний, графічний, порівняльний, математичного моделювання; теоретико-емпіричний.

Ключові слова: АВТОМАТИЗАЦІЯ, РОБОТ, АЛГОРИТМ, ПРИВІД, ДИНАМІКА

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	1
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Загальна характеристика проблеми.....	10
1.2 Огляд методів дослідження динамічних характеристик промислового робота.....	11
1.3 Огляд літератури в сфері досліджень кінематики та динаміки промислових робітів	17
1.4 Висновки та постановка задач на кваліфікаційну роботу.....	35
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	38
2.1 Загальний опис промислового робота.....	38
2.2 Дослідження кінематики робота.....	41
2.3 Дослідження динаміки робота	42
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	44
3.1 Загальна характеристика системи аналізу динамічних характеристик промислового робота	44
3.2 Конфігурація системи.....	46
3.3 Апаратне забезпечення системи аналого-цифрового перетворювача.....	51
3.4 8-бітна плата аналого-цифрового перетворювача	55
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	60
4.1 Аналіз взаємозв'язків системи збору даних	60
4.2 Збір та зберігання даних	66
4.4 Аналіз рухів робота.....	71
5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	93
5.1 Загальні відомості про програмування промислового робота PUMA 560.....	93
5.2 Послідовність написання програми для робота.....	97
5.3 Програмування робота для дослідження динамічних параметрів	99
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	101
6.1 ОХОРОНА ПРАЦІ	101
6.1.1 Забезпечення умов безпеки праці шляхом механізації і автоматизації технологічних процесів та обладнання	101

6.1.2 Характеристика небезпечних зон обладнання і розробка заходів безпеки..	103
6.1.4 Навчання з питань охорони праці при прийнятті на роботу і в процесі роботи	108
6.2 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	113
6.2.1 Визначення та причини виникнення надзвичайних ситуацій	113
6.2.2 Декларування промислової безпеки та ліцензування діяльності об'єктів ...	114
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ЩОДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	119
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	122

ВСТУП

Останніми десятиліттями швидкий прогрес спостерігається в методах і обладнанні для визначення різного роду характеристик і параметрів автоматизованого устаткування, в основному завдяки швидкому розвитку цифрових і інтегральних схемних технологій, які зробили доступними нові методи і надійні компоненти систем.

Для аналізу динамічних характеристик технічних об'єктів широко застосовуються комп'ютери. Але для цього потрібен попередній збір даних, на основі яких комп'ютер буде діяти. Для отримання цієї необхідної інформації необхідно підключити до об'єкта, який досліджують, який-небудь вимірювальний прилад, щоб можна було визначити фізичні величини. Це означає, що може знадобитися спеціальне обладнання для перетворення вихідних або вимірювальних пристроїв у форму, придатну для комп'ютерної обробки. Крім того, якщо фізичні змінні, що вимірюються, є функціями часу, і, як це зазвичай буває, якщо вони дуже швидко змінюються з часом, процес збору даних повинен бути максимально автоматизований, щоб обладнання збору даних відповідало джерелу інформації за швидкістю.

Останнім часом акцент на використання мікропроцесорної техніки стосовно до «інтелектуальних» методів збору даних значно розширив доступний вибір при проектуванні систем і аналізі даних. Ця кваліфікаційна робота присвячена використанню мікропроцесорних систем в зборі даних для аналізу динамічних характеристик.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Загальна характеристика проблеми

Основне застосування роботів-маніпуляторів в промисловості в даний час полягає в забезпеченні точного повторюваного позиціонування об'єктів або інструментів при складанні або механічній обробці. Використання роботів може звільнити людину від виконання монотонних, некваліфікованих або небезпечних завдань, додаткові переваги швидкості, ефективності, гнучкості та передбачуваної продуктивності роблять промислового робота економічно ефективним засобом для підвищення продуктивності. Однак, щоб отримати максимальний ефект від роботизованої автоматизації, необхідно оптимізувати як вибір конструкції, так і реалізацію керування маніпулятором.

В той час як розробка компактних, високошвидкісних мікропроцесорних систем для прямого керування машинами зробила робот-маніпулятор практичною реальністю, створивши революцію у виробничій промисловості, використання комп'ютерів для моделювання складних систем покращує проектування та розробку нових машин і систем машин.

Оскільки використання комп'ютерів для прямого керування маніпуляторами продовжує залишатися основною сферою розвитку робототехнічної промисловості, застосування комп'ютерів для проектування, оцінки та реалізації роботів і роботизованих систем все ще продовжує розвиватися шляхом автоматизованого проектування, системного моделювання та автоматизованого виробництва. Зокрема, для роботів-маніпуляторів така можливість дозволяє вибрати оптимальні структурні конфігурації та методи керування ще до того, як буде виготовлено перший маніпулятор. З точки зору системи використання моделювання надає можливість виконувати лінійне програмування та оптимізоване планування завдань для максимальної продуктивності та ефективності системи.

Хоча роботизовані маніпулятори існують вже декілька десятиліть, порівняно недавно було розпочато серйозну практичну роботу щодо

використання комп'ютерного моделювання для дослідження і розробки як конструкцій, так і систем управління, пов'язані з роботами-маніпуляторами. Мотивацією для такої роботи було прагнення створення автоматизованого устаткування з нижчою ціною та вищою якістю. Фундаментальною основою для цих розробок є здатність створювати достовірні моделі динамічних характеристик машин і систем керування.

1.2 Огляд методів дослідження динамічних характеристик промислового робота

Промислові робототехнічні комплекси є ключовим елементом сучасних автоматизованих виробничих систем. Вони забезпечують підвищення продуктивності, стабільну якість продукції та зменшення впливу людського фактору. З розвитком високотехнологічного виробництва, зокрема електронної, машинобудівної, авіаційної та автомобільної промисловості, зростають вимоги до точності, швидкодії та надійності роботизованих систем.

Динамічні характеристики промислового робота визначають його здатність виконувати високоточні переміщення в умовах:

- змінних зовнішніх навантажень;
- дії сил інерції під час високошвидкісних рухів;
- контактних взаємодій із середовищем;
- наявності нелінійних електромеханічних ефектів;
- температурних змін під час тривалих циклів роботи.

Класичні підходи – аналітичне моделювання, лінеаризація процесів, експериментальні вимірювання – нині вже не забезпечують необхідної точності, особливо для роботів нового покоління: високошвидкісних маніпуляторів, колаборативних роботів, платформ із гнучкими ланками та складними сервоприводами. Сучасні промислові роботи працюють в режимах, що супроводжуються значними динамічними навантаженнями, тепловими ефектами, нелінійністю електромеханічних елементів, деформаціями конструкцій при різких

прискореннях. Тому традиційні моделі, які враховують лише механічну сторону динаміки, є неповними та не дозволяють адекватно прогнозувати поведінку системи. Традиційні аналітичні методи моделювання, що ґрунтуються на лінійних рівняннях динаміки, поступово втрачають актуальність через складність роботизованих систем нового покоління. Актуальним стає використання інноваційних підходів, які враховують мультифізичну природу роботи маніпулятора, взаємодію мехатронних компонентів та можливість цифрової валідації.

Мультифізичний аналіз (multiphysics analysis) передбачає моделювання роботизованих систем з урахуванням одночасної взаємодії різних фізичних процесів. На відміну від класичного підходу, що описує переважно механічну динаміку, мультифізичні моделі є комплексними та інтегрують:

- механічні процеси;
- електромагнітні явища;
- теплові процеси;
- структурні деформації;
- гідравлічні або пневматичні ефекти.

Таким чином, робот розглядається як повноцінна мехатронна система, у якій зміна параметрів однієї підсистеми викликає відповідну реакцію інших.

Основні фізичні підсистеми моделі мають декілька рівнів.

Механічний рівень включає:

- динаміку ланок;
- сили інерції;
- жорсткість і демпфування;
- коливання та резонансні процеси.

Електромагнітний рівень моделює:

- роботу сервоприводів;
- магнітні втрати;
- поведінку датчиків і енкодерів.

Тепловий рівень враховує:

- нагрівання електродвигунів і редукторів;

- теплову деформацію корпусів і ланок;
- зміну характеристик мастильних матеріалів.

Структурні деформації впливають на точність позиціонування, що є критичним для роботів із довгими або тонкими ланками.

Застосування мультифізичного підходу забезпечує:

- підвищення точності моделювання;
- можливість прогнозування термомеханічної деградації;
- оцінку впливу конструктивних змін на поведінку робота;
- підбір оптимальних параметрів приводів під реальні режими роботи.

В сучасних програмних комплексах (COMSOL Multiphysics, Ansys, Simscape Multibody) мультифізичний аналіз використовується на етапах проектування, симуляції, Застосування мультифізичного аналізу дозволяє значно підвищити точність прогнозу динамічної поведінки робота, оптимізувати конструкцію під реальні режими роботи, забезпечити стабільність і надійність системи.

Одним із провідних інноваційних методів є використання цифрових двійників (digital twins) – віртуальних копій роботизованих систем, що синхронізуються з відповідним фізичним об'єктом у реальному часі. Метод цифрових двійників дозволяє відстежувати стан системи у режимі онлайн; прогнозувати динамічну поведінку та можливі відмови; оптимізувати траєкторії руху та режими роботи; аналізувати взаємодію робота з навколишнім середовищем та змінним навантаженням.

Цифровий двійник (digital twin) – це інтерактивна віртуальна модель фізичного робота, яка синхронізується з ним у реальному часі. Така модель постійно отримує актуальні дані зі сенсорів та систем керування.

Цифровий двійник виконує функції:

- моніторингу стану робота в режимі онлайн;
- прогнозування можливих відмов;
- аналізу динамічних навантажень;
- оптимізації траєкторій з урахуванням реального навантаження.

Поєднання цифрового двійника з мультифізичною моделлю дозволяє:

- створити високоточний цифровий прототип;
- синхронізувати реальні вимірювання з моделлю;
- прогнозувати поведінку робота з високою точністю;
- тестувати будь-які сценарії без ризику пошкодження реального обладнання.

Цей підхід є ключовим для реалізації концепцій Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0.

Впродовж останніх років значного поширення набули методи машинного навчання, які застосовуються не лише для керування роботами, а й для моделювання та прогнозування їх динамічних характеристик.

Методи машинного навчання дозволяють створювати моделі динаміки, які не потребують точного аналітичного опису. Вони здатні наближати складні нелінійні залежності, що пов'язані із:

- рухом ланок робота;
- взаємодією привода з навантаженням;
- зовнішніми збуреннями;
- контактними процесами;
- зношуванням та старінням компонентів.

В робототехніці застосовуються:

- згорткові нейронні мережі (CNN);
- рекурентні мережі (LSTM, GRU);
- трансформерні архітектури;
- моделі стохастичної регресії;
- гібридні моделі «фізика + ML».

ML допомагає:

- прогнозувати крутні моменти в приводах;
- визначати нелінійності, які важко описати математично;
- компенсувати модельні помилки класичних рівнянь;
- виконувати адаптивне керування.

Сучасна високоточна сенсорика дозволяє проводити детальні дослідження динамічних властивостей роботів.

Використовувані системи:

- лазерні трекари – для високоточного вимірювання траєкторій;
- 3D-сканери та високошвидкісні камери – для аналізу руху;
- віброакустичні системи – для виявлення мікроколивань;
- інерційні датчики – для аналізу прискорень.

Сенсорні системи дозволяють валідувати результати мультифізичних та ML-моделей.

На точність моделі динаміки впливають параметри:

- маси ланок;
- моменти інерції;
- коефіцієнти тертя;
- жорсткість та демпфування.

Методи ідентифікації включають:

- субпросторові методи;
- фільтри Калмана;
- генетичні алгоритми;
- градієнтні оптимізаційні методи;
- байєсівські методи.

Коректна ідентифікація є ключовою передумовою точності динамічного моделювання.

Використання графічних процесорів (GPU) забезпечує можливість паралельного виконання великої кількості обчислень, що в десятки разів прискорює симуляцію динаміки роботизованих систем. Це відкриває можливість опрацювання тисяч сценаріїв навантаження, виявлення критичних режимів, автоматизованої оптимізації конструкції та алгоритмів керування. GPU-обчислення особливо ефективні для складних нелінійних моделей з великою кількістю ступенів свободи.

Завдяки використанню GPU стало можливим виконання:

- великомасштабних симуляцій;
- аналізу тисяч траєкторій одночасно;
- оптимізації конструкції робота;

- тестування систем керування у реальному часі.

GPU прискорює симуляцію роботів у десятки разів, що відкриває можливість проведення масових обчислювальних експериментів.

В процесі дослідження динамічних характеристик роботів важливу роль відіграють методи ідентифікації параметрів динаміки робота. Ідентифікація параметрів – це процес визначення фізичних характеристик робота, таких як маса ланок, моменти інерції, коефіцієнти тертя, жорсткість і демпфування. Серед сучасних методів ідентифікації виділяють субпросторові методи, рекурсивні фільтри (наприклад, фільтр Калмана), еволюційні та генетичні алгоритми, байєсівські методи, градієнтні оптимізаційні методи.

Методи Hardware-in-the-Loop (HIL), Software-in-the-Loop (SiL) та Model-in-the-Loop (MiL) дозволяють проводити тестування систем керування та динамічних моделей в умовах, максимально наближених до реальних. Такі методи дають змогу скоротити час і вартість розробки, підвищити безпеку тестування, перевіряти поведінку системи в критичних режимах без ризику пошкодження реального обладнання.

Model-in-the-Loop (MiL) – перевірка математичної моделі. Software-in-the-Loop (SiL) – тестування програмного забезпечення керування. Hardware-in-the-Loop (HIL) – тестування реального апаратного компонента, підключеного до віртуальної моделі.

Переваги:

- підвищення безпеки тестування;
- зменшення вартості експериментів;
- можливість перевірки критичних сценаріїв;
- швидша розробка систем керування.

У межах розділу проведено огляд сучасних інноваційних методів дослідження динамічних характеристик промислових роботів. Показано, що класичні методи моделювання вже не дозволяють отримати достатню точність для роботів нового покоління. Ефективними є:

- мультифізичний аналіз;
- цифрові двійники;

- машинне навчання;
- високоточна сенсорика;
- GPU-обчислення;
- ідентифікація параметрів;
- HiL/SiL/MiL-тестування.

Ці методи забезпечують комплексне дослідження поведінки роботизованих систем, підвищують точність моделювання і дозволяють оптимізувати конструкцію та алгоритми керування у відповідності до вимог сучасної промисловості.

1.3 Огляд літератури в сфері досліджень кінематики та динаміки промислових роботів

Промислові роботи є одним з найпоширеніших засобів автоматизації у виробничому секторі. Для досягнення високого рівня продуктивності необхідно знати різні параметри та характеристики роботів. Сьогодні використовуються різні інструменти для моделювання, моделювання та аналізу робота, щоб допомогти вдосконалити та вдосконалити роботизовані операції.

У контексті зростаючої потреби у зниженні затрат і підвищенні продуктивності особливої актуальності набуло питання широкого використання промислових роботів у автоматизованих виробничих процесах.

Головна проблема, що виникає, – це загальна ефективність роботизованої системи у виробничому процесі. Ключовим питанням ефективності є оптимальність усього набору рухів робота в промислових застосуваннях.

Ще однією ключовою проблемою є їхня низька жорсткість і низька якість досяжної обробки, через що промислові роботи досі рідко використовуються для обробки в промисловості порівняно з машинами з числовим числовим керуванням (CNC). У таких умовах дослідники пропонують стратегії налаштування робота для покращення геометричної точності, а також якості поверхні для обробки промисловими роботами [1].

Промислові роботи широко використовуються в сучасному виробництві завдяки своїй гнучкості, економічній ефективності та багатофункціональності. Однак, коли промисловий робот застосовується в операціях з високою швидкістю видалення матеріалу, наприклад, свердління та фрезерування, навіть якщо невелике збудження механічної обробки може призвести до значної вібрації через його відносно низьку структурну жорсткість. Це може призвести до низької якості поверхні та точності оброблених деталей.

Завдяки значним перевагам промислових роботів у високій гнучкості, економічності, великому робочому просторі, високій повторюваності та багатофункціональності вони широко використовуються в сучасних галузях промисловості, таких як складання автомобілів, промисловість 3С, хімічна промисловість, аерокосмічна промисловість і так далі [1], [2], [3], [4], [5]. На додаток до виконання автоматизованих завдань, наприклад, зварювання, фарбування, пакування тощо, вони з'являються як новий варіант для досягнення операцій з видалення матеріалів для заміни поточних верстатів, особливо для виробництва великих компонентів в аерокосмічній промисловості [6, 7]. Тим не менш, порівняно з верстатами з ЧПК, промисловий робот має набагато меншу жорсткість через особливості структури, тому сили обробки, створювані операцією видалення матеріалу, призведуть до вібрації обробки [8], [9], [10], що обмежує не тільки якість і точність оброблених деталей, але й їх подальше застосування в області високопрецизійне виготовлення. Отже, необхідно вивчити кінематичні та динамічні характеристики промислових роботів для теоретичної основи зменшення рівня вібрації.

Кінематика – це галузь класичної механіки, яка займається дослідженням положення, швидкості та відносної орієнтації точок або тіл. В робототехніці вона використовується для опису руху багатоланкових систем, таких як роботизована рука. Параметри кожного зв'язка, такі як довжина ланки, кут повороту тощо, використовуються для встановлення рівнянь, що описують систему. Ці рівняння є нелінійними за своєю природою і використовуються для кореляції параметрів шарнірів із положенням і конфігурацією робота. Денавіт і Гартенберг використали стандартну методологію для досягнення цієї мети, яка використовує

математичну матрицю для визначення положення одного зв'язку відносно іншого [1].

Кінетичний аналіз роботів також складається з аналізу двох компонентних моделей – прямої кінетичної моделі та оберненої кінематичної моделі. Пряма кінематична модель розглядає властивості зв'язку як вхідні дані і дає нам відносне положення кінцевого робочого органа [8, 9, 10]. Обернена кінематична модель є оберненою до прямої кінематичної моделі, тобто позиція кінцевого робочого органа відома, і ми отримуємо параметри зв'язків роботизованої руки.

Динаміка – це галузь класичної механіки, яка займається вивченням впливу сил на рух об'єкта. В динамічному аналізі роботів ми розглянемо динаміку у зв'язку з прискоренням, навантаженням, масами та інерціями. Щоб прискорити масу, потрібно прикладати на неї силу. Аналогічно, щоб надати масі кутове прискорення, потрібно накласти на неї ненульовий крутний момент.

Значна кількість досліджень кінематики і динаміки промислових роботів проводились компанією Fanuc Robotics. Так, наприклад промисловий робот моделі Fanuc S430-IW широко застосовується у виробництві, дозволяє маніпулювати великими виробами, забезпечує високі швидкості руху, скорочуючи час між операціями. Вантажопідйомність становить 130 кг, а загальна маса робота – 1300 кг, забезпечує переміщення об'єктів на відстань до 2643 мм. Цей робот ідеально підходить для швидких і точних застосувань у будь-якому середовищі [4]. Його широке використання та застосування в автоматизованому виробництві призвели до його вибору з метою ефективного моделювання цього робота на різних платформах [11, 12, 13]. Як видно з рисунка 1.1, роботизована рука – це серійний маніпулятор з шістьма ступенями свободи. Координатні осі для кожної з ланок вказані з дозволим рухом. Якщо обертальне з'єднання позначається як R , то $R \perp R \parallel R \perp R \perp R \perp R$. Модель представлення Денавіта-Гартенберга (D-H) – це дуже простий спосіб моделювання зв'язків і з'єднань роботів, який можна використовувати для будь-якої конфігурації робота. В таблиці 1.1 узагальнено параметри D-H для кожного зв'язку.

В процесі досліджень цього робота для кінетичного аналізу застосували набір інструментів/Simulink MATLAB, а для динамічного аналізу – Robo-

Analyzer, який пропонує зручний і простий у використанні метод аналізу, який також візуалізує рух і відображає траєкторію робочого органа. Така методика забезпечує надання цілісного підходу, який можна адаптувати до різних рівнів.

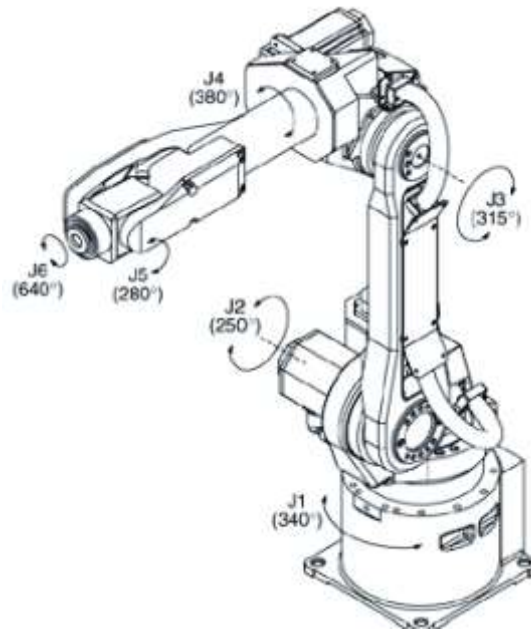


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд та ступені рухомості промислового робота

Таблиця 1.1 – Параметри D-H для FANUC S430-IW

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	d_1	a_1	$\pi / 2$
2	θ_2	0	a_2	2π
3	θ_3	0	a_3	$\pi / 2$
4	θ_4	d_4	0	$\pi / 2$
5	θ_5	0	0	$\pi / 2$
6	θ_6	d_6	0	2π

3D-моделі роботів, такі як, наприклад Fанус, KUKA тощо, присутні на сайтах відповідного виробника, після внесення необхідних змін можна використовувати та імпортувати до додатків комп'ютерного моделювання, таких як модуль Virtual Robot, після внесення необхідних змін. Якщо CAD-модель відсутня, можна спроектувати та додати до VRM за допомогою програмного забезпечення Solid Modelling з необхідним доповненням. Наступна універсальна процедура може бути застосована для кожного роботизованого маніпулятора, якщо CAD не доступний виробником. Необхідно ретельно виміряти всі розміри

кожного зв'язку та змодельовати кожну частину в AutoDesk Inventor, а також перевірити відстань між осями з'єднання за значеннями таблиці DH. Далі потрібно імпортувати CAD частину кожного посилання в AutoDesk Inventor. Зв'язок 0 слід розмістити так, щоб основа збірки була вздовж площини XY. Вставити обмеження між послідовними зв'язками. В кінцевому робочому органі слід розмістити систему координат користувача, яка представляє осі системи, система має бути такою, що напрямок останньої осі з'єднання має бути паралельним осі Z. Точка центру інструменту – це початок координат користувача, який завжди слід розміщувати в центрі інструменту, а потім запустити додаток, який зчитує дані осей з'єднань і визначає параметри D-H. Вхідні дані для Robo-Analyzer будуть у форматі XML. Наприклад, для Fanuc S430-IW з фіксованою базою з такою CAD-моделлю збірка містить сім частин і шість вставок обмежень (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Імпортована CAD модель FANUC S430i у VRS Robo-Analyzer

Визначення орієнтації та положення схвата робота називається прямим кінематичним аналізом [14, 15, 16, 17]. Для моделювання прямого кінематичного аналізу робота зазвичай слід дотримуватися певної методології. По-перше, потрібно пронумерувати зв'язки та з'єднання разом із приєднанням локальних систем координат до кожного зв'язку (рисунок 1.3). Потім встановлюють параметри D-H для кожного зв'язку.

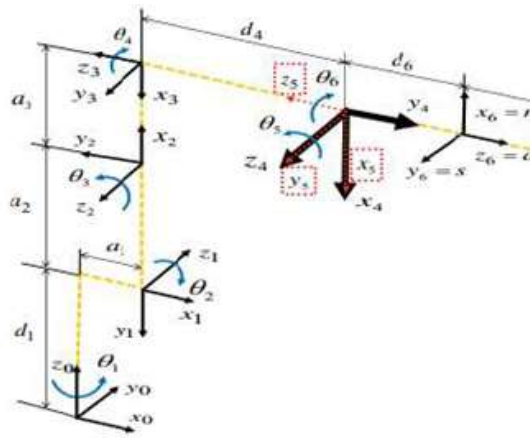


Рисунок 1.3 – Структура кінетичної моделі

За допомогою приєднаних систем (D-H) чотири параметри, що розташовують одну систему відліку відносно іншої, визначаються так: θ_i – це кут між осями x та навколо осі z_{i-1} ; (кут з'єднання), d_i (зсув зв'язку) – відстань від початку координат $i-1$ до осі x_i вздовж осі z_{i-1} ; a_i (довжина ланки) – відстань між z_{i-1} і z_i осі вздовж осі x_i ; α_i (поворот зв'язку) – це кут між осями z_{i-1} і z_i навколо осі x_i . Далі для кожної ланки обчислюють однорідні матриці перетворення, а потім обчислюють кінематичні рівняння маніпулятора. Еквівалентне однорідне перетворення:

$${}^{i-1}T_i(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i) = R_z(\theta_i) \cdot T_z(d_i) \cdot T_x(a_i) \cdot R_x(\alpha_i),$$

де $R()$ і $T()$ – це однорідна матриця перетворень 4×4 .

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i \cdot c\alpha_i & s\theta_i \cdot s\alpha_i & a_i \cdot c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i \cdot c\alpha_i & -c\theta_i \cdot s\alpha_i & a_i \cdot s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Кінематичне рівняння робота, що містить m зв'язків, має вигляд:

$${}^0T_n = \prod_{i=1}^m {}^{i-1}T_i,$$

де ${}^{i-1}T_i$ – однорідна матриця перетворення i відносно системи $i-1$:

$$\begin{aligned}
 {}^0T_6 &= \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & a_1c_1 \\ s_1 & 0 & c_1 & a_1s_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_2 & s_2 & 0 & a_2c_2 \\ s_2 & -c_2 & 0 & a_2s_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\times \begin{bmatrix} c_3 & 0 & s_3 & a_3c_3 \\ s_3 & 0 & -c_3 & a_3s_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_4 & 0 & -s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\times \begin{bmatrix} c_5 & 0 & s_5 & 0 \\ s_5 & 0 & -c_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_6 & s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & -c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Інструментарій робототехніки в MATLAB використовувався для програмного підходу до задачі чисельної прямої кінематики. Інструментарій містить багато функцій, корисних для вивчення та моделювання класичних роботизованих досліджень, таких як кінематичний аналіз, динамічний аналіз і генерація траєкторій [18, 19, 20, 21]. Він надає функції для маніпуляції та конвертації між типами даних, такими як: вектори, однорідні перетворення, крену-тангаж-рискання, кути Ейлера та одиничні кватерніони, які необхідні для представлення тривимірного положення та орієнтації. Robotic Toolbox – це відкрите безкоштовне програмне забезпечення з простим керуванням, що дозволяє легко зрозуміти. [7] . Для створення моделі робота Fanuc S430-IW за допомогою Robotic Toolbox використовуються D-Н параметри з таблиці 1.1 як вхідні дані. Після створення моделі SIMULINK з цього коду з використанням інтегрованої функції з використанням параметрів D-Н, використовується інша функція для певного моментального положення з'єднань, щоб отримати

рівномірну матрицю перетворення, що відповідає останньому ланцюгу маніпулятора. Матриця трансляції, створена цим програмним чисельним підходом, і та, що раніше отримана аналітичним шляхом, дасть однакові результати. Отже, це є прикладом підходу, який можна узагальнити для будь-якого маніпулятора.

Динаміка маніпулятора описується рівняннями руху, тобто способом, яким маніпулятор рухається у відповідь на крутні моменти, що застосовуються приводами, або зовнішні сили. Математика динаміки маніпуляторів послідовних зв'язків із валідними аргументами разом із короткою історією математичної формулювання добре представлені в статтях [8], [10]. Рівняння руху для маніпулятора по осі m задаються формулою:

$$Q = M(\vec{q})\ddot{\vec{q}} + C\left(\vec{q}, \dot{\vec{q}}\right)\dot{\vec{q}} + F\left(\dot{\vec{q}}\right) + G(g),$$

де q – вектор узагальнених координат, що описують позицію маніпулятора;
 G – гравітаційне навантаження;

Q – вектор узагальнених сил, пов'язаних із узагальненими координатами q .

Кінематика та динаміка маніпулятора загалом представлені в наборі інструментів робототехніки через *dyn*-матрицю, яка задається як перший вхідний аргумент динамічних функцій [22, 23, 24, 25]. Кожен рядок показує один зв'язок маніпулятора, а стовпці призначаються відповідно до таблиці 1.1 (D-H Table). Матриця *dyn* фактично є D-H-матрицею, модифікованою з додатковими стовпцями для параметрів маси та інерції для кожного ланка, а також параметрів моторної інерції та тертя. Необхідні моменти з'єднання розраховуються системою *Inverse Dynamics* для досягнення специфікованого стану положення ланки, швидкості та прискорення. Рекурсивна формула Ньютона-Ейлера – це алгоритм, орієнтований на ефіцієнтні матриці, для обчислення оберненої динаміки, реалізований функцією *rne()*. Процес аналізу дуже простий, що ще більше підсилює ідею використовувати це програмне забезпечення разом із MATLAB. Можна ввести часові кроки та час, протягом яких потрібен аналіз, і кнопка зворотного динамічного аналізу виконує це необхідно. На рис. 1.3 зображено

графи, побудовані для динамічного аналізу Fanuc S430-IW за допомогою програмного забезпечення Robo-Analyzer Simulation Software. З рисунку видно, що координати зв'язку 4 і 6 змінюються відносно суттєво з часом. Подібним чином можемо побудувати графіки швидкості та прискорення ланок.

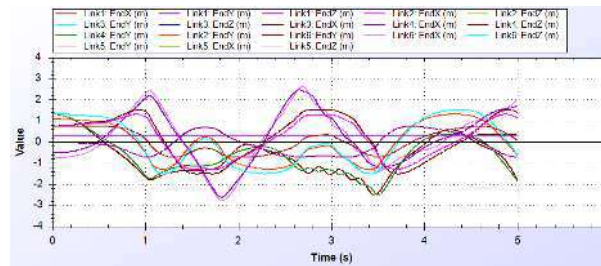


Рисунок 1.3 – Змін координат та зв'язків в часі

Отже, завдяки ретельно методичному аналітичному підходу, підтверджені числовим програмним підходом, розроблено нову процедуру для проведення повного кінетичного та динамічного аналізу маніпулятора.

Не зважаючи на всі переваги застосування аналітичних методів, в процесі дослідження динамічних характеристик робота, в тому числі і з використанням комп'ютерних технологій, важливе місце займає застосування реальних експериментальних даних.

Отримання динамічних характеристик робота за допомогою таких датчиків, як акселерометри, і контроль його вібрації під час обробки є найбільш прямим рішенням [11]. Це ефективний метод, але вимагає додаткового обладнання та висуває надзвичайно високі вимоги до часу відгуку контролера.

Друге рішення зосереджено на оптимізації параметрів обробки в робототехнічних системах обробки [26, 27, 28, 29]. Дослідники вивчали діаграми стабільності процесу різання, а потім використовували їх для визначення оптимальних комбінацій глибини різання та швидкості шпинделя для різних операцій, наприклад, полірування [12], [13], [14], розточування [15, 16], свердління [17, 18] і фрезерування [19, 20]. Безперечно, що ці роботи ефективні, однак це не допомагає зменшити загальну вібрацію обробки. Тим часом цей спосіб ігнорував вплив обробки на робота, що змушує самого робота вібрувати та натомість впливає на якість обробки. Отже, більше уваги слід приділяти самому

роботу та його вібраційним характеристикам під час роботизованої обробки.

Інший підхід, який є більш економічним і здійсненним, полягає у встановленні динамічної моделі робота та аналізі характеристик динаміки. Динамічна модель робота розкриває кількісні зв'язки між структурними параметрами та його залежними від пози динамічними характеристиками, які можна використовувати для попередньої оцінки динамічних характеристик, вібраційних реакцій і, як наслідок, керування придушенням вібрації.

Як правило, методи динамічного моделювання роботів в основному включають метод NE (Ньютона-Ейлера), метод Лагранжа та метод Кейна. Ян та і [21] використовували метод NE у своїй роботі для створення моделі динаміки багатьох тіл робота та зменшили модель за допомогою декомпозиції сингулярних значень для вирішення потенційних проблем сингулярності регресора NE. Дін та і [22] розробили модель динаміки промислового робота з шістьма ступенями свободи (DOF) за методом NE і представили алгоритм оптимізації рою світлячків для оцінки невідомих параметрів. Ібрагім і Халіл [23] представили рекурсивні алгоритми Newton–Euler для гібридних роботів для розрахунку зворотної та прямої динамічних моделей.

Huynh та і [24] використовували метод Лагранжа, щоб отримати модель динаміки шарнірного промислового робота для аналізу його частоти та форми режиму, але вібраційна реакція не задіяна. І лише перші три обертових шарніри робота розглядаються в їх роботі. Rafieian та і [25] встановили динамічні рівняння маніпулятора з гнучким шарніром 6-DOF, використовуючи формулювання Лагранжа для розрахунку динамічної реакції під дією імпульсних сил шліфування та періодично збурених збуджень, де ланки розглядаються як жорсткі тіла, а з'єднання розглядаються як шарніри з обертовою DO Чжан та ін. [26] створив динамічну модель із тертям гібридного робота за допомогою формулювання динаміки Лагранжа, а потім розробив параметри керування, щоб зменшити відхилення руху робота.

Лі та інші створили динамічну модель модульного промислового робота 4-DOF [27] і модульного промислового робота 5-DOF [28] за допомогою методу Кейна, де проводився аналіз і оптимізація кривої крутного моменту в часі. У своїй

роботі всі з'єднання роботів моделюються як поворотні петлі з одним DOF.

Методи використання програмного забезпечення також застосовуються в моделюванні динаміки. Саху та і [29] створили кінцево-елементну модель робота, використовуючи програмне забезпечення ANSYS Workbench, і отримують частоти в трьох різних конфігураціях, які використовуються для виявлення слабких частин робота та оптимізації структури [30, 31, 32, 33]. Ратіу та і [30] розробили віртуальну модель шарнірного робота 6R за допомогою ADAMS і провели його кінематичний і динамічний аналіз, включаючи зміну кінетичної та потенційної енергії мобільних елементів робота, а також зміну сил і крутних моментів у ланках робота. Зручно отримувати динамічні характеристики за допомогою спеціального комерційного програмного забезпечення, але його базовий алгоритм закритий для користувачів, що означає більшу складність у вторинній розробці.

У галузі моделювання динаміки роботів-маніпуляторів із гнучкими компонентами відповідні дослідження здебільшого зосереджувалися на гнучкій ланці та легкому роботі. Чжан та ін. [31], [32], [33], [34] глибоко вивчали динаміку легкого робота з гнучкими елементами, такими як паралельний маніпулятор 3-PRR з гнучкими проміжними ланками, легкі спільні роботи та ефективні методи аналізу динаміки, такі як метод передбачуваного режиму, методи кінцевих елементів і метод дискретної матриці передачі часу на основі прискорення. Для промислових роботів із жорсткою/важкою вантажопідйомністю слід зазначити, що гнучкість з'єднань є основним джерелом відповідності промислових роботів, яка може становити до 50% або навіть 75% від загальної відповідності системи, залежно від розміру роботів [35]. У той час як у попередніх дослідженнях з'єднання промислового робота, як правило, спрощуються як обертове з'єднання з одним DOF, лише навколо його осі обертання, а рух в інших свободах ігнорується. Тому, терміново потрібен підхід динамічного моделювання з точною моделлю ланок і методом аналізу вібраційних реакцій для промислового робота.

Що стосується досліджень, що стосуються випадкової вібрації багатотілових інженерних систем, традиційні методи динаміки багатотілових систем, наприклад, підхід Шилена [36], підхід Шабани [37] і Віттенбурзький

підхід [38] забезпечують потужний інструмент для вібрації дослідження проблем механічних систем. Тим не менш, системне рівняння глобальної динаміки, яке складається з диференціального рівняння, що описує рух, і алгебраїчного рівняння, що описує обмеження, має бути встановлено цими методами. Як тільки механічна структура системи змінюється, рівняння глобальної динаміки системи має бути отримано повторно [34, 35, 36, 37]. Крім того, порядок системної матриці, задіяної в цих методах, різко збільшується зі збільшенням кількості ступенів свободи, що приносить високе обчислювальне навантаження.

Удвадія та інші [39], [40], [41] розробили нову складну структуру моделювання багатоланкової системи, яка розкладала складну систему на підсистеми та використовувала надлишкові DOF для полегшення процедури моделювання, підвищення гнучкості та зменшення загальних обчислювальних витрат. Представлено рівняння Udwadia-Phohomsiri, явні рівняння руху для загальних обмежених механічних систем із сингулярними масовими матрицями. Крім того, пропонується простий і загальний триетапний підхід для встановлення рівнянь руху для складних багатотілових систем за допомогою рівняння Udwadia-Phohomsiri [41]. Однак сингулярні матриці в системних рівняннях руху роблять усі стандартні системні аналізи незастосовними. Теорія узагальнених обернених матриць є ефективним інструментом. Зокрема, для розширення стандартних підходів у часовій і частотній областях [42], [43], [44], [45], [46], [47] було використано структуру рішень на основі матриці Мура-Пенроуза теорії випадкових коливань для врахування лінійних і нелінійних систем з сингулярними матрицями.

У цьому дослідженні динамічна модель промислового робота з гнучкими з'єднаннями 6-DOF побудована з використанням методу матриці перенесення для багатотілових систем (MSTMM) [48, 49], зі значною перевагою, що системне рівняння глобальної динаміки не потрібне, і його залучений порядок матриці нижчий, ніж традиційні методи динаміки [50, 51]. Потім досліджуються природні режими промислових роботів і пропонується метод прогнозування вібраційної реакції. Результати експерименту та моделювання показують, що цей метод ефективний для вивчення роботизованої динаміки.

Останніми роками для підвищення продуктивності та забезпечення відповідного рівня якості були розроблені та впроваджені інноваційні, гнучкі автоматизовані системи складання та обробки з програмованими маніпуляторами та сучасними фідерами. Для оптимізації використання обертових подавачів у роботизованій робочій комірці було запропоновано та експериментально реалізовано правильну техніку планування шляху для універсального маніпулятора, яка складається з двох алгоритмів: одного алгоритму для прогнозування положення рухомої частини, іншого – для кругового відстеження конвеєра. Таким чином, робот може підбирати деталі «на ходу» з стола без необхідності зупиняти обертання [2].

Оптимізація руху робота також виправдовується необхідністю зменшення енергоспоживання, особливо зараз, коли особливий акцент робиться на розробці нових продуктів і виробничих процесів – чистих, екологічних, екологічно чистих. Результати деяких досліджень показують, що енергія, яку споживають промислові роботи, становить близько 8% від усієї електроенергії, що споживається у виробничому процесі, і ці результати призвели до розробки численних досліджень щодо зменшення енергоспоживання промислових роботів. Після таких досліджень було доведено, що оптимізація траєкторії шляхом згладжування руху робота / заокруглення траєкторії призводить до зменшення енергоспоживання [3]. Існують й інші експериментальні дослідження, які показують, що заплановані плавні траєкторії забезпечують кращу оптимальну за часом для руху робота [4].

Після цього, у дослідженні, вимірювали кількість енергії, витраченої на рух промислового робота, і результат був представлений у вигляді кольорової карти навколо робота. З цієї карти ми чітко бачимо, що, тримаючи рух робота якомога ближче до центру ваги, енергоспоживання зменшується [5].

Тому оптимізація руху робота є дуже важливою, і багато дослідників працюють над пошуком оптимальних траєкторій руху робота.

Кінематичний аналіз промислових роботів можна виконувати за допомогою прямої та оберненої кінематики. Хоча прямий кінематичний аналіз добре відомий, а конвенція Денавіта-Гартенберга широко використовується, обчислення

оберненої кінематики є складним і трудомістким через відсутність унікального розв'язку.

Найпоширеніші методи розв'язання оберненої кінематики:

1) аналітичні підходи: метод оберненого перетворення; геометричний метод; метод Піпера;

2) чисельний підхід: метод ітерації;

3) змішаний чисельно-аналітичний підхід для спрощення процесів розв'язання оберненої кінематики: формули з добутком експонент, операції з векторним точковим добутком, та подвійні кватерніони [6].

У дослідженні було показано, що рівняння оберненої кінематики на основі геометричного методу перевершують традиційний метод, можуть заощадити непотрібні обчислення обернених розв'язків, значно заощаджують час і підвищують ефективність. Рівняння оберненої кінематики є основою планування руху, а керування траєкторією роботів – основою для динамічного аналізу [7].

Застосовуючи для оберненої кінематики техніки штучного інтелекту, такої як нечітка логіка, нейронні мережі або адаптивні та гібридні техніки штучного інтелекту, такі як ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Intelligent System), отримуємо перевагу швидких обчислень. Manjaree [8] провів порівняльні дослідження для оберненого кінематичного аналізу, використовуючи метод ANFIS, геометричний/аналітичний підхід та експериментальну валідацію для плоских роботизованих систем 2-DOF (ступінь свободи), 3-DOF і 5-DOF, одна з яких розглядала рух схвата промислового робота.

Для вивчення оберненої кінематики надлишкового маніпулятора переважно використовуються три методи: алгебраїчний, геометричний метод і чисельний ітераційний метод, кожен із яких має свої недоліки. Проблеми, такі як уникнення перешкод у робочому просторі, безпека, споживання енергії та стабільність, не завжди розглядаються і обговорюються. В конкретному дослідженні щодо надлишкового маніпулятора з 6 ступенями свободи для забезпечення безпеки руху та зниження енергоспоживання застосовується вдосконалений алгоритм оптимізації рою частинок (PSO) для оптимізації траєкторії системи стріли. Також демонструється ефективність і перевага покращеної стратегії порівняно з

традиційним методом [9].

Алгоритм PSO з умовами стабільності Ляпунова був використаний в іншому дослідженні для відстеження керування складними траєкторіями, продуктивністю та стійкістю роботизованої руки для реабілітації кінцівок, яку можна легко адаптувати до різних інших об'єктів, розглядаючи модель невизначеності параметрів [10].

Динаміка досліджує сили, необхідні для виникнення руху. Існує кілька паралельних алгоритмів для розрахунку динаміки промислових роботів і кілька підходів до прискорення обчислень [11].

Наразі в багатьох промислових застосуваннях рух робота все ще оптимізується вручну, що є дорогим і схильним до помилок. Тому останніми роками дослідники працюють над алгоритмами пошуку для автоматичного розрахунку оптимальних траєкторій руху робота. Цей підхід виявився досить складним через кілька факторів, таких як надлишкова кінематика, уникнення зіткнень, неоднозначні можливості виконання завдань тощо. [12]

Алатарцев [13], виходячи з припущення, що багато типів завдань забезпечують певну свободу виконання, розробляє дослідження для пошуку значно ефективнішої послідовності завдань. Він пропонує нову та ефективну евристику для розв'язання таких задач, зосереджену лише на оптимізації евклідової відстані, демонструючи її застосовність.

Намагаючись розв'язати проблему інтегрованого послідовності завдань і планування шляхів при дистанційному лазерному зварюванні, Ковач [14] вводить нову модель, фактично розширення відомої проблеми мандрівного комівояжера з районами та тривалими візитами (TSP-ND). Він демонструє за допомогою масштабних обчислювальних експериментів, що новий підхід ефективно розв'язує промислово важливі проблеми і досягає суттєвого покращення часу циклу.

Загалом вважається, що робот має точно слідувати траєкторії кінцевого робочого органа та його закону руху, а точки *via-point* слід відвідувати строго без відхилень [15], щоб отримати оптимізовану траєкторію. На противагу цьому переконанню, Алатарцев у іншому дослідженні, [16], демонструє задачу

оптимізації траєкторії для ефективних завдань, виконуваних промисловими роботами, що також строго дотримується закону руху, що може призвести до значного зниження витрат траєкторії.

Вивчаючи численні підходи, які існують для пошуку відповідної траєкторії робота в певному середовищі, а також їхні переваги та недоліки, деякі дослідники пропонують [17] новий підхід для деформації траєкторій, зберігаючи їхню локальну форму схожою. Цей новий підхід базується на дискретному операторі Лапласа-Бельтрамі, добре відомому в спільноті комп'ютерної графіки, але ще не використаному для робототехнічних задач.

Для планування траєкторії промислового робота в умовах фіксованих і коливальних перешкод у дослідженні використовувалися два інтелектуальні алгоритми оптимізації: непомітований генетичний алгоритм сортування (NSGA-II) та багатоцільова диференціальна еволюція (MODE). Результати дійшли висновку, що техніка MODE є найкращою для задачі багатокритерійної оптимізації, якщо користувач хоче дуже швидко знайти найкраще оптимальне рішення. Крім того, техніка NSGA-II є найкращою для задачі багатокритерійної оптимізації, якщо користувач хоче мати низку компромісів для свого вибору [18].

Резервні роботи мають певні переваги порівняно зі звичайними, недублюючими маніпуляторами, наприклад, розширений робочий простір і вражаючу адаптивність до конкретних завдань.

Резервний робот має потенціал уникати сингулярностей і зіткнень під час роботи в захищених робочих умовах. Хоча маніпулятор із шістьма ступенями свободи може досягати заданої позиції та орієнтації лише обмеженою кількістю способів, завдяки додаванню сьомого з'єднання він може дозволити нескінченну кількість шляхів, уникати перешкод і впливати на правильний вибір [19].

У цьому контексті деякі роботи набули промислового значення, і дослідники розробляють та представляють дослідження з цього приводу. В одному з цих досліджень представлено метод, який, окрім стандартних методів оптимізації, використовує розклад на простір між ланками та обернений кінематичний аналіз для отримання траєкторій з'єднання В-сплайну за мінімальним часом уздовж заданих шляхів простору завдань для кінематично

надлишкових робіт.

Для підвищення гнучкості та маневреності іноді використовують роботів, які мають механізм із високим ступенем свободи, що ускладнює їхній контроль, але полегшує рух на нерівних поверхнях. Існує багато досліджень, які шукають найкращі алгоритми керування рухом ланок робота [21].

Найчастіше використовуваними критеріями оптимізації є планування траєкторії мінімального часу, планування траєкторії з мінімальним ривком, мінімальне споживання енергії або мінімальне зусилля робочого органа, або гібридні критерії, наприклад, мінімальний час і енергія, де існує компроміс між тривалістю шляху та механічною енергією виконавчих механізмів.

В деяких дослідженнях було представлено дослідження часу роботи промислових роботів з урахуванням відповідних економічних результатів. Для розрахунку часу, необхідного промисловому роботу для виконання завдання, порівнюються дві методології, засновані на процедурах оптимізації та моделювання. Методологія оптимізації базується на кінематиці та динаміці промислових роботів. Методологія моделювання базується на роботизованій програмі симуляції під назвою GRASP. Результати показують альтернативні витрати невикористання методології з оптимізованими часовими траєкторіями [22].

У сучасних викликах, спричинених глобалізацією, конкуренцією в світі, а також інші технологічні розробки, комп'ютерні технології та обробка інформації, а також комп'ютеризоване проєктування, моделювання та симуляція відіграють центральну роль [23].

Для промислових роботів розробка траєкторії є частиною проєктування керуючого пристрою, який виконує важливу роль у досягненні зміни положення об'єкта, що маніпулюється. Механізм розробки траєкторії промислових роботів у керуванні виконує ту ж роль, що й плече, рука та передпліччя людини-оператора, тому це також називають «рукою».

Останніми десятиліттями, разом із фізичними прототипами, сучасні технології віртуального прототипування продовжують розвиватися та ставати дедалі потужнішими. Рух будь-якої механічного об'єкта можна моделювати,

оцінювати та оптимізувати у двох або трьох вимірах. Результати можна записувати за допомогою анімаційних інструментів і відтворювати їх у будь-який момент після цього. Два основні типи моделювання руху – це кінематика та динаміка руху [24].

Інструменти симуляції є основою для проектування роботів, їх застосування у складних середовищах та розробки нових стратегій і алгоритмів керування [25].

Динамічна модель робота корисна і необхідна для симуляції його руху, тому немає потреби будувати реальну модель. Дійсна модель, що представляє кінематичні та динамічні властивості робота, допомагає зрозуміти взаємозв'язки між моментами, прикладеними до кожної ланки, і результатом руху робота [20]. На основі динамічної моделі робота можна реалізувати різні моделі керування роботами [21].

За останні роки все більше дослідників провели дослідження у сфері симуляції робототехніки, а більшість комерційних компаній розробили складні програмні пакети для симуляції для своїх продуктів. Наприклад, ROBOLAB – це набір інструментів Matlab для офлайн-моделювання роботів; ROBO – це пакет для робота Mitsubishi Movemaster RV-M1; RPSim – портативний і відкритий пакет для серії роботів Fanuc M-6iB [22]. Інші методи, представлені в літературі для кінематичного та динамічного моделювання, базуються на PRO/E, ADAMS та ANSYS, VC++, DUM у CATIA [21].

Програмний застосунок ADAMS – це сімейство інтерактивних моделювання руху, яке використовується для аналізу поведінки складних механічних систем. За допомогою нього пакету Гоу провів моделювання та змодельовав рух робота, що використовується в процесі зварювання, а також перевінив валідність обернених кінематичних рівнянь на основі геометричного методу [7].

Для покращення моделі динамічної поведінки робота та зменшення помилок положення кінцевого робочого органа було розроблено в середовищі моделювання ADAMS надійну динамічну модель робота, просто починаючи з визначення робота, виконаного через CAD модель.

Публікації 2023-2025 років фокусуються на поєднанні експериментальних

модальних методів з алгоритмічною автоматизацією, автономному виборі зон контролю та на використанні оптимізації із фізичними обмеженнями для отримання правдоподібних динамічних параметрів. Приклади останніх робіт демонструють автономну модальну оцінку з урахуванням випадковості збудження та просторової чутливості системи.

Після короткого огляду літератури щодо кінематики та динаміки промислових роботів можна зробити висновок, що існує значна кількість дослідників, які виконують різні теоретичні та експериментальні дослідження та мають різні підходи у сфері оптимізації та моделювання промислових роботів. Ця робота буде більш ґрунтовною та розвиненою для пошуку найкращого підходу до моделювання та оптимізації промислового робота.

1.4 Висновки та постановка задач на кваліфікаційну роботу

На основі виконаного огляду літератури та джерел з мережі Інтернет, можна зробити висновок, що питання визначення динамічних характеристик вивчено достатньо повно, але, не дивлячись на це, існує ще ряд «вузьких місць» і проблемних ситуацій, які вимагають додаткової уваги.

Актуальність визначення динамічних характеристик промислових роботів є надзвичайно важливою, оскільки ці характеристики безпосередньо впливають на ефективність, точність і безпеку роботи роботизованих систем. Промислові роботи використовуються в різних галузях, таких як автомобільна промисловість, електроніка, харчова промисловість та багато інших, і їх здатність точно виконувати складні завдання вимагає високої якості моделювання та оптимізації динамічних характеристик. Ось кілька аспектів, що підкреслюють актуальність цієї теми.

1. Підвищення точності та якості роботи. Для забезпечення високої точності виконання операцій (наприклад, зварювання, фарбування, монтаж) необхідно точно розуміти і контролювати динамічні характеристики робота, такі як швидкість, прискорення, інерція та сили, що діють на кінцівку

робота. Це дозволяє знижувати відхилення в позиціонуванні і підвищувати якість виконаних операцій.

2. Оптимізація рухів робота. Розуміння динаміки робота дозволяє оптимізувати його рухи, зменшити енергоспоживання та підвищити швидкість виконання задач, що в свою чергу знижує витрати на виробництво і збільшує ефективність роботизованої системи.
3. Безпека. Точні знання про динамічні характеристики дозволяють розробляти безпечніші алгоритми руху, які враховують можливі колізії або небезпечні ситуації, що можуть виникнути під час роботи робота з людиною чи іншими машинами.
4. Моделювання та симуляція. Перед впровадженням робота в реальну виробничу лінію важливо провести моделювання його поведінки в різних умовах. Це дозволяє не лише оптимізувати програмне забезпечення робота, але й знизити витрати на випробування та вдосконалення.
5. Інтеграція з іншими системами. Розуміння динамічних характеристик робота також є ключовим для інтеграції роботизованих систем з іншими автоматизованими лініями або виробничими процесами. Точні дані про рухи робота дозволяють налаштовувати взаємодію між різними елементами автоматизації.
6. Сучасні технології і тенденції. Сучасні тенденції в області робототехніки, такі як використання роботів для виконання складних маніпуляцій, включаючи штучний інтелект і машинне навчання, вимагають точного визначення динамічних характеристик для забезпечення адаптивності та інтелектуального контролю.
7. Розвиток нових типів роботів. Промислові роботи стають все більш складними і різноманітними, включаючи гнучкі роботи, роботи з високою вантажопідйомністю, роботи з екстремальними умовами тощо. Для кожного з таких типів роботів необхідно здійснювати специфічне визначення динамічних характеристик, щоб забезпечити їх ефективне функціонування в заданих умовах.

Таким чином, визначення динамічних характеристик промислових роботів є

основою для створення надійних, ефективних і безпечних роботизованих систем. Це дозволяє не тільки підвищити продуктивність, але й забезпечити зростання технологічного рівня виробництва в цілому.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Загальний опис промислового робота

PUMA 560 – класичний шестиступеневий (6 DOF) маніпулятор, розроблений компанією Unimation. Модель стала надзвичайно популярною в наукових колах і лабораторіях, використовується для досліджень і навчання, оскільки її параметри добре відомі. Вона також отримала застосування в медичній робототехніці: наприклад, використовувалась для біопсії мозку як перший медичний робот. Має 6 поворотних (револьвентних) шарнірів, що дає шість ступенів вільності руху робочому органу: три базових – «плече-лікоть» і три для «зап'ястя». Сферичне зап'ястя (roll-pitch-roll) – класична конструкція для шестиосового маніпулятора.

Концептуально промисловий робот PUMA 560, можна описати як сукупність жорстких тіл або ланок, з'єднаних послідовно обертовими або призматичними (ковзними) з'єднаннями, починаючи зі стаціонарної опорної основи і закінчуючи вільним кінцем, яка тримає схват або робочий інструмент. Відносний рух двох сусідніх ланок, визначає рух цього органа, представляє один ступінь свободи для маніпулятора. Напрямок і величина руху між зв'язками вздовж (призматичне з'єднання) або навколо (обертовий шарнір) осі з'єднання визначають зміщення ланки. Внаслідок цього відносний рух сусідніх ланок можна представити однією незалежною змінною, яку називають змінною з'єднання зміщення. Зібраний набір змінних зміщення ланок, що представляють усі ланки маніпулятора, описує унікальну просторову конфігурацію маніпулятора.

Загальний абсолютний рух окремої ланки визначається сумарними рухами всіх попередніх шарнірів в ланцюгу. Щоб задати абсолютне положення та орієнтацію для будь-якого конкретного зв'язку, усі рухи описуються відносно фіксованої системи відліку, яка називається світовою системою координат. (рис. 2.1) Це особливо стосується схвата маніпулятора, оскільки саме його просторове відношення (положення та орієнтація) щодо відомого положення об'єкта виробництва в системі відліку має першочергове значення для функції

маніпулятора.

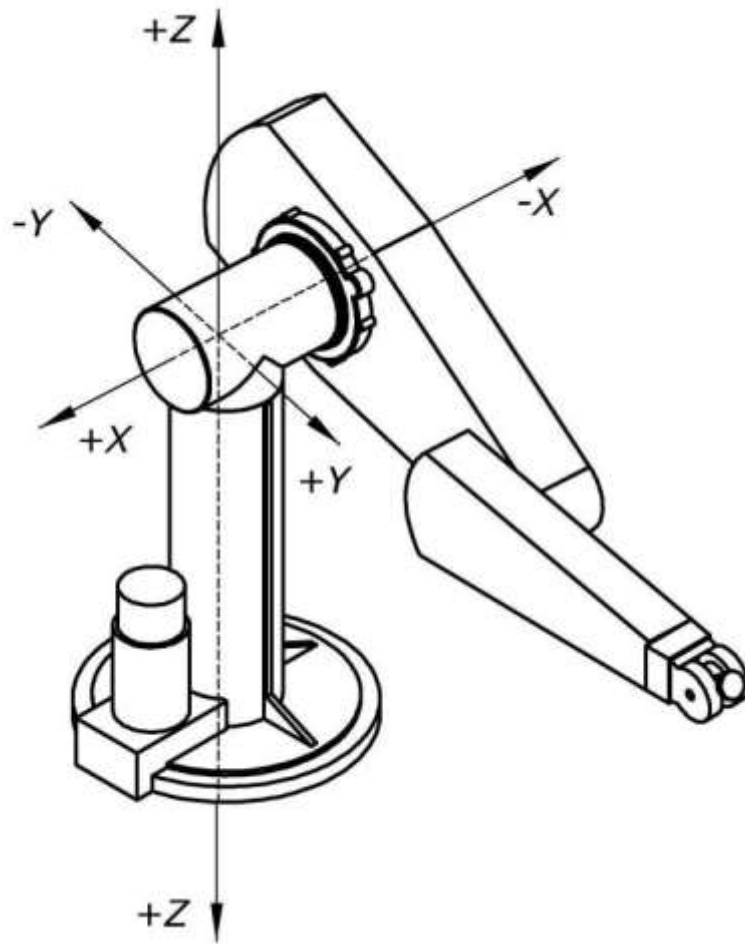


Рисунок 2.1 – Світова система координат робота

Артикуляційна дія робота може бути розділена на два рівні позиціонування або маніпуляції; сегмент руки та сегмент зап'ястя. Ступені рухомості маніпулятора зображені на рис. 2.2.

1-й ступінь рухомості – колона. Двигун першого ступеня рухомості встановлений біля основи колони, закритий металевим корпусом. На валу двигуна встановлено циліндричну шестерню, яка за допомогою шестерні та приводного вала передає обертові рухи до циліндра зубчастого вінця. Він, у свою чергу, з'єднаний з колоною і здійснює її обертання.

Другий ступінь рухомості – плече. Серводвигун і шестерні встановлені позаду ланки між плечем і ліктем. Трансмісія двоступенева. Вал серводвигуна, на якому встановлена шестерня з роликом, обертає ведучу шестерню, встановлену на контрвалу. На іншому кінці проміжного вала розташоване циліндричне зубчасте колесо з роликом, яке обертає кільцеву шестерню, прикріплену до плеча.

3-й ступінь рухомості – лікоть. Третій ступінь рухомості двигуна розташований поруч із другим ступенем рухомості двигуна між плечем і ліктем. Трансмісія двоступенева. Вал серводвигуна з'єднаний еластичним зчепленням з приводним валом, який обертає косу шестерню за допомогою ролика, що обертає контрвал за допомогою ведучої шестерні. На іншому кінці проміжного вала розташоване циліндричне зубчасте колесо, яке обертає зубчасте кільце, прикріплене до передпліччя, і таким чином обертає все передпліччя навколо ліктя.

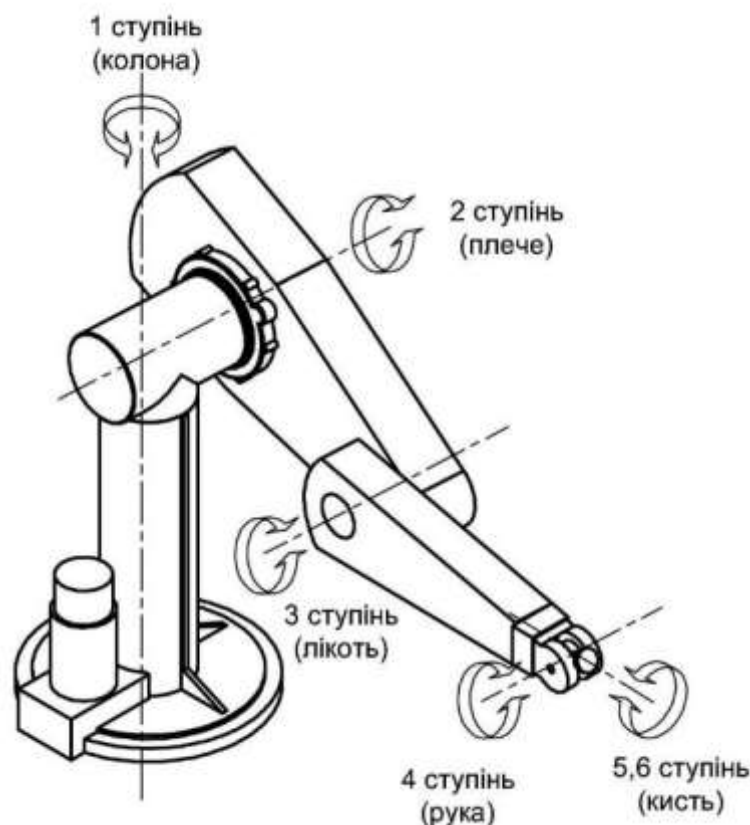


Рисунок 2.2 – Ступені рухомості робота

4-й, 5-й і 6-й ступені рухомості – рука. Двигуни розташовані в передпліччі на лікті. Передача від двигунів до шестерень щітки здійснюється через еластичні муфти та проміжні вали.

4-й ступінь рухливості – обертання руки. Проміжний вал передає обертання двом парам циліндричних коліс із прямим зубцем. Далі обертання прикладається до зубчастого кільця, яке обертає руку.

5-й ступінь рухливості – коливання руки. Передача здійснюється через одну пару циліндричних і одну пару конічних шестерень.

6-й ступінь рухливості – обертання фланця кисті. Передача здійснюється через дві пари конічних шестерень.

Для контролю руху маніпулятора необхідно постійно контролювати положення та швидкість ланок. Для цієї мети потенціометр і імпульсний фотоелектричний сенсор встановлюються в одному комплекті на вал кожного серводвигуна. Обертання датчика здійснюється безпосередньо валом двигуна через ковзне зчеплення. Сигнали від датчиків вказують на положення ланок, і швидкість розраховується на основі цих сигналів.

2.2 Дослідження кінематики робота

Дослідження кінематики маніпулятора стосується геометрії руху маніпулятора у тривимірному просторі, як функції часу, незалежно від сил і моментів, необхідних для спричинення руху. Геометрія робота у тривимірному просторі зазвичай називається його просторовою конфігурацією, яка визначається миттєвими переміщеннями ланок робота. Оскільки кожне значення зміщення ланки представляє один ступінь свободи важелі, вони утворюють незалежні змінні, що описують рух робота як вектор у просторі ланок.

Існує два типи кінематичних задач, пов'язаних із рухом маніпулятора; задача пряма (пряма) та обернена (розв'язок ARM). Пряма задача стосується визначення положення та орієнтації робочого органа (схвата) в системі відліку для набору відомих значень зсуву ланок. Обернена задача вимагає визначення набору значень зміщення ланок (вектор розв'язку у просторі з'єднань), який досягає заданої кінцевої мети. Хоча пряме розв'язання задачі є відносно простим, розв'язок оберненої задачі не є унікальним і зазвичай вимагає ітеративної або геометричної техніки для зближення до конкретного розв'язку.

Оскільки задання руху маніпулятора зазвичай виконується в декартових координатах світової системи координат, а робот керується у просторі ланок, обернене розв'язання задачі частіше всього виконується шляхом комп'ютерного моделювання. Зазвичай це є основою функції планування завдання або траєкторії.

З іншого боку, розв'язок прямої задачі, яка визначає рух між окремими точками, надає необхідну інформацію, з якої можна вивести рівняння руху.

2.3 Дослідження динаміки робота

Дослідження динаміки маніпуляторів виконується з метою:

- розроблення точних методів керування;
- оцінювання продуктивності різних конструкцій і конфігурацій маніпуляторів;
- розроблення реалістичної симуляції руху маніпуляторів.

У всіх випадках основною проблемою є розробка дійсних моделей динаміки системи. Для загального маніпулятора з n ланок базова форма рівнянь руху:

$$J(q)\ddot{q} + V\dot{q} + f(\dot{q}, q; i, j = 1, 2, \dots, n) + g(q) = \tau,$$

де J – матриця моментів інерції;

V – матриця сил в'язкого тертя;

f – вектор прискорення Коріоліса та відцентрових сил;

g – вектор гравітаційного навантаження;

τ – вектор вхідної сили/крутного моменту.

Наведене рівняння може бути дуже нелінійною, неавтономною системою. Причини цього полягають у тому, що сили інерції та гравітації безпосередньо залежать від просторової конфігурації маніпуляторних зв'язків, тоді як прискорення Коріоліса та відцентрових сил залежать від швидкостей шарнірів. Крім того, взаємодія робота з навколишнім середовищем вводить у систему невідомі та/або змінні навантаження.

Оскільки таку систему важко контролювати, більшість сучасних досліджень зосереджені на розробці динамічних рівнянь, придатних для використання як алгоритми керування для підвищення рівня продуктивності сухої реакції маніпуляторів. Загальний підхід до керування такою системою полягає у

розрахунку необхідних рушійних сил або крутних моментів на основі динамічної моделі системи, щоб приводити в дію шарніри маніпулятора відповідно для досягнення бажаної реакції. Головною проблемою, однак, є формулювання рівнянь руху у вигляді, які можна було б багаторазово виконувати в реальному часі в рамках онлайн-алгоритму керування.

Серед доступних методів розробки динамічних моделей найширше використовувалися формулювання Ньютона-Ейлера та Лагранжа-Ейлера. Техніка Ньютона-Ейлера розробляє рівняння руху через набір прямих і зворотних рекурсивних рівнянь, які застосовуються до кожної ланки маніпулятора послідовно для обчислення необхідних рушійних сил або крутних моментів для досягнення набору заданих зсувів, швидкостей і прискорень ланки. Пряма рекурсія поширює кінематичну інформацію від бази до кінцевого робочого органа, тоді як зворотна рекурсія обчислює відповідні сили та моменти, що діють на кожен зв'язок. Важливою перевагою цього методу є те, що рекурсивний характер формулювання та його базування на простих векторних і матричних операціях роблять метод привабливим для реалізації простого керування маніпулятором у спільному просторі змінних.

На відміну від нього, формулювання Лагранжа-Ейлера, яке розробляє явні рівняння змінних стану на основі функції Лагранжа ($L=K.E.-P.E.$), значною мірою опирається на використання однорідних матриць перетворень для оцінки кінетичної та потенційної енергії рухомих ланок. Хоча форма розроблених рівнянь корисна для проєктування та аналізу методів керування із спільними змінними [3], недоліком є те, що необхідний час обчислення дорівнює кубу кількості зв'язків, що робить його непрактичним для використання як алгоритму керування в реальному часі. Хоча нещодавно було запропоновано значні покращення у формулюванні Лагранжа-Ейлера для скорочення часу обчислень, техніка Ньютона-Ейлера залишається найефективнішою. Цей аспект ефективності також важливий для практичної реалізації симуляцій у реальному часі для офлайн-програмування та планування завдань, а також для базового проєктування маніпуляторів.

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Загальна характеристика системи аналізу динамічних характеристик промислового робота

Для розробки повноцінної системи аналізу динамічних характеристик промислових роботів необхідно в першу чергу забезпечити отримання фактичних значень параметрів на ланках робота та перетворити дані у відповідну форму для подальших маніпуляцій за допомогою комп'ютера. Чисельне інтегрування даних прискорення буде виконано для отримання швидкості та переміщення з метою порівняння результатів моделювання та результатів, отриманих у результаті фактичного вимірювання.

Оскільки програма комп'ютерного моделювання використовує функції залежності крутного моменту від часу для кожного двигуна робота як вхідні дані, також необхідно виміряти або встановити фактичні крутні моменти, що виробляються на цих двигунах.

Звичайно, існує більше ніж одна альтернатива для збору та запису даних для аналізу. Найпростішим варіантом є використання аналогового плоттера, але для цього потрібно дані з паперових копій вручну ввести в пам'ять комп'ютера.

Підхід, використаний в цій роботі, полягає у використанні пристрою для оцифрування аналогового сигналу, який мав би вихід у відповідному для комп'ютера інтерфейсі, а саме числові дані, і в той же час здатний записувати дані в електронне середовище для подальшого використання.

Для цього необхідно встановити три акселерометри на схваті робота, як показано на рисунку 3.1, кожен у напрямку декартової координатної осі. Крім того, оскільки важливо оцінити крутні моменти, що розвиваються двигунами в ланках робота, потрібен був той самий сигнал, пропорційний цьому крутному моменту. Тому додаткові сигнали доведеться знімати з контролера робота.

Аналоговий сигнал, вироблений акселерометрами, після фільтрації і апостеріорної буферизації подавався на мікропроцесорний аналого-цифровий перетворювач. Цифровий сигнал попередньо масштабується відповідно до

коефіцієнта підсилення аналого-цифрового перетворювача і форматується для отримання набору даних для зберігання і подальшого використання.

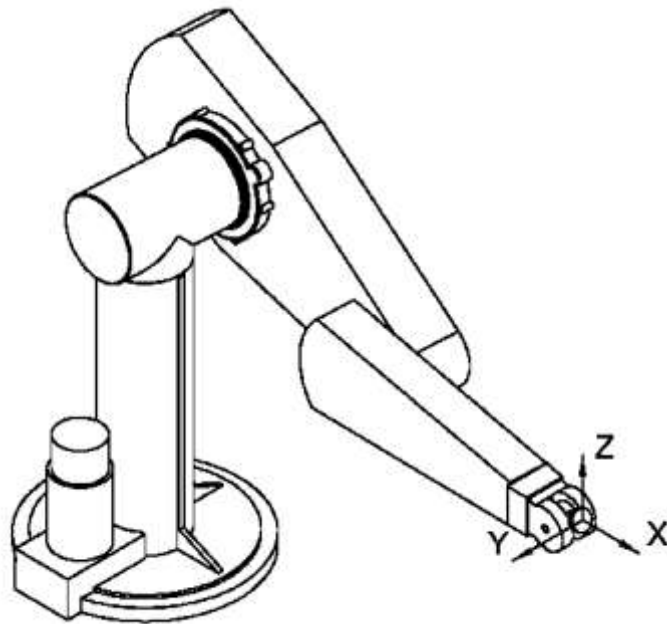


Рисунок 3.1 – Встановлення акселерометрів на промисловий робот

При виборі обладнання для проведення оцифрування розглядалися дві альтернативи. У зв'язку з його безпосередньою доступністю, нижчою ціною та зручністю інтерфейсу, було обрано мікрокомп'ютер MICROMINT Z8 Basic System/Controller та плату аналого-цифрового перетворювача. Підводячи підсумок, можна сформулювати послідовність роботи таким чином.

1. На роботі і схваті встановлено три акселерометри, по одному на кожную вісь координат.
2. З контролера робота знімається електронний сигнал, пропорційний крутному моменту на двигунах на кожному з'єднанні.
3. Рука робота переміщується для збудження перетворювачів, і, як наслідок, отримуються електронні аналогові сигнали.
4. Отримані сигнали піддаються фільтрації перетворюються в набір даних, придатних для використання в комп'ютері.
5. Для збереження даних для подальшого аналізу використовувався пристрій запису.

3.2 Конфігурація системи

У цьому розділі розглядається вибір різних компонентів системи та функції кожного з них в рамках функціонування системи.

Для виконання поставленого завдання необхідні такі компоненти:

- датчики-акселерометри;
- фільтри;
- буферні пристрої;
- плата аналого-цифрового перетворювача;
- персональний комп'ютер;
- блок живлення.

Загальна структурна схема системи зображена на рисунку 3.2.

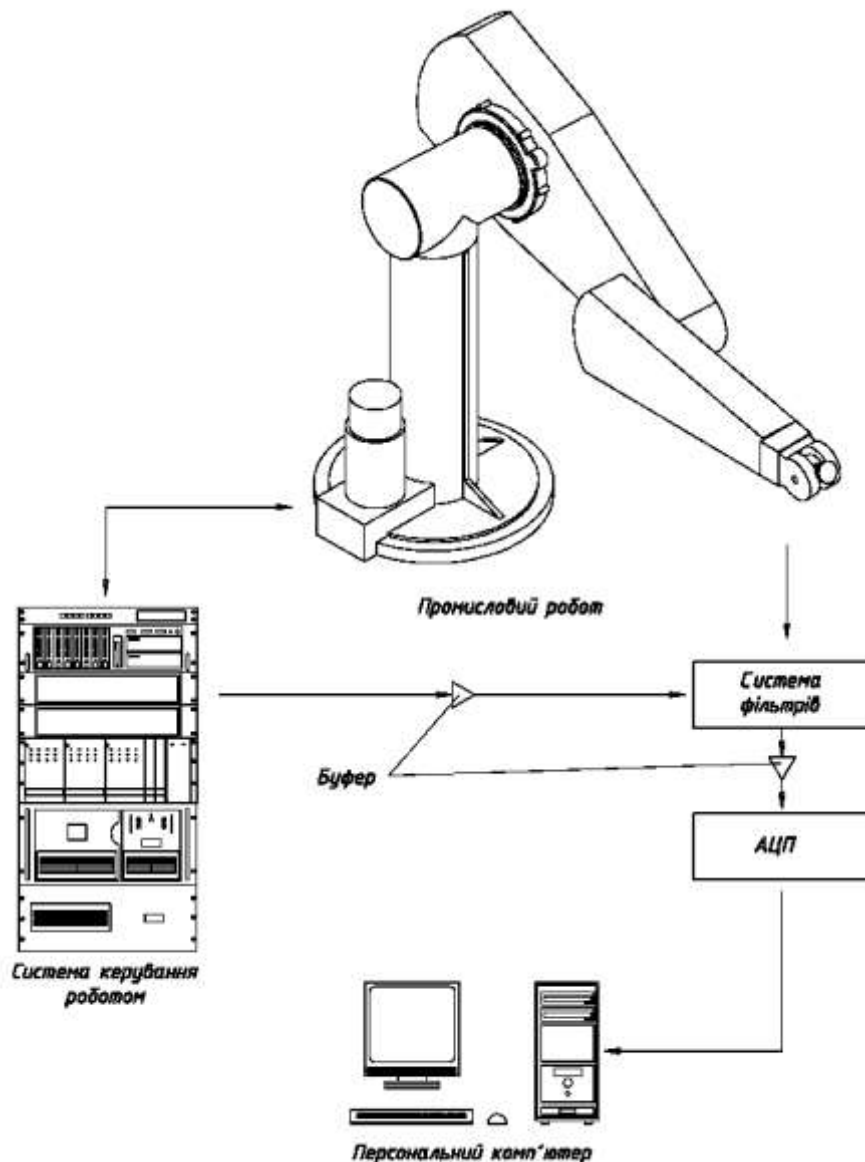


Рисунок 3.2 – Конфігурація системи

Виходячи з структури системи, вимог до неї, умов експлуатації необхідно виконати вибір всіх компонентів системи.

Найважливішим параметром, який слід враховувати при виборі акселерометра, є величина зміни швидкості об'єкта, яку потрібно було виміряти.

Акселерометр вимірює величину цієї зміни в одиницях g ($1g = 9,81 \text{ м/с}^2$). Максимальне прискорення інструменту в роботі PUMA при максимальному навантаженні становить $1g$. Величина $1,5 g$ розглядалася як середнє значення діапазону прискорень робота для зв'язку пошуку потрібного виду акселерометра. Щоб акселерометр міг вимірювати прискорення в цьому досить низькому діапазоні, він повинен мати досить високу чутливість.

Маючи таке уявлення про діапазон прискорень, для яких акселерометри повинні були підходити, були розглянуті інші фактори для вибору одного з декількох можливих варіантів, знайдених в каталогах виробника.

Таблиця 3.1 містить перелік варіантів конструкції, всі виготовлені методом РСВ, які є акселерометрами з високою чутливістю.

З огляду на його найкращу чутливість і роздільну здатність, а також відповідні габарити і відносно невелику масу, був обраний акселерометр типу 308B02.

Таблиця 3.1 – Характеристики акселерометрів

Номер моделі	302B03	308B	308B03	308B02	3930
Чутливість, мВ/g	300	100	50	1000	1000
Чутливість, g	0.0050	0.0020	0.0040	0.0005	0.000036
Діапазон частот ($\pm 5\%$), Гц	1-5000	1-3000	1-3000	1-3000	0.025-800
Діапазон (для виходу $\pm 5 \text{ В}$) $\pm g$	16	50	100	2.50	2.50
Вихідний опір, Ом	<100	<100	<100	<100	<100
Лінійність, % повної шкали	1	1	1	1	1
Маса, г	25	87	55	87	1000
Габарити, мм	16x38	19x38	19x38	19x33	57,2x54
Тип блоку живлення	DK484B	K480B	K480B	K480B	K480B

Для монтажу трьох акселерометрів уздовж трикоординатної осі також був передбачений тривісний монтажний адаптер.

Після вибору акселерометрів, необхідно було якісно дослідити їх вихідний сигнал, щоб визначити, чи потрібна фільтрація чи ні. Один з акселерометрів був

розміщений на схваті робота, і він запускався на декількох швидкостях за допомогою програми. Вихід фіксувався на екрані осцилографа. Чутливість акселерометра була достатньою для виявлення прискорень, що утворюються під час руху вранці. Однак сигнал був забруднений шумом зі співвідношенням сигнал/шум 1/4 і з більш високою частотою, ніж сигнал. Якби смуга пропускання шуму була б ідентичною спектру сигналу, то було б неможливо відрізнити ці два показники. Високочастотний характер шуму дозволив використовувати фільтр низьких частот для належного кондиціонування сигналу. Вибрано фільтр KHRON-Hite моделі 3200 з частотами зрізу високих і низьких частот, що плавно регулюються від 20 Гц до 2 МГц у п'яти діапазонах.

Характеристики загасання фільтра показані на рисунку 3.3.

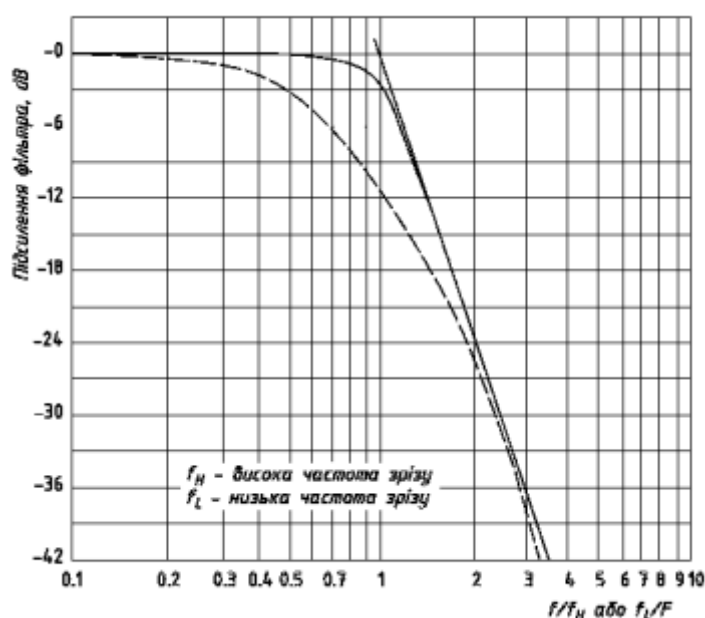


Рисунок 3.3 – Характеристики затухання фільтра

З рисунка видно, що фільтр має ступінь затухання 24 дБ при приблизно двократній частоті зрізу для режиму роботи Баттерворта. За допомогою цього фільтра був отриманий задовільний сигнал, з хорошими характеристиками для оцифровки. Було помічено, що для точного відстеження сигналу прискорення буде потрібна відносно низька частота показів.

Для оцифрування аналогових сигналів, що надходять від контролера і робота, були необхідні також такі основні компоненти системи.

1. Аналого-цифровий перетворювач для дискретизації аналогового сигналу та

передачі його на цифровому виході.

2. Схема інтерфейсу RS-232C, що складається в основному з універсального асинхронного приймального передавача (UART) і драйверів RS-232.

3. Мікропроцесор (ЦП) для керування аналого-цифровим перетворювачем і послідовним інтерфейсом.

Можлива конфігурація плати аналого-цифрового перетворювача показана на рис. 3.4-3.6.

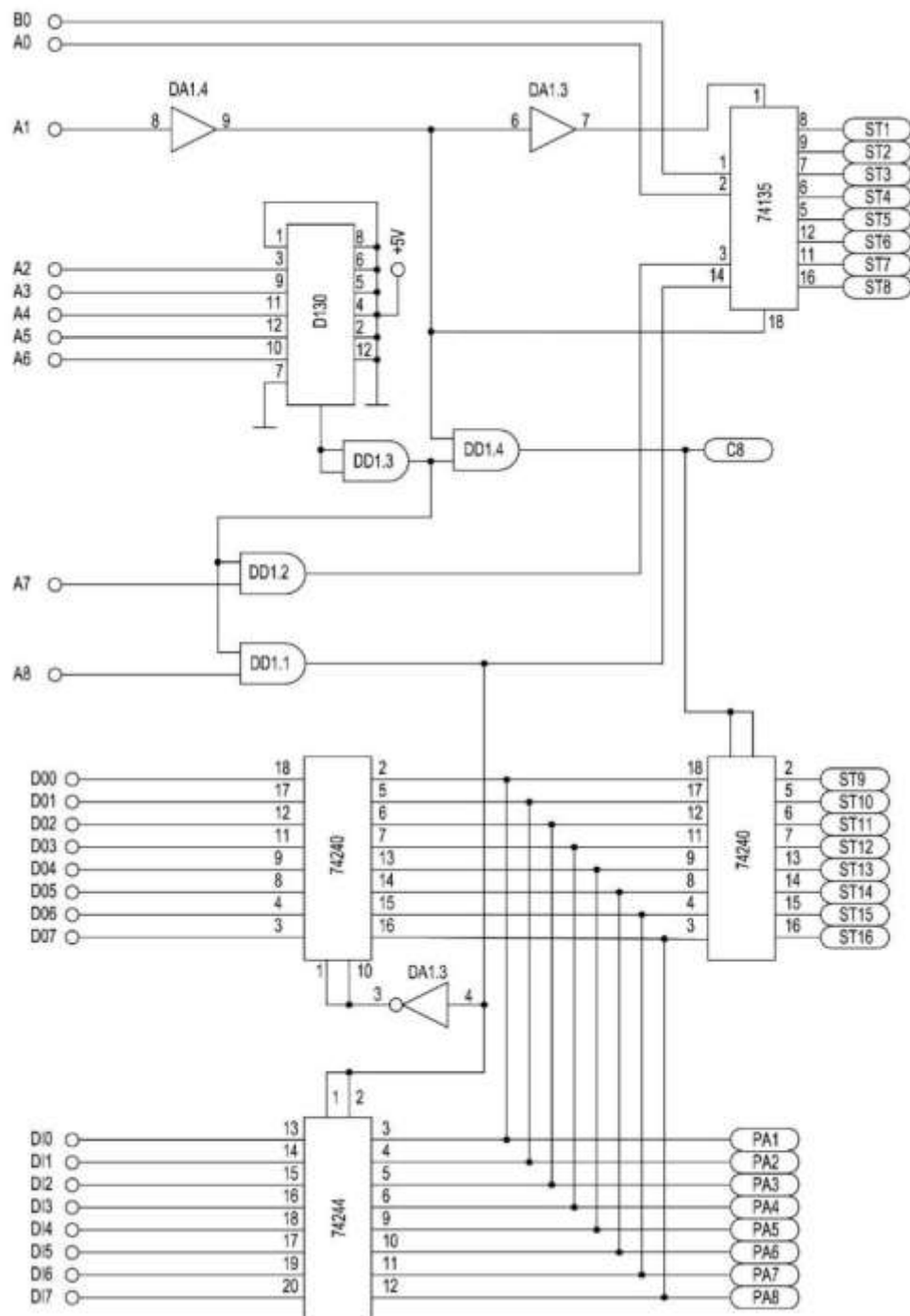


Рисунок 3.4 – Інтерфейс шини та схема декодування

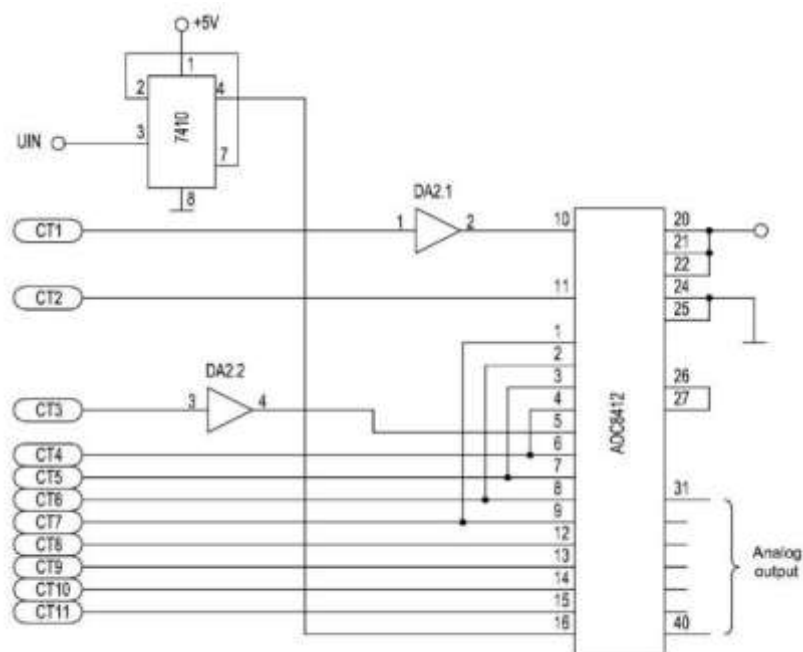


Рисунок 3.5 – Аналого-цифровий перетворювач

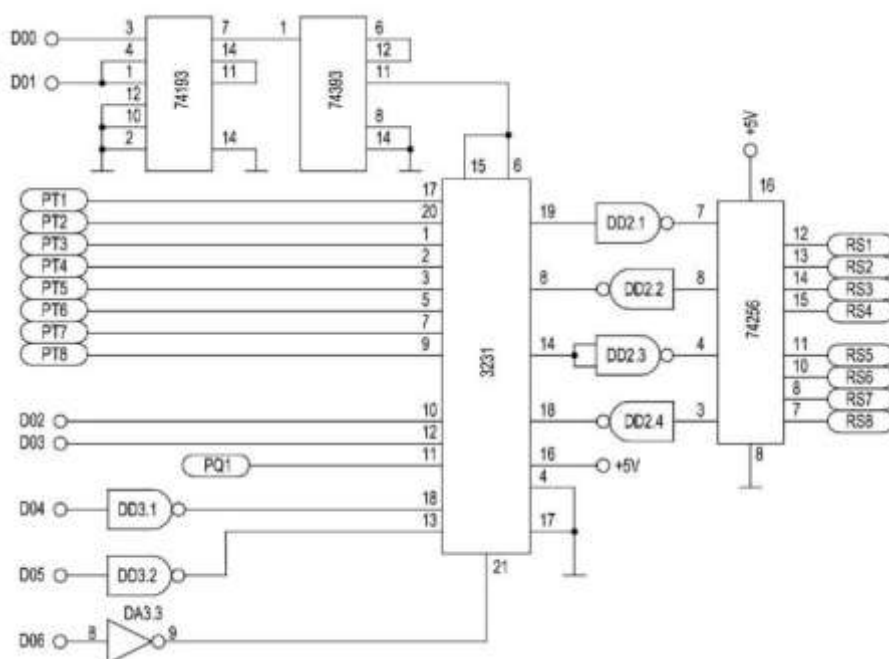


Рисунок 3.6 – Послідовний порт вводу-виводу

Ця інтерфейсна плата дозволяє підключити аналоговий вхідний сигнал, з метою оцифрування, до деякої міні-комп'ютерної системи, наприклад Radio Shack TRS-80 або SD Z80. Ця інтерфейсна плата сумісна з шиною S-100, і її можна вмонтувати безпосередньо в систему HUH Electronics US-80 на S-100 або будь-яку обчислювальну шину S-100.

Плата базового аналого-цифрового перетворювача може контролювати до

восьми аналогових сигналів в одному з двох діапазонів: від 0 до 10 Вольт і від -5 до +5 Вольт. Кожен канал має роздільну здатність 8 біт. 8 вхідних сигналів постійно дискретизуються і подаються на комп'ютер за запитом. Вісім каналів оновлюються кожні 640 мкс, забезпечуючи понад 1000 перетворень на канал за секунду. Плата має карту пам'яті.

Оскільки ця система добре підходить для умов дослідження, а також набагато дешевша і легкодоступна, ніж інші альтернативи, було вирішено використовувати її для виконання роботи.

Як видно з рисунку 3.2, що для спряження джерел аналогових сигналів з платою АЦП використана буферизація. В першу чергу це пов'язано з сумісністю TTL між цими сигналами та електронними компонентами плати. Буферні схеми та взаємозв'язки між джерелом та платою перетворювача змінного струму будуть детально розглянуті далі.

Блок живлення контролера повинен забезпечувати напруги +5 В $\pm 5\%$ 250 мА, +12 В $\pm 5\%$ 30 мА, -12 В $\pm 5\%$ 30 мА.

Для роботи операційних підсилювачів, що використовуються для буферів, необхідно ± 12 Вольт і 20 мА. Для забезпечення такої потужності використовувався блок живлення HEWLETT-PACKARD PS/249.

3.3 Апаратне забезпечення системи аналого-цифрового перетворювача

В цьому розділі розглядаються апаратні характеристики базового системного контролера Z8, які мали відношення до цієї роботи.

Технічні характеристики

Процесор	8-бітний мікрокомп'ютер Zilog Z8671 з оперативною пам'яттю, ПЗУ і вводом/виводом в єдиному корпусі. Включає резидентний інтерпретатор BASIC/DEBUG в ROM, оперативну пам'ять та 32 лінії вводу/виводу. Система працює на тактовій частоті 7,3728 МГц.
Пам'ять	Два вбудовані роз'єми дозволяють використовувати оперативну пам'ять з можливістю розширення.
Ввід/Вивід	Послідовний порт: сумісний з RS-232C і перемикач на

	вибір 110, 150, 300, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200 біт/с. Паралельний ввід/вивід: 2 паралельні порти: один виділений вхід і один бітовий програмований як вхід або вихід. Програмовані лінії переривання; всі сигнали сумісні з LSTIL.
Зовнішні входи/виходи	16-бітна адреса і 8-бітна двонаправлена шина передачі даних, виведена на роз'єм розширення.
Живлення	+5 Вольт $\pm 5\%$ 250 мА. +12 Вольт $\pm 5\%$ 30 мА. -12 Вольт $\pm 5\%$ 30 мА. (Джерела живлення на 12 вольт потрібні лише для роботи RS-232C).
Розміри та підключення	Плата 100 на 63 мм, подвійний 22-контактний роз'єм. 25-контактна розетка RS-232C, 8-полюсний DIP-перемикач або I/O порт, доступ до якого здійснюється за допомогою 9-контактного шлейфу BERG.

Центральним компонентом базового системного контролера Z8 є однокристальний мікрокомп'ютер Zilog 26671. Він містить оперативну пам'ять, ПЗУ та ввід/вивід, а також інші стандартні функції процесора. Цей пристрій відноситься до сімейства Z8.

Архітектура Z8 (рис 3.7) дозволяє йому виконувати дії в додатках з інтенсивним використанням пам'яті або введення-виведення і функціонувати в значній мірі як мікропроцесор.

Під програмним управлінням 28671 може бути сконфігурований як автономний мікрокомп'ютер з внутрішнім ПЗП, як традиційний мікропроцесор з зовнішньою пам'яттю, або як паралельний елемент обробки з іншими комп'ютерами.

На рисунку 3.8 показані функції та призначення контактів 28671.

Як видно з рисунку, 32 лінії вводу/виводу згруповані в 4 порти. Вони програмно налаштовуються як для вводу, так і для виводу, і сумісні з LSTTL. Порт 1 і порт 0 використовувалися в цій програмі як мультиплексована шина адреси/даних для зв'язку із зовнішньою пам'яттю та платою A/D Converter. Порт 1 живив сигнали шини даних D0-D7 і шини адреси АО-A7. Порт 0 забезпечував решту адресних ліній А8-A15 загальною кількістю 16 біт. Це дозволяє безпосередньо адресувати загалом 62 тисячі байт програмної пам'яті.

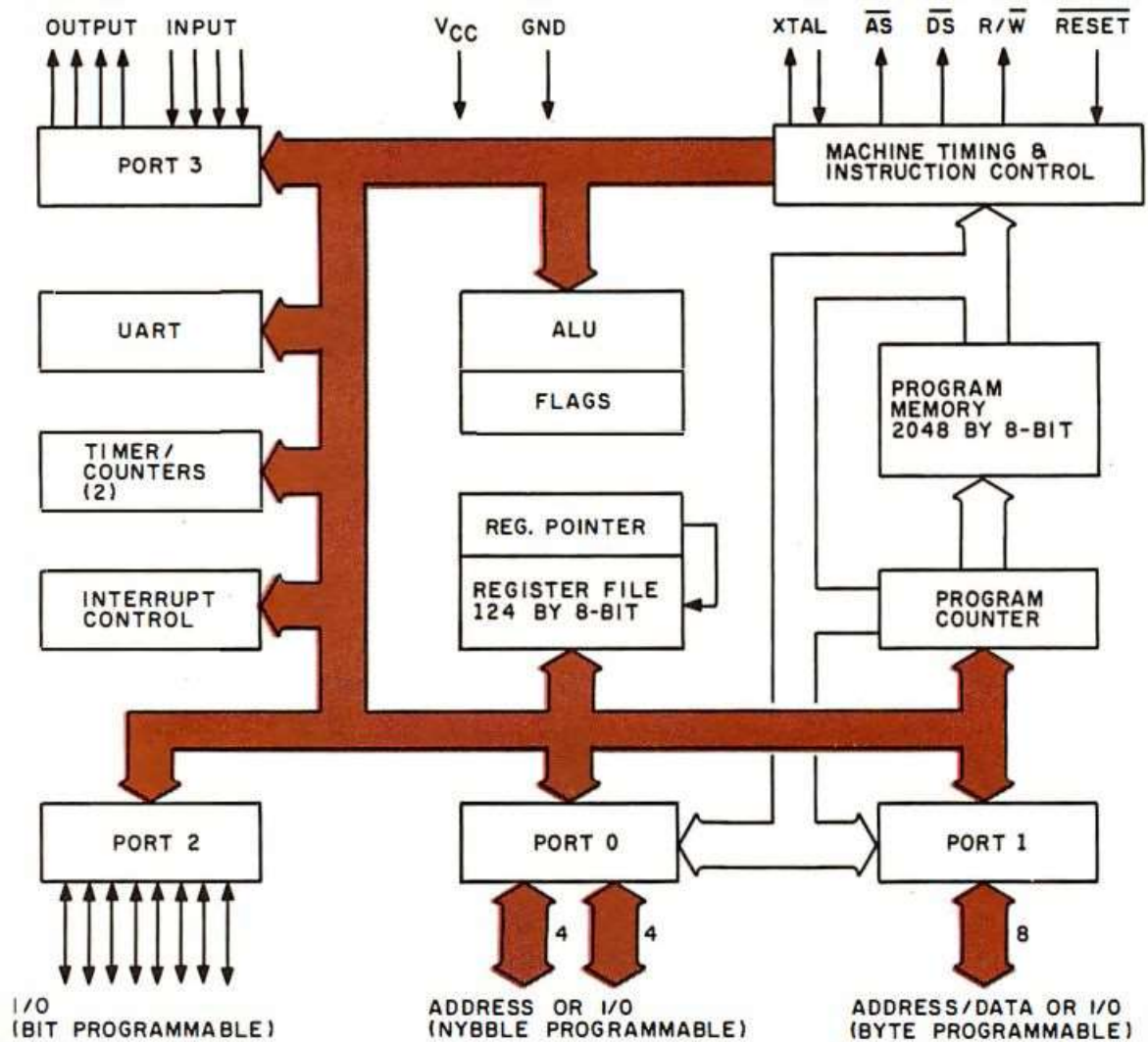


Рисунок 3.7 – Структурна схема однокристального мікрокомп'ютера Zilog Z8

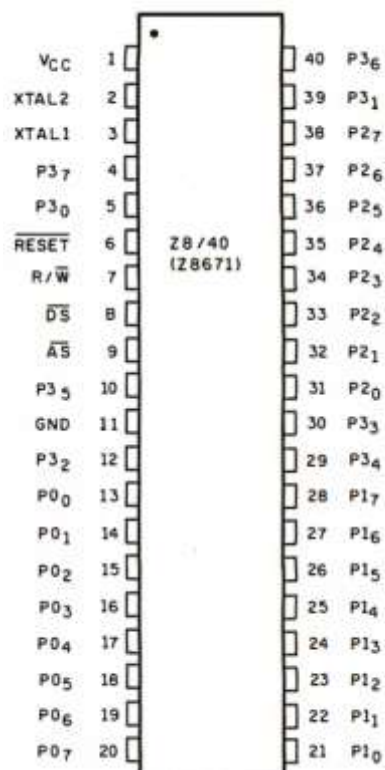


Рисунок 3.8 – Призначення виводів Z8671

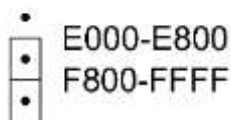
Для зв'язку Z8671 містить повнодуплексний універсальний асинхронний приймач/передавач (UART) і два лічильники/таймери з подільниками частоти (прескалерами). Послідовні дані надходять через біт 0 порту 3 і передаються з біта 7 порту 3. В той час як контролер Z8 Basic System Controller може бути налаштований на парну або непарну парність, Z8671 попередньо налаштований на 8 біт даних, без парності та 2 стоп-біти. Отримані дані завжди повинні мати 8 біт даних, не менше 1 стоп-біта і не мати парності.

Система має два 24-контактні роз'єми пам'яті. Їх можна окремо налаштувати для використання ПЗП або ОЗП. У цьому випадку було використано дві оперативні пам'яті 2К 2016, оскільки для збереження оцифрованих даних потрібен був обсяг пам'яті.

Конкретну конфігурацію пам'яті слід встановити за допомогою переминок конфігурації пам'яті. На платі контролера системи Z8 Basic доступні 4 перемикачі. Вони використовуються для вибору адрес і типу пам'яті, що використовуються в сокетах RAM/ROM, а також діапазону адрес порту вводу/виводу, що відображається в пам'яті.

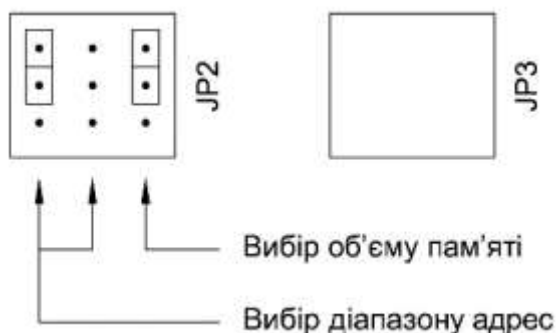
Для цієї програми перемикачі були налаштовані таким чином:

JP1 – діапазон адрес портів з підтримкою пам'яті:



Порт вводу/виводу з 8-бітною пам'яттю відповідає на будь-яку адресу у вибраному діапазоні.

JP2 – конфігурація роз'єму пам'яті IC 10.



JP3 – Конфігурація роз'єму пам'яті IC11.

JP4 – Розширений вибір мікросхеми ПЗУ (опціонально).

Швидкість послідовного зв'язку на платі системного контролера Z8 встановлюється за допомогою перемикачів швидкості передачі даних. Налаштування перемикачів для різних швидкостей передачі даних такі:

Швидкість передачі даних	SW1	SW2	SW3	SW4
110	ON	OFF	OFF	N/A
150	ON	ON	ON	N/A
300	OFF	OFF	OFF	N/A
1200	OFF	ON	OFF	N/A
2400	ON	ON	OFF	N/A
4800	OFF	OFF	ON	N/A
9600	ON	OFF	ON	N/A
19200	OFF	ON	ON	N/A

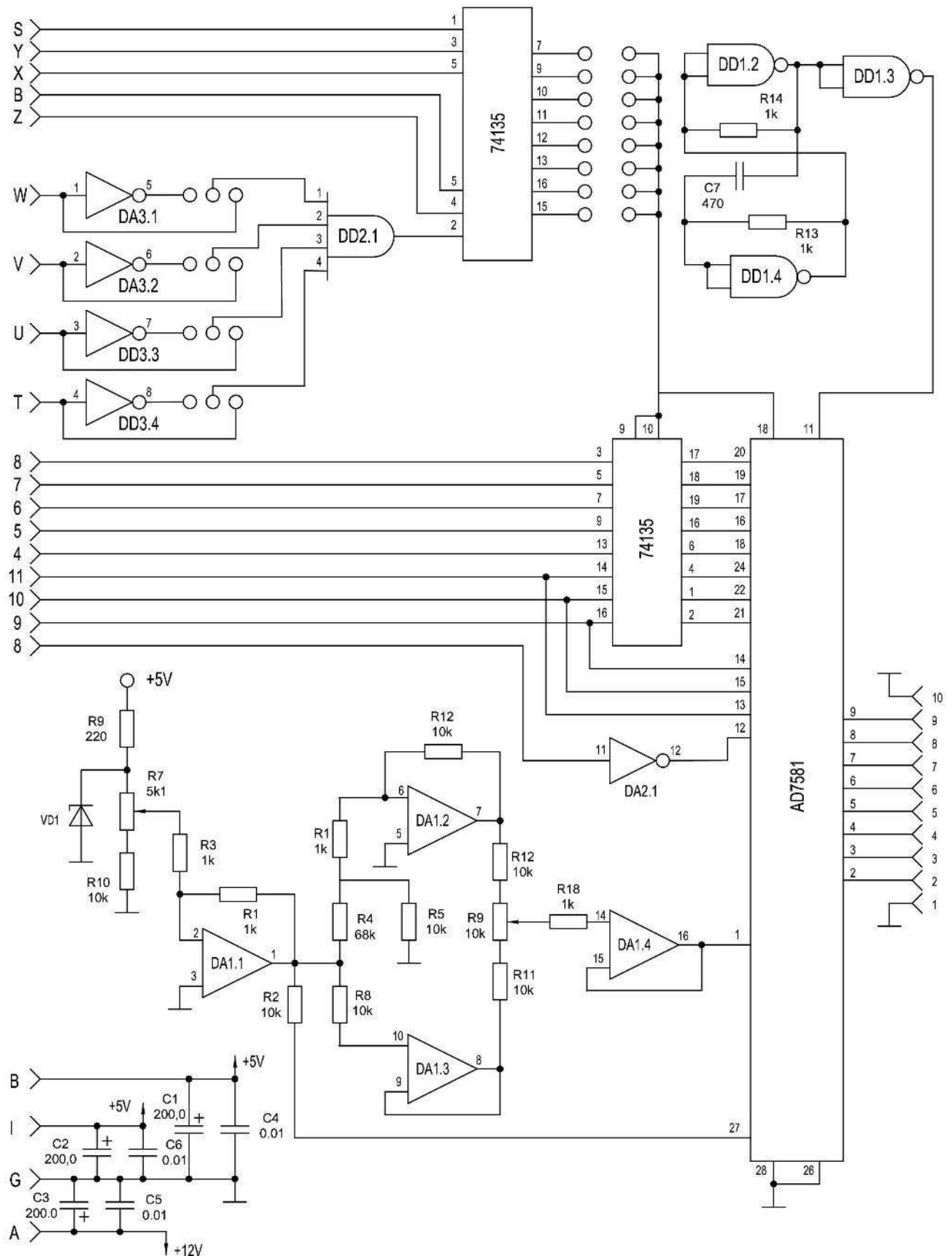
3.4 8-бітна плата аналого-цифрового перетворювача

Плата аналого-цифрового перетворювача MICRONINT – це 8-канальний пристрій, призначений для використання з платою контролера базової системи Z8. Він надає можливість моніторингу до 8 аналогових сигналів в одному з двох діапазонів: 0-10 В і ± 5 В. Кожен канал має 8 бітну роздільну здатність. Оскільки плата A/D Converter має доступ до пам'яті, програми на мові асемблера BASIC/DEBUG і Z8 можуть легко отримати доступ до неї. Для конфігурації A/D плати не потрібні спеціальні підпрограми. Він забезпечує понад 1000 команд на канал за секунду. Аналогові сигнали підключаються до плати A/D через десятиконтактний роз'єм Molex.

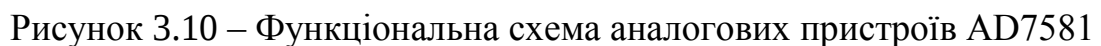
На рисунку 3.9 представлена принципова схема аналого-цифрового перетворювача.

A/D Converter AD7581 – це мікропроцесорна сумісна 8-бітна, 8-канальна система збору даних з буферизацією пам'яті на монолітному CMOS-чіпі. На рис. 3.10 показана функціональна схема мікросхеми. Як видно на рисунку, вона

складається з 8-бітного A/D перетворювача послідовного наближення, 8-канального мультимплексора, двопортового РАН 8х8, тристанційних драйверів DATA (для інтерфейсу), адресних засувок і сумісної з мікропроцесором логіки управління.

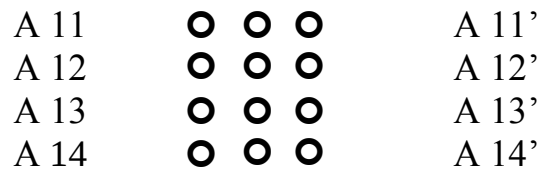


Послідовне наближення відбувається в безперервній послідовності з використанням мікропроцесорного керуючого сигналу для тактової частоти. Дані автоматично передаються в двопортову оперативну пам'ять 8x8 в кінці кожного перетворення. Перебуваючи під мікропроцесорним управлінням, операція ЧИТАННЯ ДАНИХ дозволена в будь-який час часу для будь-якого каналу, оскільки логіка на кристалі забезпечує пряму адресацію пам'яті (DMA). Цей чіп може взаємодіяти з мікропроцесорними системами, які мають загальні або розділені шини адрес і даних.



57

(мікросхема AD7581). Конфігурація перемички викладається на платі таким чином.



A 11' позначає обернену адресну лінію A11 і т. д.

Існує шістнадцять можливих комбінацій перемичок.

Для цієї програми перемичка базової адреси була виконана таким чином:



Тоді базова адреса плати буде D0XX.

Другий набір адресних перемичок розташований по центру плати, біля 10-контактного роз'єму Molex. Цей перемичка дозволяє вибрати одну з 8 підадрес, які може підтримувати кожна базова адреса. Для надання цих підадрес використовуються адреси A8-A10.

Отже, адреса для восьми каналів плати A/D Convertor буде такою:

КАНАЛ	АДРЕСА (шістнадцяткова)
1	D000
2	D001
3	D002
4	D003
5	D004
6	D005
7	D006
8	D007

Для калібрування A/D перетворювача використовувався цифровий вольтметр.

Калібрування виконувалось в такій послідовності.

Лічильник приєднують до контакту 10 IC1, AD7581, а еталонний потенціометр на платі був налаштований на -10.00 вольт.

Далі лічильник приєднують до контакту 1 IC1, а зміщений потенціометр на платі був налаштований на +5,0 вольт, щоб отримати від -5 до +5 біполярний режим роботи.

Якщо для майбутнього застосування системи потрібен режим роботи від 0 до +10V, цей крок доведеться виконати, щоб отримати 0,0V на зміщеному потенціометрі.

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

ЗБІР ДАНИХ

У першій частині цього розділу розглядаються взаємозв'язки між джерелами даних і системою збору даних. Сам процес збору даних розглядається пізніше, а також генерація, передача та зберігання даних для отримання даних для аналізу.

4.1 Аналіз взаємозв'язків системи збору даних

Після вибору компонентів системи, який був виконаний в конструкторській частині, необхідно проаналізувати, як всі компоненти з'єднані в систему для виконання поставленої задачі. В цьому розділі основна увага приділяється взаємозв'язкам, встановленим між акселерометрами та контролером роботи як джерелами даних та системою збору даних.

Після того, як сигнали від акселерометрів були відфільтровані, вони готові до оцифрування. Однак прямий взаємозв'язок між фільтрованими виходами та платою A/D перетворювача неможливий через причини сумісності з TTL. Для подолання цієї проблеми довелося використовувати якийсь вид буферизації, як це показано на рисунку 4.1.

Крім того, у випадку наявності дуже низького діапазону напруг, що відповідають прискоренням, що сприймаються, бажаним є підсилення сигналу. І те, і інше досягалося одночасно за рахунок використання операційних підсилювачів, з'єднаних між собою резисторами, для отримання диференціальних підсилювачів.

На рисунку 4.2 наведено схему підключення диференціального підсилювача. Для такого виду з'єднання, якщо

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1},$$

то

$$V_o = (R_2 / R_1)(V_b - V_a),$$

де V_a і V_b – напруга на входах;

V_o – напруга на виході;

R_2 і R_1 – опори.

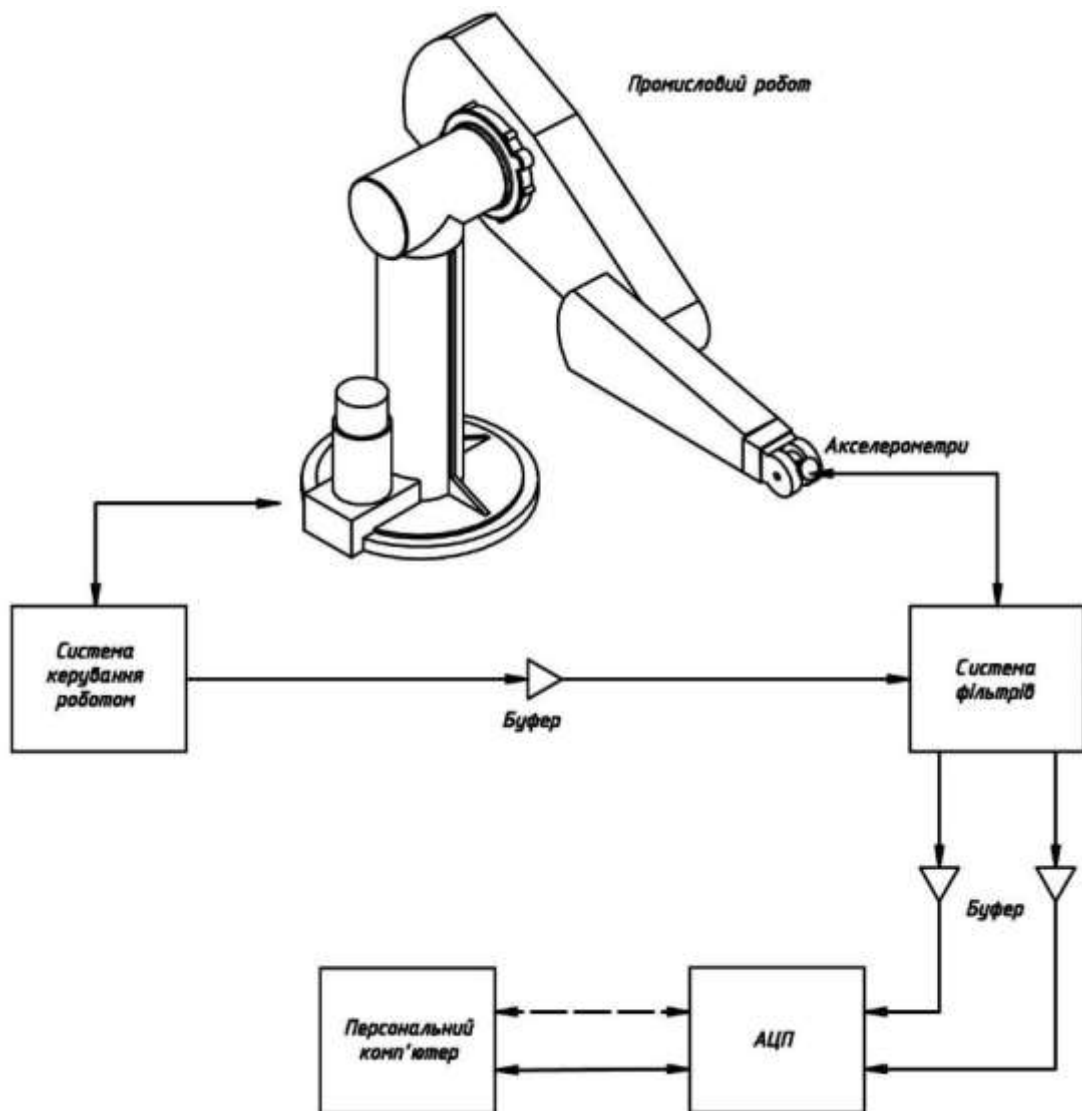


Рисунок 4.1 – Схема з'єднання компонентів системи

Вихід з фільтра, що містить відфільтрований сигнал прискорення, підключався до неінвертуючого входу (В) диференціального підсилювача, а до

інвертуючого входу (A) підключалося заземлення. Коефіцієнти підсилення диференціальних підсилювачів встановлювалися на 4 і 1, а для певних значень прискорення два диференціальних підсилювача підключалися послідовно для отримання коефіцієнта підсилення 16.

З тих же причин, зазначених раніше, буферизація повинна була використовуватися для ізоляції сигналів напруги, що знімаються з контролера робота від плати A/D перетворювача. З'ясувалося, що ці сигнали були спотворені шумом і їх також потрібно було фільтрувати, як це показано на рисунку 4.1.

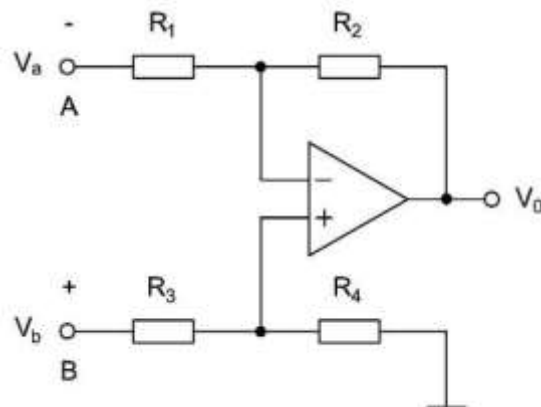


Рисунок 4.2 – Диференціальний підсилювач, побудований з використання одного операційного підсилювача

Контролер робота є головним компонентом електричної системи робота. Всі сигнали, що надходять до робота і від нього, проходять через контролер і використовуються ним для виконання розрахунків в режимі реального часу для контролю руху і положення руки. На рисунку 4.3 представлена структурна схема системи управління PUMA. Характер рухів маніпулятора (руки робота) контролюється цифровими та аналоговими сервоплатами контролера, як це задано керуючими сигналами комп'ютерної системи LSI-11. Для кожного з'єднання вихід з аналогової сервоплати подається на плату підсилювача потужності, де він підсилюється до рівнів напруги та струму, достатніх для приводу серводвигунів. Виходи цих плат подаються на приводу через відповідну систему кабелів.

На рисунку 4.4 показані з'єднання для отримання сигналу напруги, пропорційної тій, що подається від контролера до серводвигунів на кожному

з'єднанні. Оскільки напруга двигуна може досягати 30 або більше вольт після підсилення, а також оскільки діапазон напруг плати A/D перетворювача становить ± 5 вольт, було вирішено, що сигнал напруги повинен бути використаний перед підсиленням. Слід звернути увагу, що буферизація була необхідна, щоб ізолювати контролер робота і звільнити фільтр. Дуже важливо мати на увазі, що вільні точки ланцюга J_nA і J_nB ($n=1, 2 \dots 6$) ніколи не повинні безпосередньо контактувати один з одним, тому що це призведе до короткого замикання, яке призведе хаотичного руху маніпулятора і, в кінцевому підсумку, може пошкодити контролер робота.

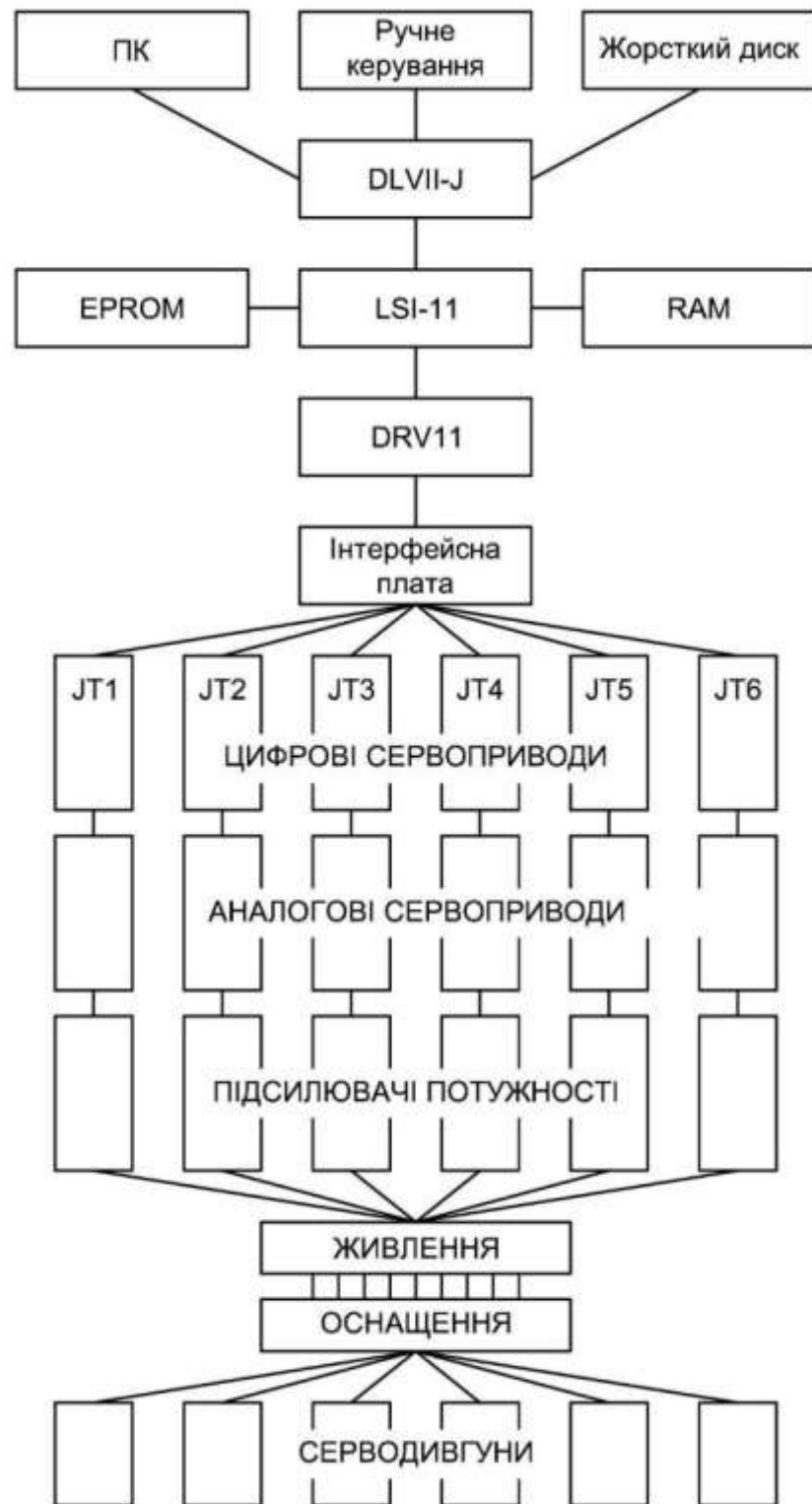


Рисунок 4.3 – Структурна схема системи управління PUMA

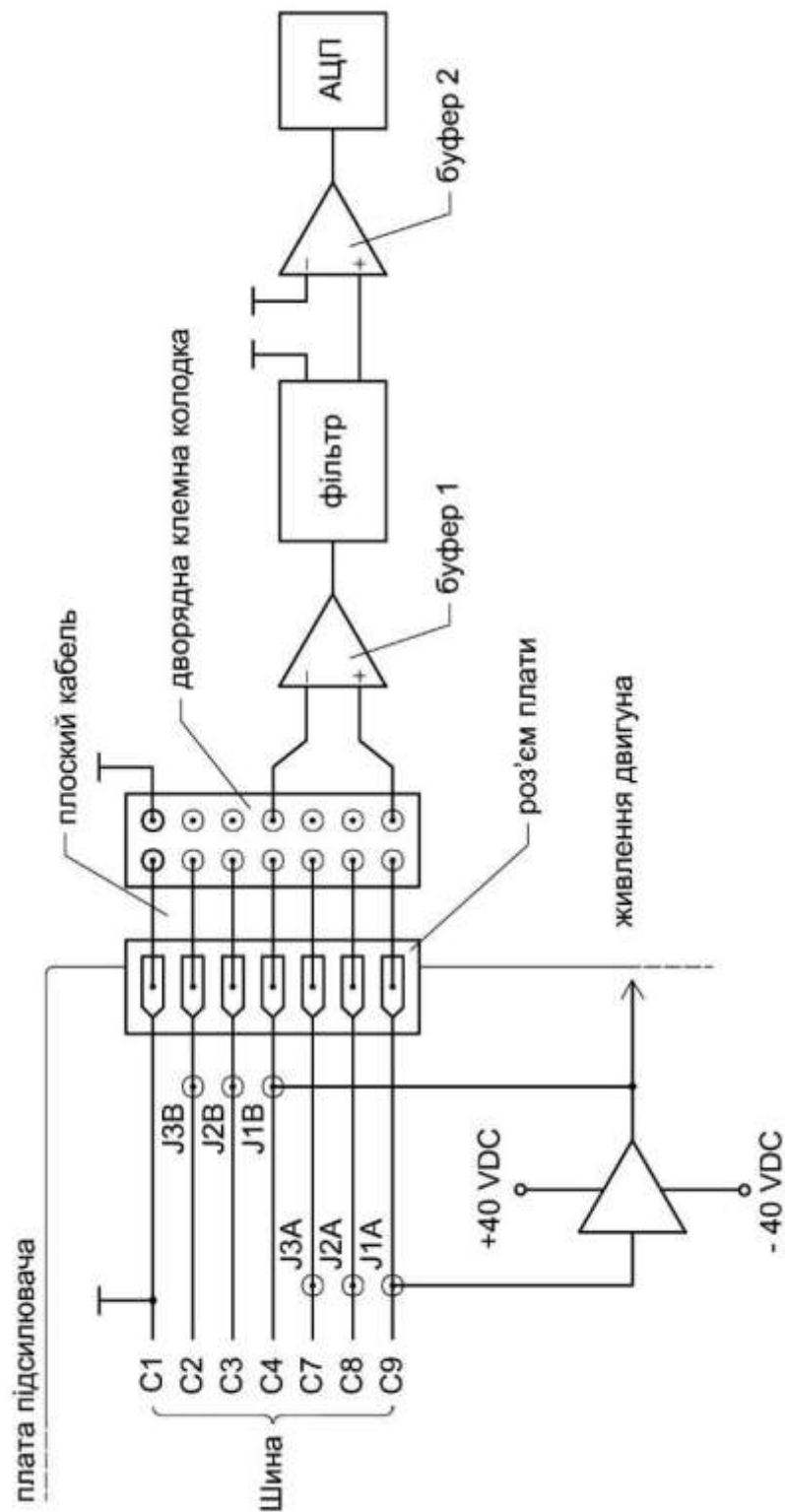


Рисунок 4.4 – Схема вимірювання напруги на серводвигунах

Отримані дані були згенеровані шляхом переміщення робота певним чином. Робот PUMA використовує комп'ютерну систему управління та мову VAL, спеціально розроблену для використання з промисловими роботами UNIMATION Inc.

4.2 Збір та зберігання даних

Було розглянуто дві альтернативи для збору та запису даних. Перший полягав у отриманні даних і збереженні потім в пам'яті для апостеріорного скидання на жорсткий диск. Друга альтернатива, що розглядалася, полягала в передачі даних безпосередньо на жорсткий диск, при цьому збір даних здійснювався з використанням максимально можливої швидкості передачі даних.

Як було зазначено раніше, використовувати такий метод передачі даних можна тільки для того, щоб пристрій запису міг зв'язуватися з 28 базовим системним контролером, тому друга альтернатива була відкинута і використовувалося тимчасове збереження даних в пам'яті.

Базовий системний контролер Z8 поставляється із загальною кількістю 4 Кбайт оперативної пам'яті, що означає, що доступно 4096 місць пам'яті для зберігання програм і даних. Щоб мати більше вільного місця в пам'яті, була виділена плата розширення системного контролера MICROMINT Z8. Ця плата дозволяє розширити контролер системи Z8 Basic за рахунок включення до 12% додаткових байт оперативної пам'яті або EPROM; він також включає 3 байтові програмовані порти вводу/виводу та касетний інтерфейс зберігання даних Kansas City Standard зі швидкістю 300 біт/с. Слід, однак, зазначити, що для цього застосування ця плата використовувалася строго як плата розширення пам'яті, і жодна інша її особливість тут не використовувалася.

Придбана плата додала в систему 3 додаткові 2К оперативної пам'яті, тому обсяг пам'яті був збільшений. Адресу плати розширення пам'яті було встановлено так, щоб вона починалася з 1800 hex, а розширювалася до 3000 hex. Тому доступні в системі адреси пам'яті варіюються від 800 шістнадцяткових до 3000 hex, що в сумі становить 10240 ділянок пам'яті.

З'ясувалося, що за допомогою програми, яка використовується для збору даних, про які піде мова далі, швидкість перетворення становила приблизно 37 точок даних в секунду при використанні одного каналу на A/D Converter за раз. Припустимо, що весь обсяг пам'яті був би використаний для зберігання даних, то для заповнення всіх комірок пам'яті знадобилося б загалом приблизно 276 секунд

часу збору даних. Однак, оскільки програми збору та зберігання даних використовують частину цього простору пам'яті, загалом було доступно приблизно 7770 комірок пам'яті для збереження даних, що означає, що в сумі 210 секунд часу збору даних доступно при так налаштованій системі.

Збір даних складається з двох етапів.

1. Плата A/D-перетворювача приймає сигнал, що надходить на кожен з її каналів (у цьому випадку використовувався лише канал 1), перетворює його на цифровий сигнал і автоматично передає його в належне розташування на внутрішню двопортову оперативну пам'ять 6x8 в кінці кожного перетворення.
2. На вимогу контролера системи Z8 Basic System Controller (CPU) дані передаються в відповідне місце на цій платі або на платі розширення пам'яті.

На рис. 4.5 представлена блок-схема ходу збору даних. Лічильник використовується для збільшення на одиницю адресного місця, в яке повинні бути передані оцифровані дані. Програма завершується при натисканні клавіші Esc. Подію тривалістю до 210 секунд можна безперервно відстежувати.



Рисунок 4.5 – Блок-схема алгоритму збору даних

За допомогою цього алгоритму було досягнуто швидкості перетворення

приблизно 37 точок даних в секунду.

Для кожного руху ланки робота є шість джерел даних, які потрібно контролювати: акселерометри і напруги на двигунах в ланках 1,2 і 3. Було б зручно використовувати шість каналів плати A/D Converter одночасно, але це означало б наявність додаткових циклів в тексті програми збору даних, що вимагало б більш тривалого часу виконання і, як наслідок, призводило до зниження швидкості перетворень.

Швидкості в 37 точок даних в секунду було достатньо для відстеження сигналів, і зниження цього коефіцієнта конвертації було небажаним. Наприклад, при використанні каналів 1 і 2 було досягнуто показника всього 25 перетворень в секунду для кожного каналу.

Було виявлено, що використовуючи тільки канал 2 замість каналу 1, було досягнуто всього 33 перетворення в секунду. Тому було прийнято рішення використовувати тільки канал 1 і робити кілька прогонів кожного руху ланки робота, щоб отримати дані всіх змінних, що цікавлять. Оскільки виконання програми VAL виробляє однакові рухи в роботі під час кожного пробігу, стало можливим незалежне вимірювання кожної змінної.

4.3 Програма зберігання даних

Після виконання програми збору даних дані зберігаються в пам'яті, кожна адреса пам'яті відповідає одній точці даних. Для передачі даних з пам'яті на пристрій запису потрібно було врахувати дві речі:

- 1) Будучи 8-бітним пристроєм, плата A/D-перетворювача виробляє вихідний сигнал у діапазоні від 0 до 255, який представляє рівні напруги, які плата насправді сприймає. Цей вихід повинен був бути попередньо масштабований, щоб мати вихід, який безпосередньо представляє змінні, що вимірюються в зручних одиницях, тобто g для прискорень ($1g=9,81 \text{ м/сек}^2$) і вольт для напруг. Маючи такий вихід чином, буде простіше порівнювати оцифрований вихід із зображенням на виході, записаним на екрані осцилографа, який використовувався

для порівняння.

2) Вихідні дані повинні бути відформатовані, щоб мати набір даних у вигляді таблиці, з 8 вирівняними по правому краю стовпцями на рядок, щоб полегшити скидання даних на комп'ютер мейнфреймів (Cyber 730) для аналізу.

На рисунку 4.6 наведена блок-схема програми зберігання даних. А – лічильник числа точок даних, які витягуються з пам'яті і записуються; В – лічильник числа точок даних в рядку; С – це змінна, яка міститиме точки даних, по одній; Nd – кількість точок даних, яку бажано записати.

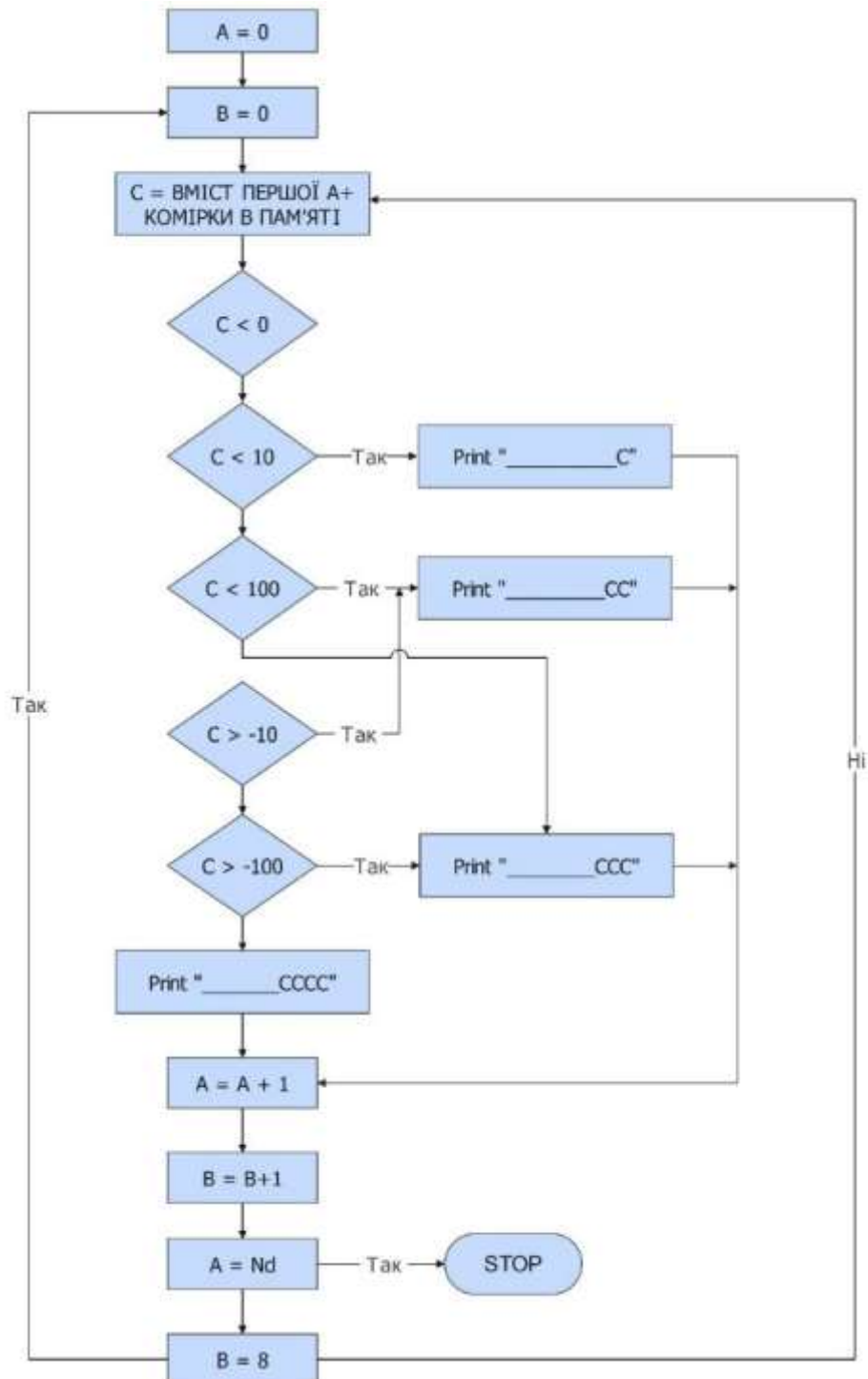


Рисунок 4.6 – Блок-схема алгоритму зберігання даних

Для визначення констант, що відображаються під назвою «попереднє масштабування виводу», було виконано таке.

Плата A/D перетворювача була відкалібрована для роботи з сигналами в діапазоні від -5В до +5В, отже, теоретично вихід нуля з плати A/D перетворювача відповідатиме -5 В, а вихід 255 – +5 В; Тоді вихід для нульового рівня напруги дорівнюватиме 127. На інших виходах роздільна здатність A/D перетворювача становить 40 мілівольт, тому варіація на виході A/D перетворювача на одиницю являє собою фактичну варіацію в 4 мікрівольта на аналоговому сигналі, що оцифровується. Якщо C представляє вихід від A/D перетворювача, щоб масштабувати цей вихід так, щоб мати сигнал в мікрівольтах, необхідна інструкція буде такою:

$$C = (C - 127) \times 4.$$

Щоб довести справедливість цього співвідношення, на канал 1 плати перехідного A/D перетворювача був поданий сигнал з поступовим варіюванням від -5 В до +5 В, результати якого наведені в таблиці 4.1.

Як видно з таблиці 4.1, для рівня 0 вольт був отриманий вихід 123 замість 127, отже, рівняння буде мати вигляд:

$$C = (C - 123) \times 4. \quad (4.1)$$

Провівши ще кілька експериментів, було виявлено, що використання коефіцієнта підсилення 200/51 замість дало більш точне вимірювання вхідного сигналу. Таким чином, відношення, яке використовувалося для попереднього масштабування даних у програмі зберігання даних, було таким

$$C = (C - 123) \times 200/51.$$

Отримані результати наведені в табл. 4.1. При такому попередньому масштабуванні оцифрована потужність буде коливатися від -500 до +500 мкВ.

Таблиця 4.1 – Попереднє масштабування виводу

Вхід (В)	Вихід A/D (с)	$C (C - 127) \times 4$ (мкВ)	$C = (C - 123) \times 200 / 51,$ (мкВ)
-5.000	0	-508	-482
-4.500	9	-472	-447
-4.000	22	-420	-396
-3.500	34	-372	-349
-3.008	47	-320	-298
-2.508	60	-268	-247
-2.008	72	-220	-200
-1.506	85	-168	-149
-1.005	98	-116	-98
-0.505	110	-68	-50
0.001	123	-16	0
0.507	136	54	50
1.000	148	84	98
1.506	161	136	149
2.000	174	188	200
2.504	187	240	250
3.001	199	288	298
3.500	212	340	349
4.000	224	376	396
4.500	237	428	447
5.000	250	496	498

Після попереднього масштабування виводу, наступним кроком програми є алгоритм для створення виводу з вісьмома вирівняними за правим краєм колонками.

Програма завершує роботу, коли буде записано потрібну кількість точок даних N_d .

4.4 Аналіз рухів робота

Як було пояснено раніше, робот повинен виконувати три види рухів, кожен з яких складається з обертання одного окремого ланки, при цьому кінцевий робочий орган рухається по дузі кола. Причина того, що робот виконував такі

рухи, полягала в тому, що це дозволило отримати вимірювання тангенціальних і нормальних прискорень схвата, що значно спростило аналіз даних.

На рис. 4.7 показано визначення двох систем координат, які будуть використовуватися для пояснення рухів, що виконуються роботом. Система координат, закріплена в базі руки робота, називається світовою системою координат. Опорні координати, закріплені на основі схвата, називаються системою координат інструменту. Для позначення світової системи координат використовувалися великі літери.

Рух ланки 1 складався з обертання талії навколо осі координат Z і паралельно площині $X-Y$ на рис. 4.7. Акселерометр, встановлений уздовж координатного напрямку інструменту Y , призначався для вимірювання тангенціального прискорення, а той, що відраховувався за напрямком X , – для вимірювання нормального прискорення.

Рух ланки 2 складався з обертання навколо світової координатної осі Y і паралельно площині $X-Z$. Акселерометр, встановлений уздовж координатної осі інструменту Z , вимірював тангенціальні прискорення, а той, що встановлений уздовж осі X , вимірював нормальні прискорення.

Рух ланки 3 складався з обертання ліктя навколо осі, паралельної осі координат X . Обертання виконувалося на площині, паралельній площині $X-Z$. Акселерометр, встановлений уздовж координатної осі інструменту Z , вимірював тангенціальні прискорення, а акселерометр на осі x вимірював нормальні прискорення.

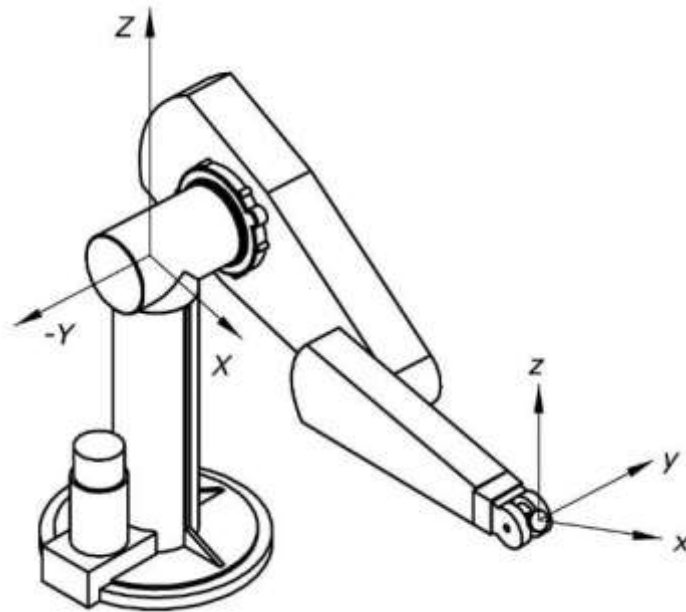


Рисунок 4.1 – Системи координат робота

Було виміряно відстань між акселерометрами і віссю обертання, так як вона знадобиться пізніше при інтегруванні даних про прискорення для отримання кутової швидкості і переміщення. Виміряні радіуси обертання були такими:

Обертання ланки 1: радіус = 0,830 м.

Обертання ланки 2: радіус = 0,830 м.

Обертання ланки 3: радіус = 0,533 м.

Для кожного руху робота вимірювалася загальна кількість змінних спрацьовування: тангенціальне і нормальне прискорення, а також напруги на двигунах в ланках 1, 2 і 3. Інформація про це наведена в таблицях 4.2 і 4.3. Також у ці таблиці включено назву програм, які використовуються для побудови графіків змінних. Зведені в таблицю значення коефіцієнта підсилення були визначені експериментальним шляхом вимірюванням вихідних напруг для заданих вхідних напруг і розрахунку співвідношення вихід-вхід.

Таблиця 4.2 – Дані прискорення

Файл даних	Опис	Приріст	Програма побудови графіків
J1TA1	Обертання ланки 1: тангенціальне прискорення.	3.997	J1TAN1
J1NO1	Обертання ланки 1: нормальне прискорення	3.997	J1NOR1
J2TA1	Обертання ланки 2: тангенціальне прискорення.	3.997	J2TAN1
J2N01	Обертання ланки 2: нормальне прискорення	2x3.997*	J2N0R1
J3TA1	Обертання ланки 3: тангенціальне прискорення.	1.000	J2TAN1
J3NO1	Обертання ланки 3: нормальне прискорення.	3.997	J3N0R1

* Два диференціальних підсилювача були з'єднані послідовно.

Таблиця 4.3 – Дані про напругу двигуна

ФАЙЛ ДАНИХ	Опис	Значення		Програма побудови графіків
		DIFF. AMP. 1	DIFF. AMP. 2	
J1VO1	Обертання ланки 1: напруга на двигуні 1.	3.997	0.714	J1V0L1
J1VO2	Обертання ланки 1: напруга на двигуні 2.	0.71#	1.000	J1VGL2
J1VO3	Обертання ланки 1: напруга на двигуні 3.	3.997	1.000	J1VCL3
J2V01	Обертання ланки 2: напруга на двигуні 1	3.997	0.714	J2V0L1
J2VO2	Обертання ланки 2: напруга на двигуні 3	0.714	1.000	J2VCL2
J2VO3	Обертання ланки 2: напруга на двигуні 3	3.997	0.714	J2V0L3
J3VO1	Обертання ланки 3: напруга на двигуні 1	3.997	0.714	J3VCL1
J3VO2	Обертання ланки 3: напруга на двигуні 2	3.997	0.714	J3V0L2
J3VO3	Обертання ланки 3: напруга на двигуні 3	3.997	0.714	J3V0L3

В кожному файлі даних було збережено 400 точок даних. Загалом, для майбутнього використання системи рекомендується, щоб визначення попереднього масштабування, необхідного для отримання значення, що

відповідає нульовій вхідній напрузі в А/D перетворювачі, необхідна буферизація, оскільки наявність диференціальних підсилювачів, впливає коефіцієнт підсилення системи.

4.5 Аналіз даних про прискорення

Отримавши файли даних тангенціального прискорення, потрібно було виконати чисельне інтегрування для отримання швидкості i , за допомогою другого інтегрування, переміщення.

Оскільки рухи, що здійснюються роботом, були обертовими, вважалось за доцільне отримати кутову швидкість, а не тангенціальну, і кутове зміщення обчислювати аналогічно.

Процедура, якої дотримувалися для виконання інтегрування, спочатку полягала у використанні інтерполяційної підпрограми для отримання кубічного многочлена, що представляє функцію прискорення проти часу між кожною парою точок даних, а потім у використанні підпрограми розв'язання звичайних диференціальних рівнянь для завершення інтегрування.

На рисунку 4.8 наведена блок-схема програми аналізу даних.

Інтерполяційна підпрограма, виконує одновимірну квазікубічну інтерполяцію. Вона обчислює коефіцієнти для множини кубічних многочленів (так званих сплайнів), які будуть використовуватися для інтерполяції множини точок з однієї функції з одним значенням. Отриманий сплайн є безперервним і має неперервну першу похідну. Кубічний многочлен, що представляє функцію прискорення між кожною парою заданих точок, визначається координатами двох точок і нахилами в двох точках. Нахил у кожній точці визначається точкою, про яку йде мова, і двома точками на будь-якій стороні.

Входами для цієї підпрограми є:

T – вектор кроків;

АСС – вектор, що містить точки даних прискорення (N точок).

На виході цієї підпрограми виходить апроксимаційний многочлен, який

представляє функцію прискорення при T_f як:

$$S(T_f) = ((C(I,3) \times D + C(I,2) \times D + C(I,1) \times D + ACC(I), \quad (4.2)$$

де $I = 1, 2, \dots, N$;

C – матриця коефіцієнтів сплайна, розмірністю N на 3 (обчислюється за підпрограмою).

$$D = T_f - T(I). \quad (4.3)$$

Саме чисельне інтегрування виконувалося за допомогою відповідної підпрограми. Ця підпрограма пов'язує наближення з розв'язками системи диференціальних рівнянь першого порядку з початковими умовами. Додаючи один з його параметрів (IND) до 1, користувачеві потрібно лише надати параметри.

Задача розв'язку звичайних диференціальних рівнянь була такою:

$$Y'_1 = Y_2 / R, \quad (4.4)$$

$$Y'_2 = S(T_f), \quad (4.5)$$

де Y'_1 – кутове зміщення;

Y'_2 – тангенціальна швидкість;

$S(T_f)$ – апроксимаційний многочлен для тангенціального прискорення при T_f , що задається рівнянням 4.2;

R – радіус повороту.

Початковими умовами були:

$$Y_1(0) = 0;$$

$$Y_2(0) = 0.$$



Рисунок 4.8 – Блок-схема аналізу даних

Результати, отримані програмами аналізу для кожного обертання ланки, показані на рисунках 4.9 – 4.11. На рисунку 4.10, який відповідає обертанню ланки 2, показаний аналіз руху від місця PART до місця розташування POS1.

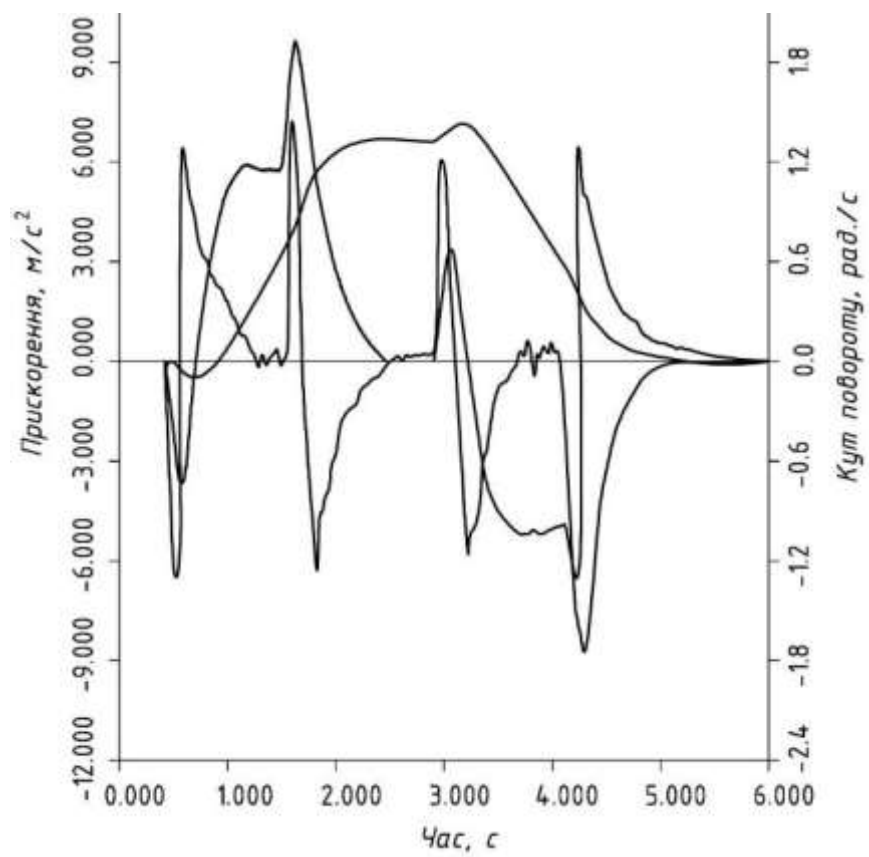


Рисунок 4.9 – Аналіз обертання ланки 1

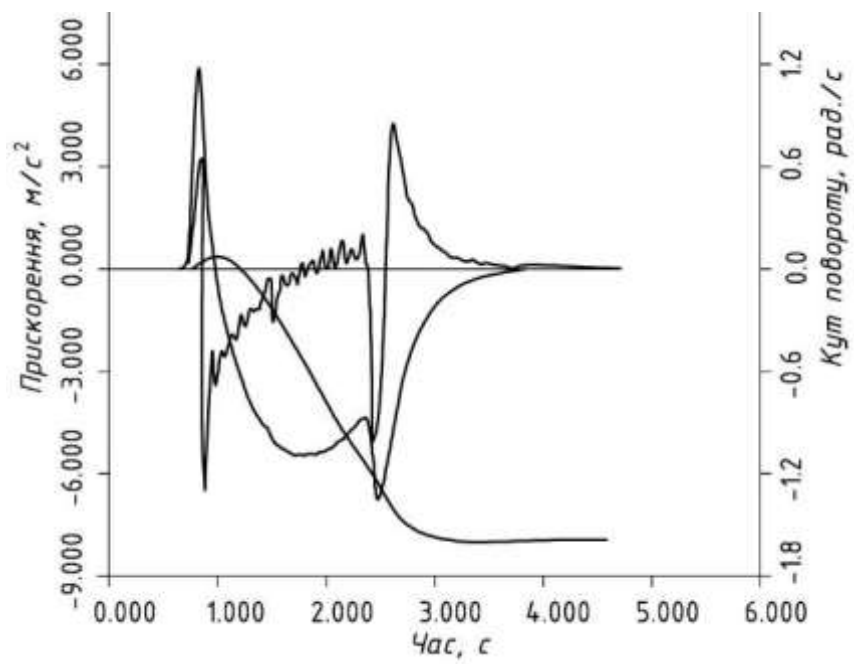


Рисунок 4.10 – Аналіз обертання ланки 2

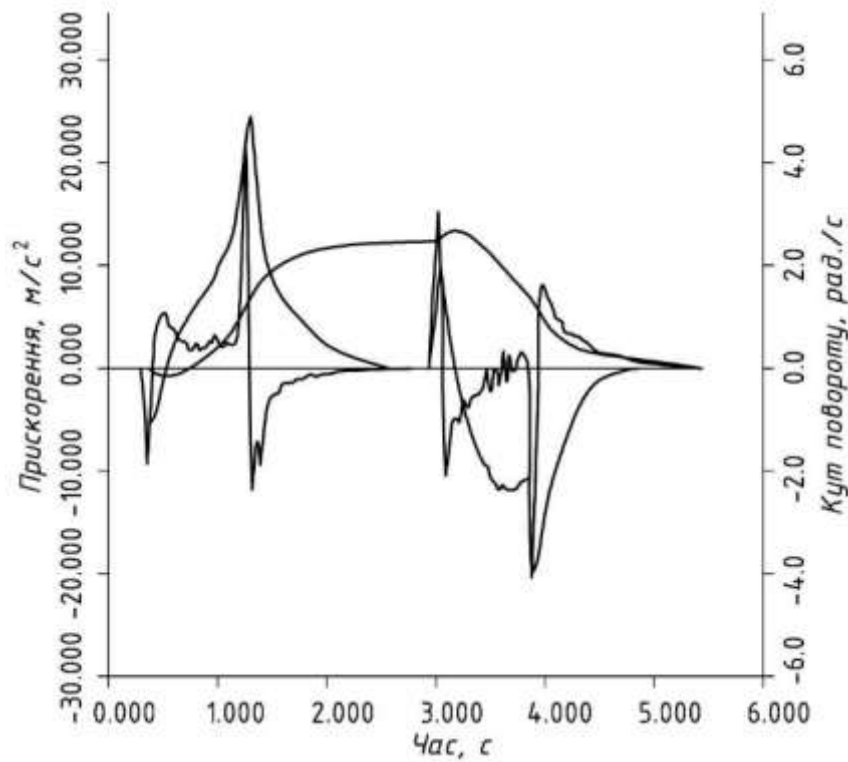


Рисунок 4.11 – Аналіз обертання ланки 3

Таблиця 4.4 – Програми аналізу даних прискорення

Назва програми	Файл даних	Значення	Побудова стиків даних	Обчислено точок даних
J1A31AL	J1TA4	3.997	221	5%
J2A31AL	J2TA1	3.997	170	5%
J3A31AL	J3TA1	1.000	205	5%

Зауважимо, що шкала для кривих кутової швидкості і переміщення дорівнює п'яти. Використовується шкала кривих прискорення.

На кривих тангенціального прискорення видно піки, які, очевидно, виникають при якомусь збуренні ударного типу на початку і в кінці кожного обертання. Ймовірно, це пов'язано з різким ривком у русі руки робота. З цієї причини, до інтегрування кривих прискорень, було зроблено деяке «загасання» цих піків, щоб зменшити їх вплив на криві швидкості і переміщення.

Розглядаючи фізику досліджуваної проблеми, можна зробити такі висновки:

1. Криві швидкостей узгоджуються з тим, що вони повинні дорівнювати нулю протягом періоду часу, в який робот зупиняється.

Криві швидкості в загальному випадку показують, що робот розганяється, щоб досягти максимальної швидкості, а потім сповільнюється до упору. Піки, які

криві присутні на початку і в кінці кожного обертання ланки, є прямим наслідком згаданих вище збурень і повинні враховуватися відповідно при порівнянні.

Криві зміщення показують таке.

Для обертання ланки 1 крива показує кутове зміщення, яке йде від нуля до 1,32 радіан (76 градусів), тоді як фактичне переміщення, виконане роботом, становило близько 85 градусів. Судячи з усього, причиною такої різниці є наявність згаданих вище вершин.

Для випадку обертання ланки 2 крива показує кутове зміщення, яке йде від нуля до 1,52 радіан (87 градусів), що дуже близько до 90 градусів, з яких складалося фактичне обертання.

Для обертання ланки 3 крива показує кутове зміщення, яке йде від нуля до 2,1 радіан (120 градусів), що узгоджується з фактичним обертанням, виконаним роботом. Коли робот переміщується в довільне місце розташування, криві показують, що він нахиляється під кутом в протилежну сторону. Це також є наслідком піків, присутніх на кривих прискорення, і до цього слід ставитися аналогічно.

В експериментальних роботах зазвичай використовуються параметри, які не піддаються контролю і все ж мають відношення до кінцевих результатів, які шукаються. У цьому випадку очевидно, що досить невелика величина ривків, яка спостерігалася в рухах робота, вплинула на вимірювання прискорення і, отже, на результати швидкості та переміщення. Однак розумна узгодженість, що спостерігається між фізикою, що бере участь у розв'язанні проблеми, і результатами експерименту роблять їх хорошою базою порівняння для результатів чисельного моделювання.

4.6 Аналіз даних про напругу двигуна

Як вже зазначалося раніше, ідея отримання даних про напругу для об'єднаних серводвигунів була спрямована на те, щоб якимось чином пов'язати ці криві з крутним моментом, що розвивається на кожному серводвигуні.

Кожен елемент маніпулятора робота PUMA приводиться в рух серводвигуном з постійним магнітом.

На рисунку 4.12 показана ідеалізована характеристика швидкості крутного моменту серводвигуна. На практиці машини дуже близько наближаються до даних рисунка 4.11, показана ідеалізована характеристика крутного моменту і швидкості. В реальних умовах характеристики кривих дуже близько наближаються до прямої лінії, хоча крива має тенденцію до опущення або збільшення свого нахилу в області з високим крутним моментом в залежності від насичення. Вираз крутного моменту, наведений на рис. 4.12, має вигляд:

$$T = K_T e_{in} - K_B N. \quad (4.6)$$

Цей вираз не є нічим іншим, як рівнянням для сімейства кривих швидкості крутного моменту, позначених від A_1 до A_4 . Форма цього рівняння вказує на те, що крутний момент пропорційний постійній піків прикладеної напруги і що крива змінюється обернено пропорційно швидкості. На другу частину цього виразу припадає зменшення швидкості; Ефект схожий на в'язку силу тертя.

На рисунку 4.12 показаний крутний момент у вигляді постійних піків прикладеної напруги; крутний момент залишається постійним при збільшенні кутової швидкості: це частина $K_T e_{in}$. На нижній схемі показана в'язкісна фрикційна частина характеристики двигуна. Графічне поєднання цих двох компонентів забезпечує реальні результуючі характеристики двигуна.

З отриманих даних напруги можна дізнатися прикладену напругу якоря e_{in} , а з аналізу даних прискорення вже отримано кутову швидкість N . Тепер потрібно відповісти на питання, що таке константи K_T і K_B в рівнянні.

На рисунку 4.13 показана спрощена схема двигуна постійного струму з управлінням, подібним до тих, що використовуються в роботі PUMA. Цей показник корисний, оскільки його динамічна поведінка така ж, як виміряна продуктивність серводвигунів.

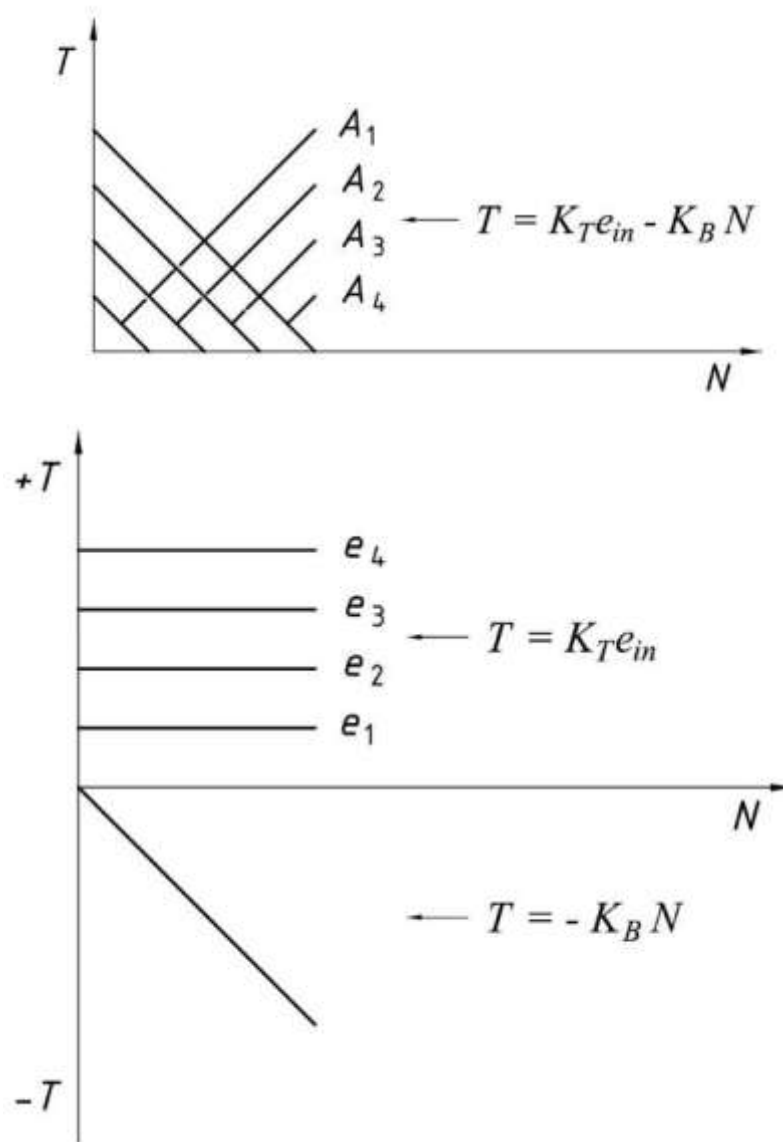


Рисунок 4.12 – Характеристика крутного моменту і швидкості серводвигуна:
нормальний і частковий вигляд

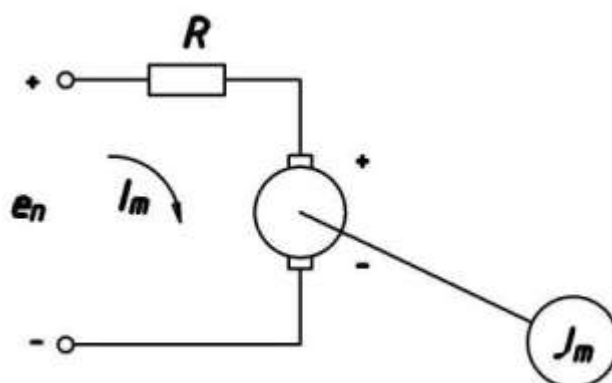


Рисунок 4.13 – Еквівалентна схема серводвигуна з керуванням якорем без
врахування індуктивності якоря

Рівняння зворотної напруги c_{mv} має вигляд:

$$c_{mv} = K_{mv}N, \quad (4.7)$$

де K_{mv} – константа,

N – кутова швидкість.

Крутний момент, що розвивається двигуном, дорівнює:

$$T = K_{mT}i_m, \quad (4.8)$$

де K_{mT} – константа крутного моменту,

i_m – струм якоря.

Для напруги якоря e_{in} можна записати таке співвідношення:

$$e_{in} = i_m R + K_{mV}H. \quad (4.9)$$

Використовуючи рівняння 4.8 у рівнянні 4.9

$$e_{in} = (T / K_{mT})R + K_{mV}N. \quad (4.10)$$

Тому:

$$T = (T_{mT} / R)e_{in} - (K_{mT} - K_{mV} / R)N. \quad (4.11)$$

Оскільки і K_{mV} , і K_{mT} залежать від одних і тих же параметрів машини, знання будь-якої константи може бути використано для отримання іншої і [18]:

$$K_{mT} = 0.738K_{mV}. \quad (4.12)$$

Залежність між прикладеною напругою якоря e_{in} і даними про напругу має

ВИГЛЯД:

$$e_{in}(t) = K_{amp} V(t), \quad (4.13)$$

де $V(t)$ – дані про напругу двигуна,

K_{amp} – коефіцієнт підсилення.

Експериментально було визначено, що $K_{amp} = 10$.

Використовуючи 4.12 і 4.13 у рівнянні 4.11, кінцевий вираз для вимірювання залежності крутного моменту від часу можна записати так:

$$T(t) = (10K_T V(t) - K_B M(T)) \times 1.359, \quad (4.14)$$

$$K_T = 0.738 K_{MV} / R, \quad (4.15)$$

$$K_B = 0.738 K_{MV}^2 / R, \quad (4.16)$$

де 1,359 – коефіцієнт перерахунку

Розмірностями рівнянь 4.14 - 4.16 є: для струму – напруга в вольти, радіани в секунду – кутова швидкість і вольти на радіан в секунду для постійної зворотної ЕРС. Коефіцієнт перетворення використовується для перетворення одиниць результуючого вільного крутного моменту в Н·м.

Параметри двигуна, які необхідно знати для застосування рівняння 4.14, – це опір якоря і константа зворотної ЕРС або постійна крутного моменту для кожного серводвигуна, і їх можна отримати з паспортних даних двигуна.

Результати експериментальних досліджень наведені на рис. 4.14 – 4.28.

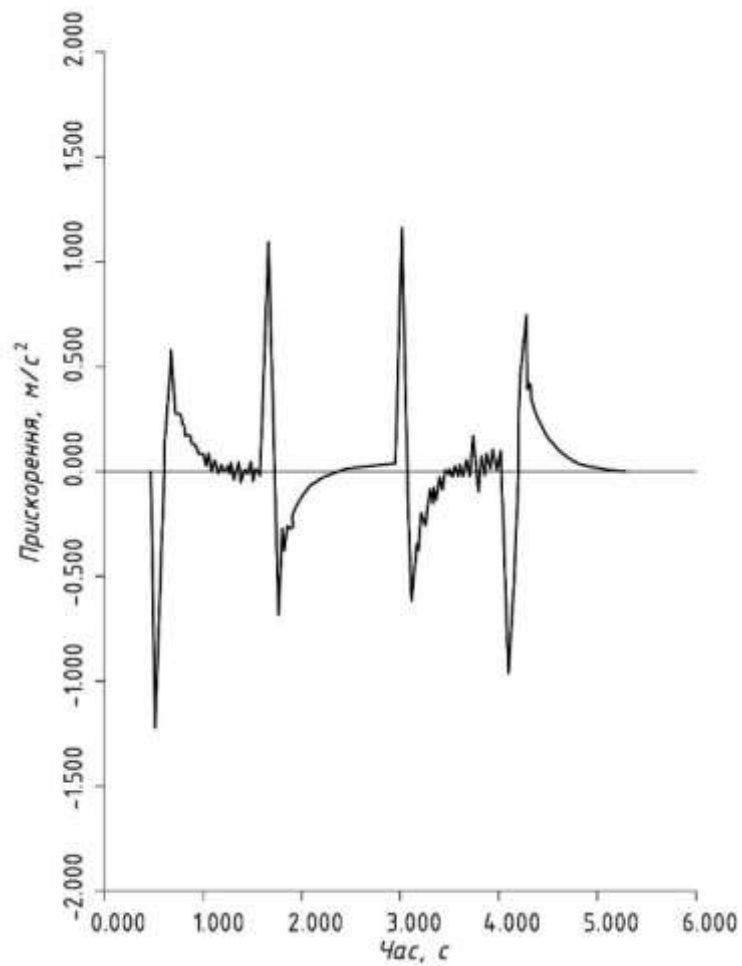


Рисунок 4.14 – Обертання ланки 1: тангенціальне прискорення

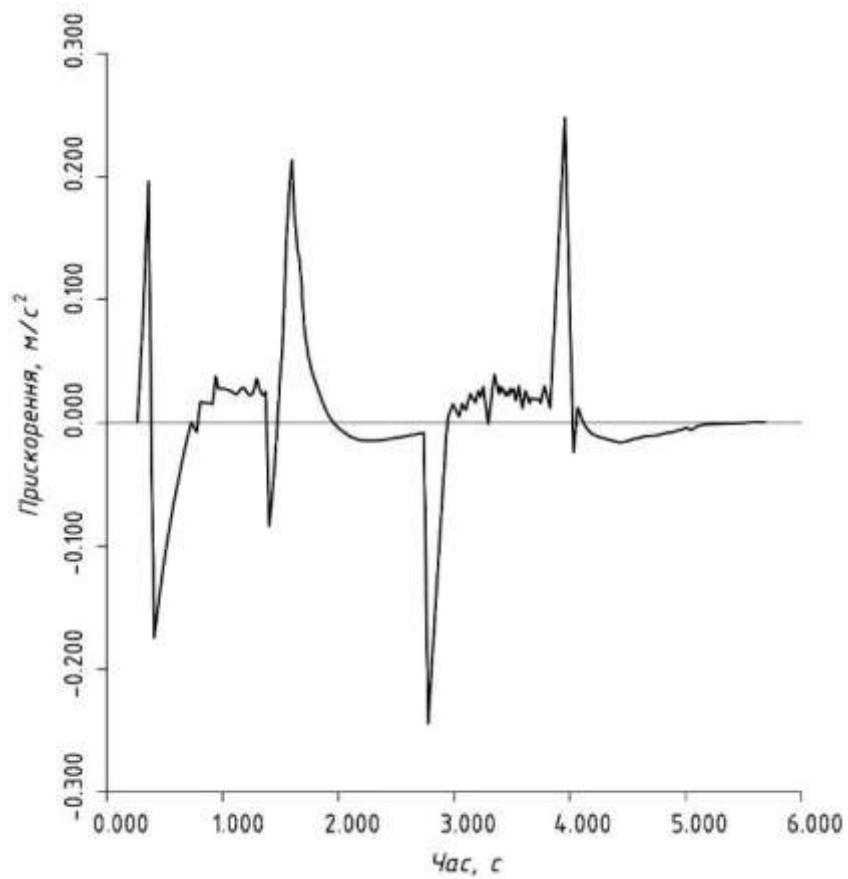


Рисунок 4.15 – Обертання ланки 1: нормальне прискорення

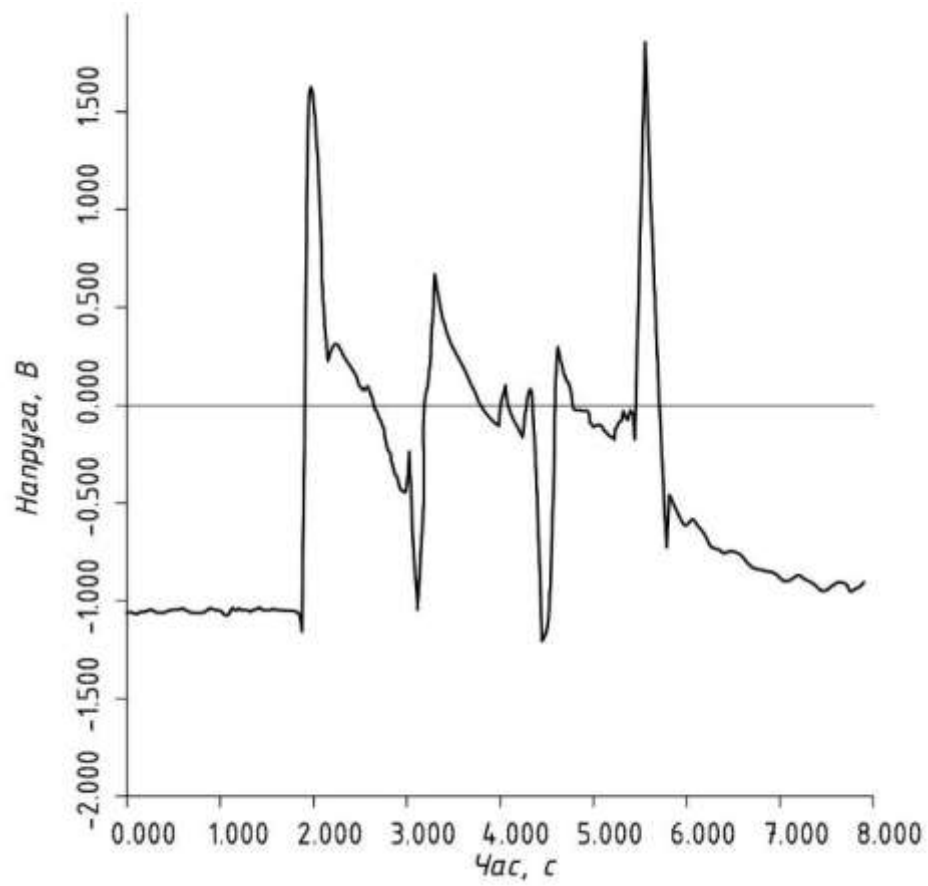


Рисунок 4.16 – Обертання ланки 1: напруга на двигуні ланки 1

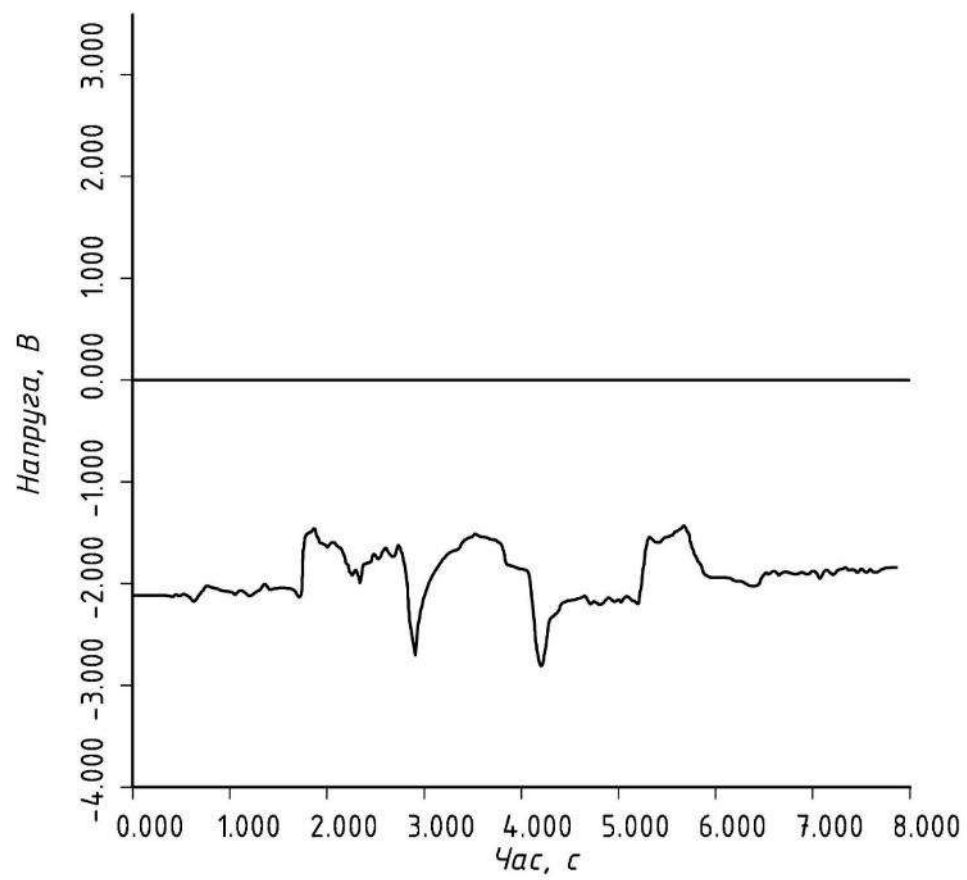


Рисунок 4.17 – Обертання ланки 1: напруга на двигуні ланки 2

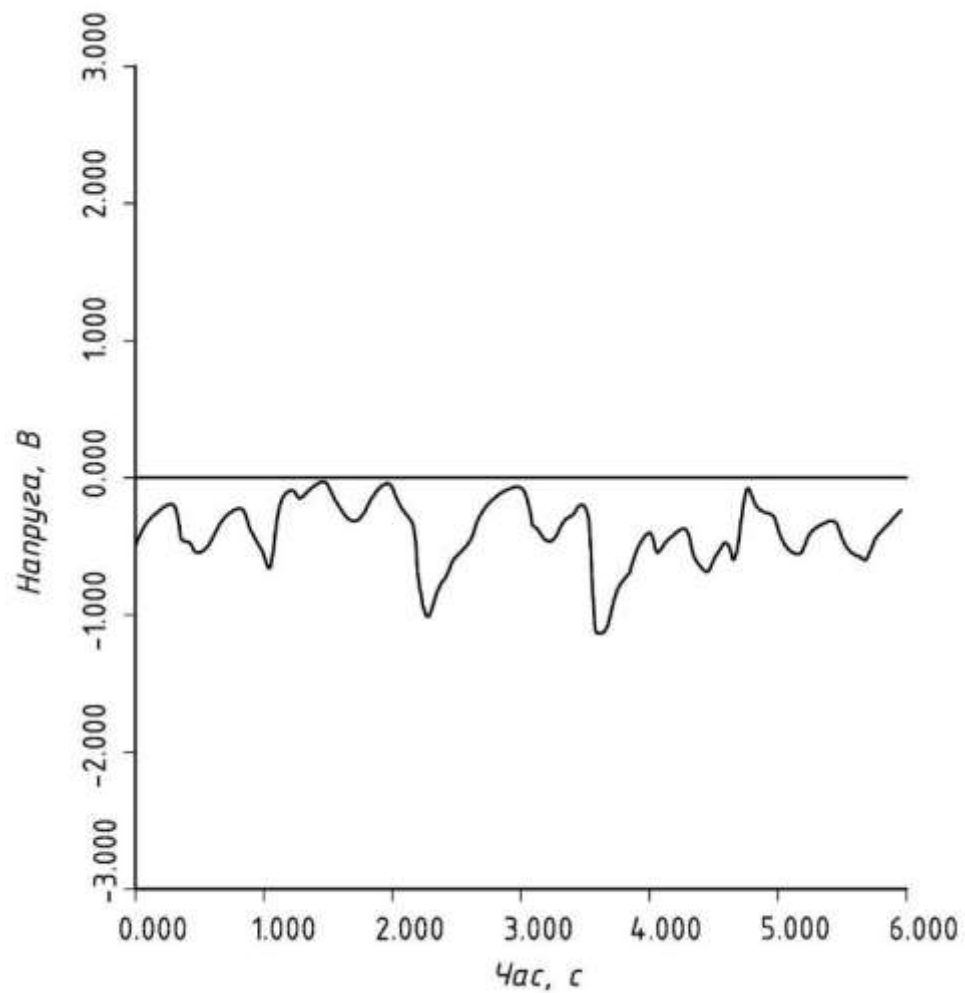


Рисунок 4.18 – Обертання ланки 1: напруга на двигуні ланки 3

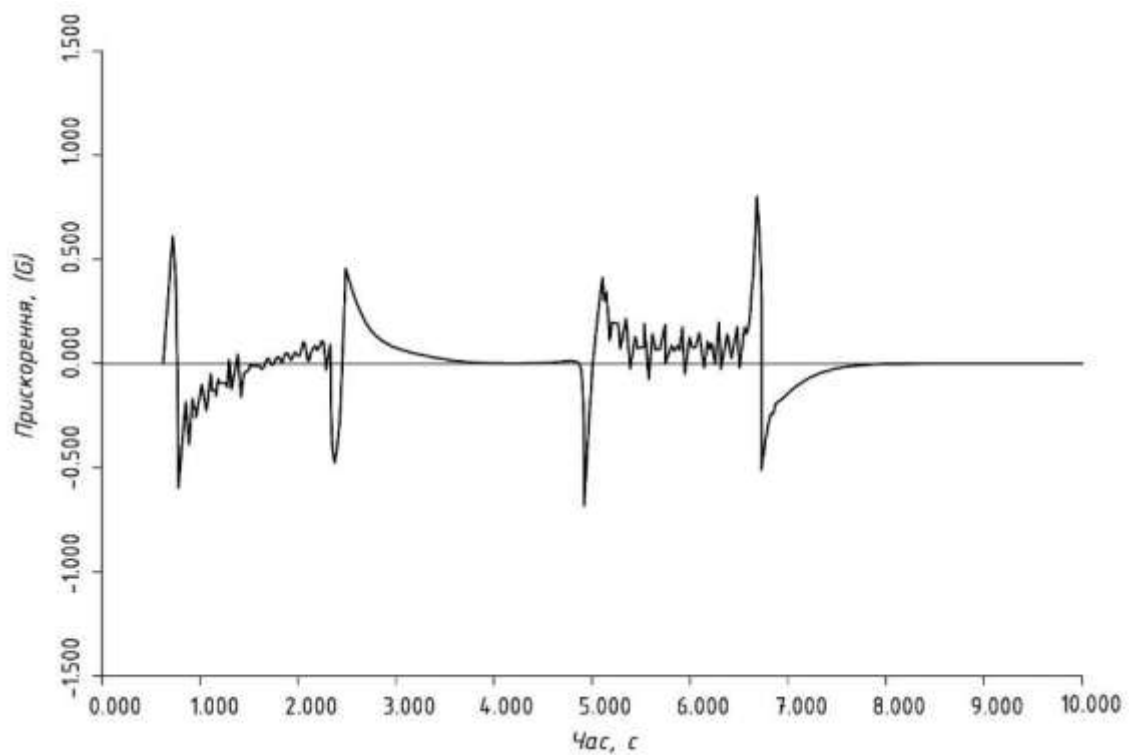


Рисунок 4.19 – Обертання ланки 2: тангенціальне прискорення

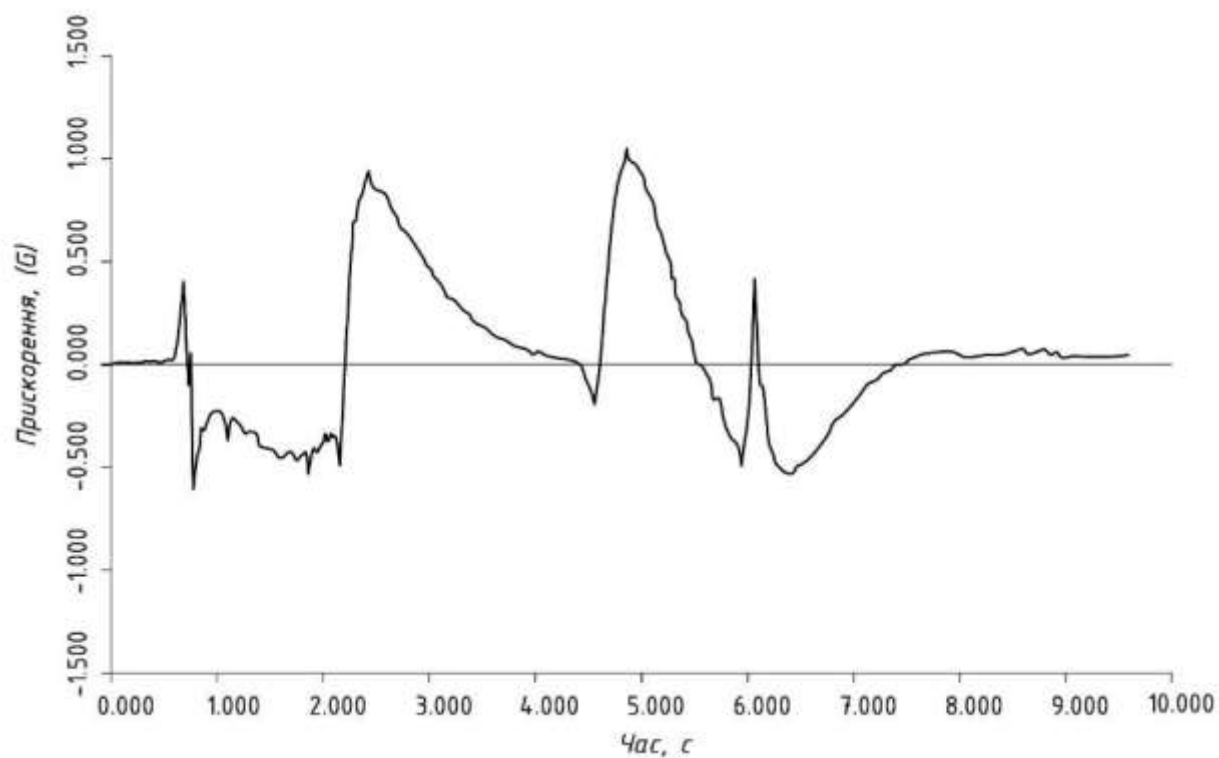


Рисунок 4.20 – Обертання ланки 2: нормальне прискорення

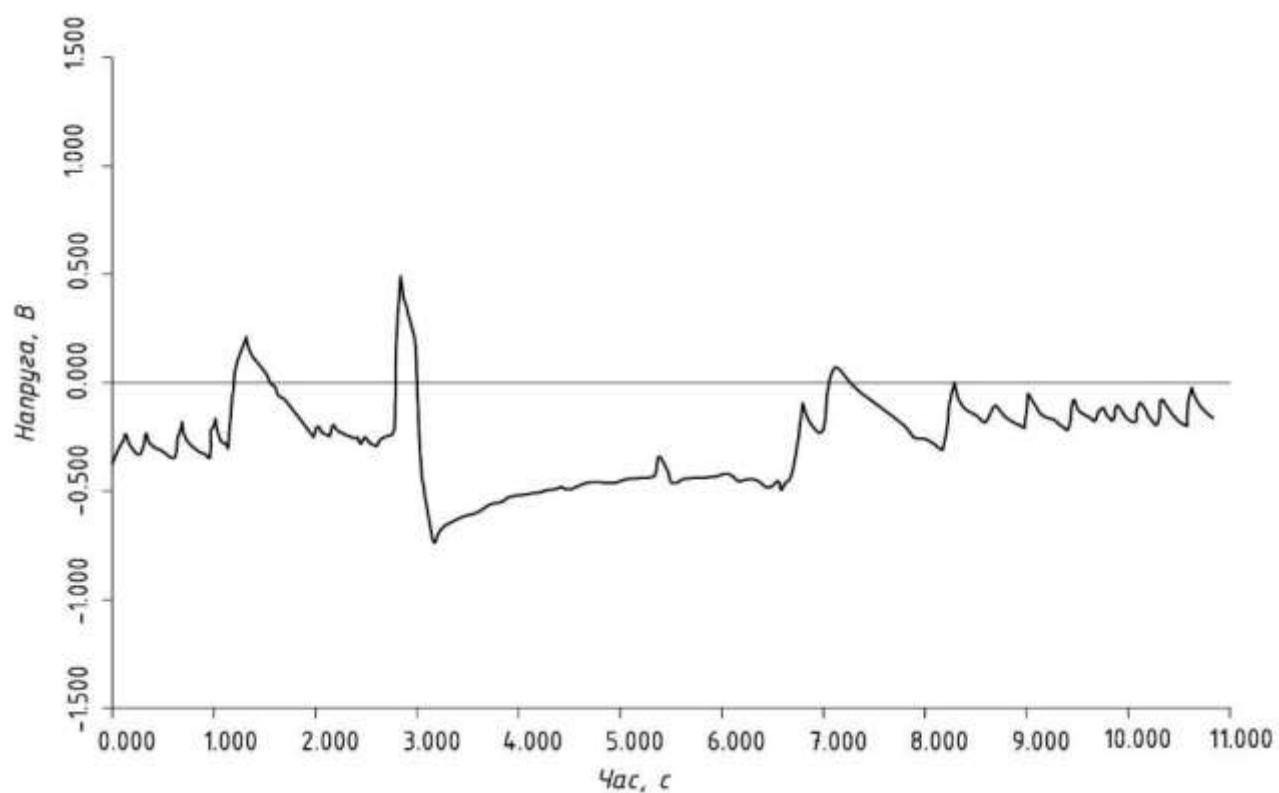


Рисунок 4.21 – Обертання ланки 2: напруга на двигуні ланки 1

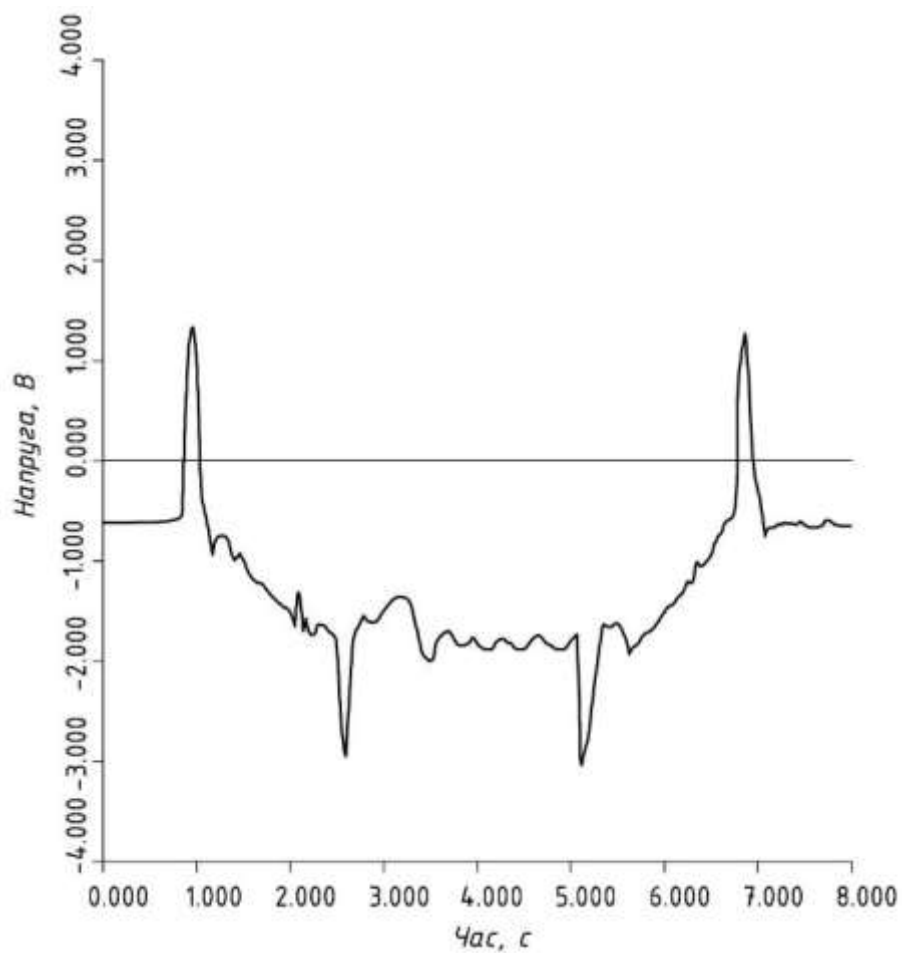


Рисунок 4.22 – Обертання ланки 2: напруга на двигуні ланки 2

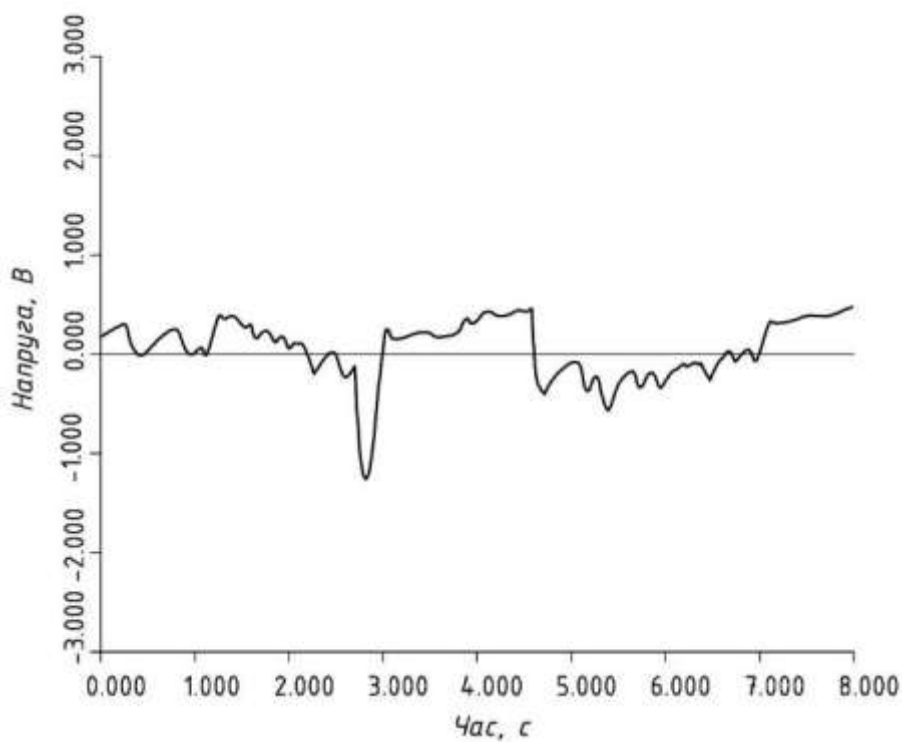


Рисунок 4.23 – Обертання ланки 2: напруга на двигуні ланки 3

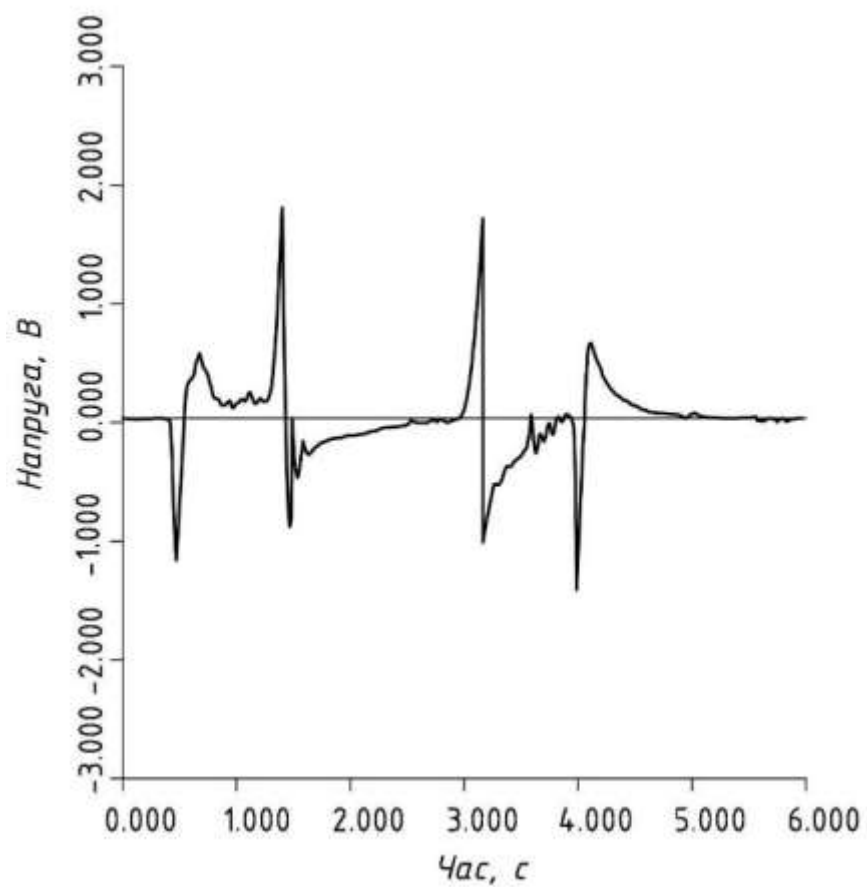


Рисунок 4.24 – Обертання ланки 3: тангенціальне прискорення

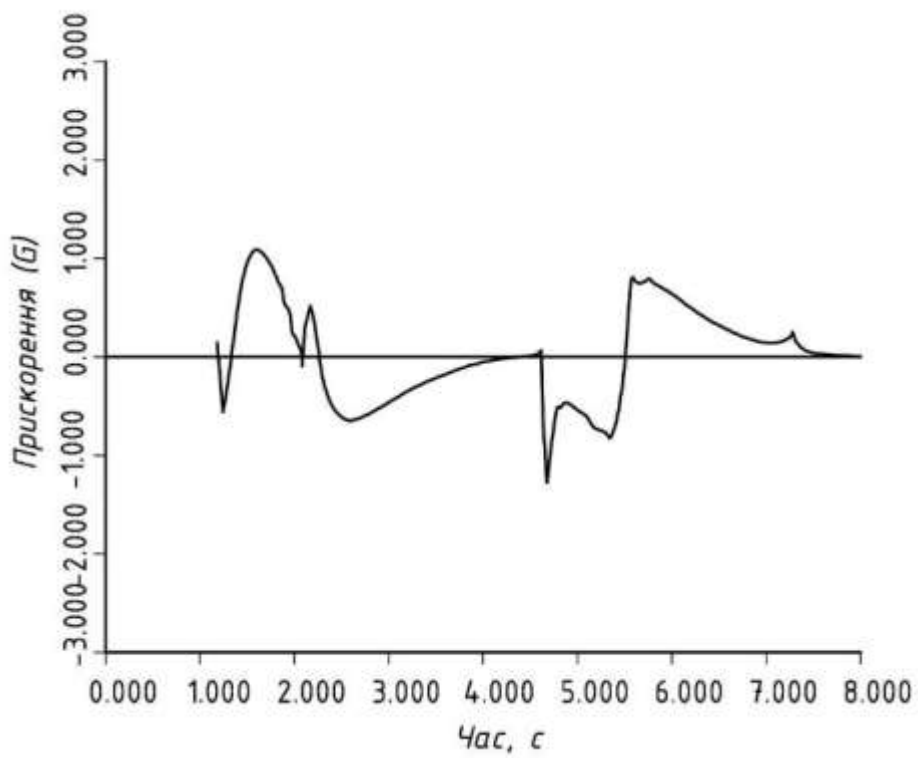


Рисунок 4.25 – Обертання ланки 3: нормальне прискорення

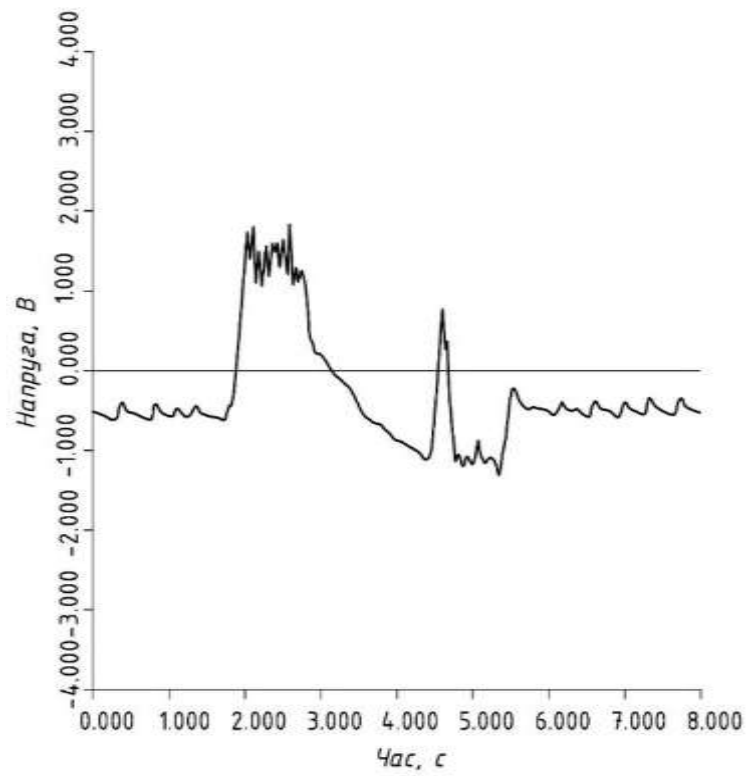


Рисунок 4.26 – Обертання ланки 3: напруга на двигуні ланки 1

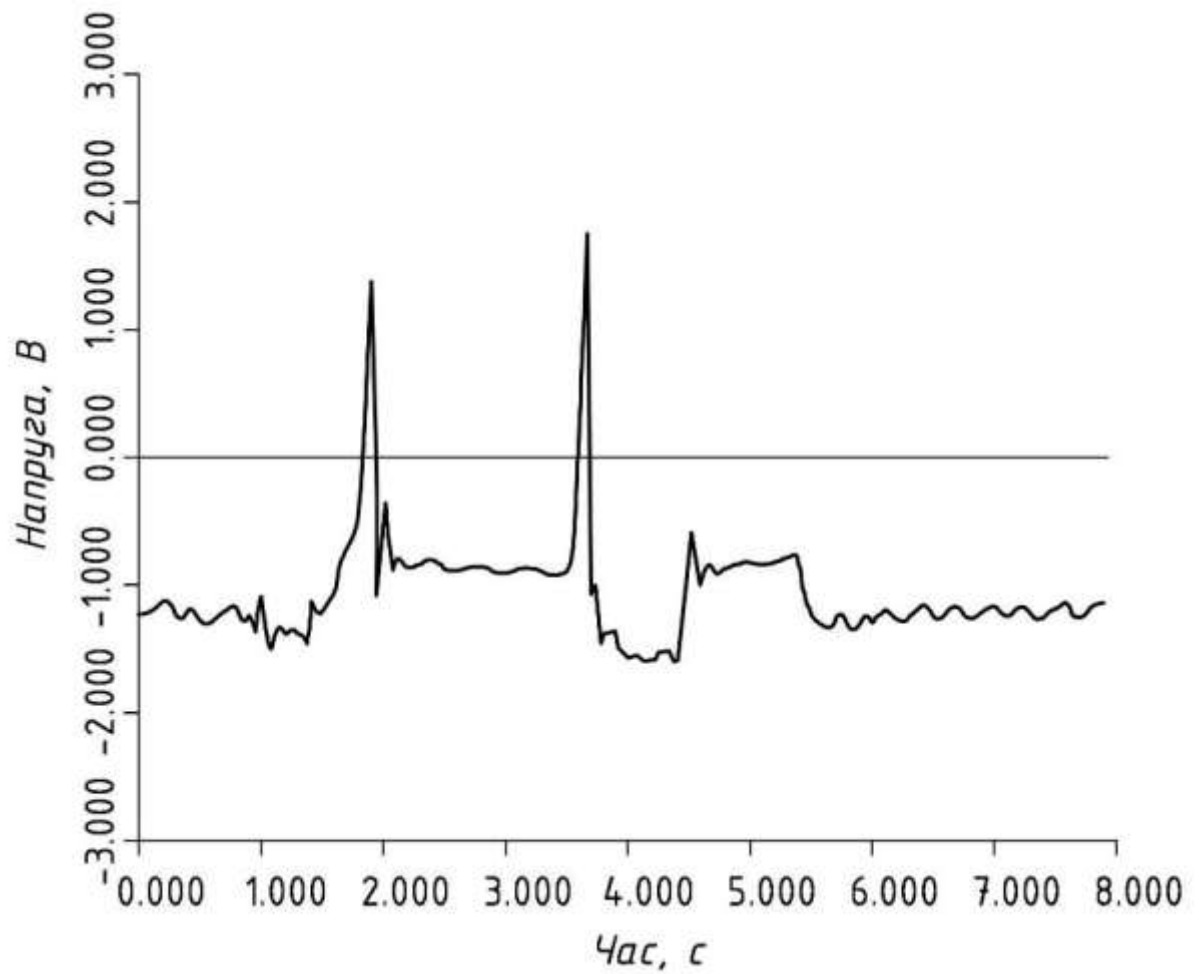


Рисунок 4.27 – Обертання ланки 3: напруга на двигуні ланки 2

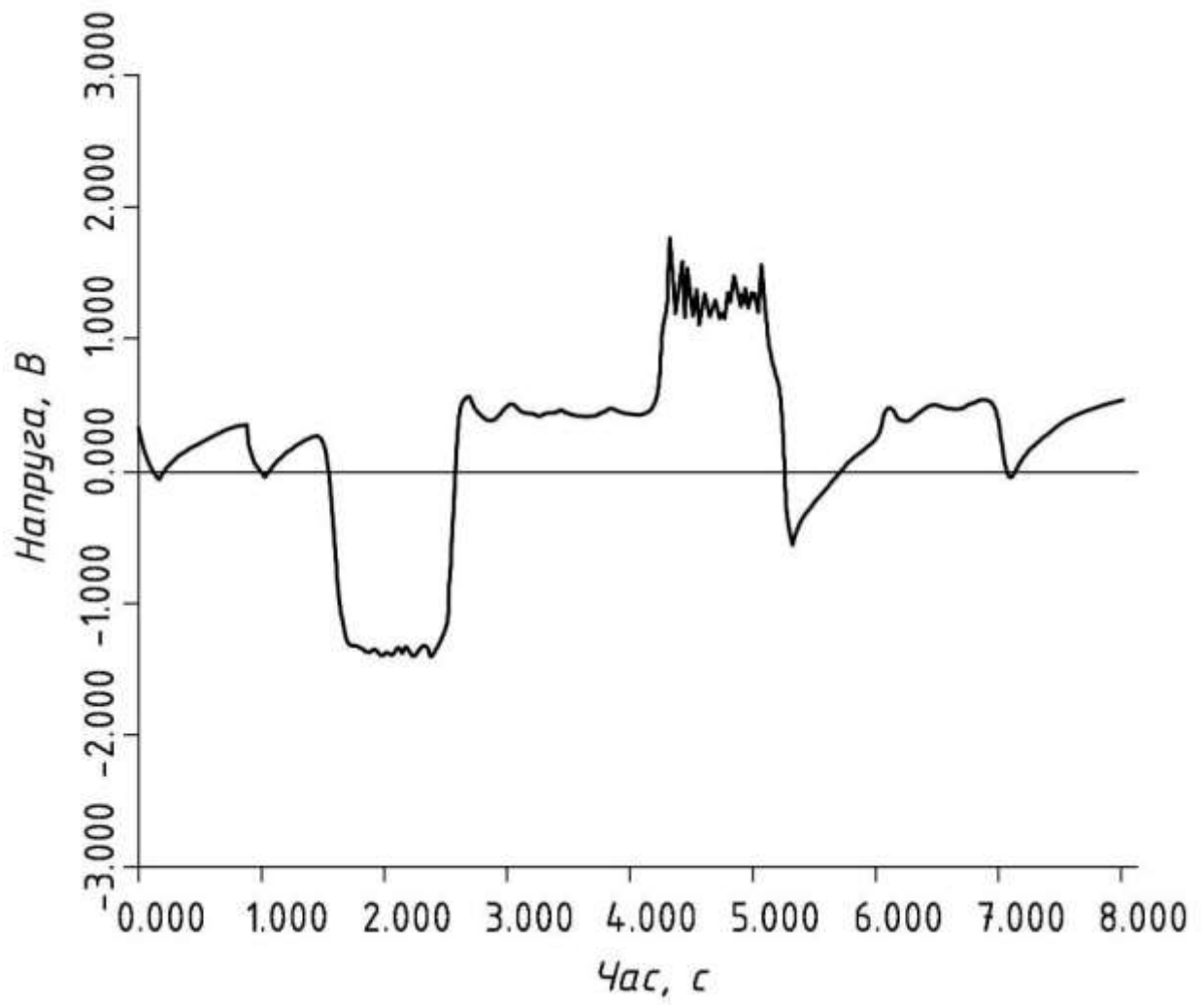


Рисунок 4.28 – Обертання ланки 3: напруга на двигуні ланки 3

5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1 Загальні відомості про програмування промислового робота PUMA 560

Робот PUMA 560 є одним із найпоширеніших шестивісних промислових маніпуляторів, який широко використовується для навчання, досліджень та реалізації алгоритмів керування рухом. Його архітектура та кінематична структура дозволяють виконувати широкий спектр типових промислових задач: маніпулювання, складання, зварювання, тестування та автоматизацію виробничих процесів. Його часто використовують в університетських лабораторіях, дослідженнях з динаміки і керування, задачах з інверсної кінематики, тестуванні алгоритмів руху.

Маніпулятор має шість обертальних ступенів свободи, які утворюють комбінацію RRR-RRR. Така структура забезпечує універсальність рухів у просторі та дозволяє точно позиціонувати інструмент у довільній точці робочої області.

Залежно від контролера для робота PUMA 560 використовуються такі основні методи програмування:

- мова VAL / VAL-II – базова мова контролера Unimation;
- RCCL (Robotics C Control Language) – програмування на C;
- MATLAB Robotics Toolbox – програмне середовище для моделювання, кінематики та динаміки;
- ROS – використання PUMA 560 в сучасних робототехнічних системах;
- Simulink / Simscape Multibody.

Приклад коду на мові програмування VAL:

MOVE TO P1

SPEED 50

APPROACH P2

DEPART P2

Бібліотека Ci для керування роботом:

```
move(joint_space, q_target);  
set_speed(0.3);
```

Найпопулярніший спосіб програмування PUMA 560 – MATLAB Robotics Toolbox (Peter Corke) ілюструється рис. 5.1.

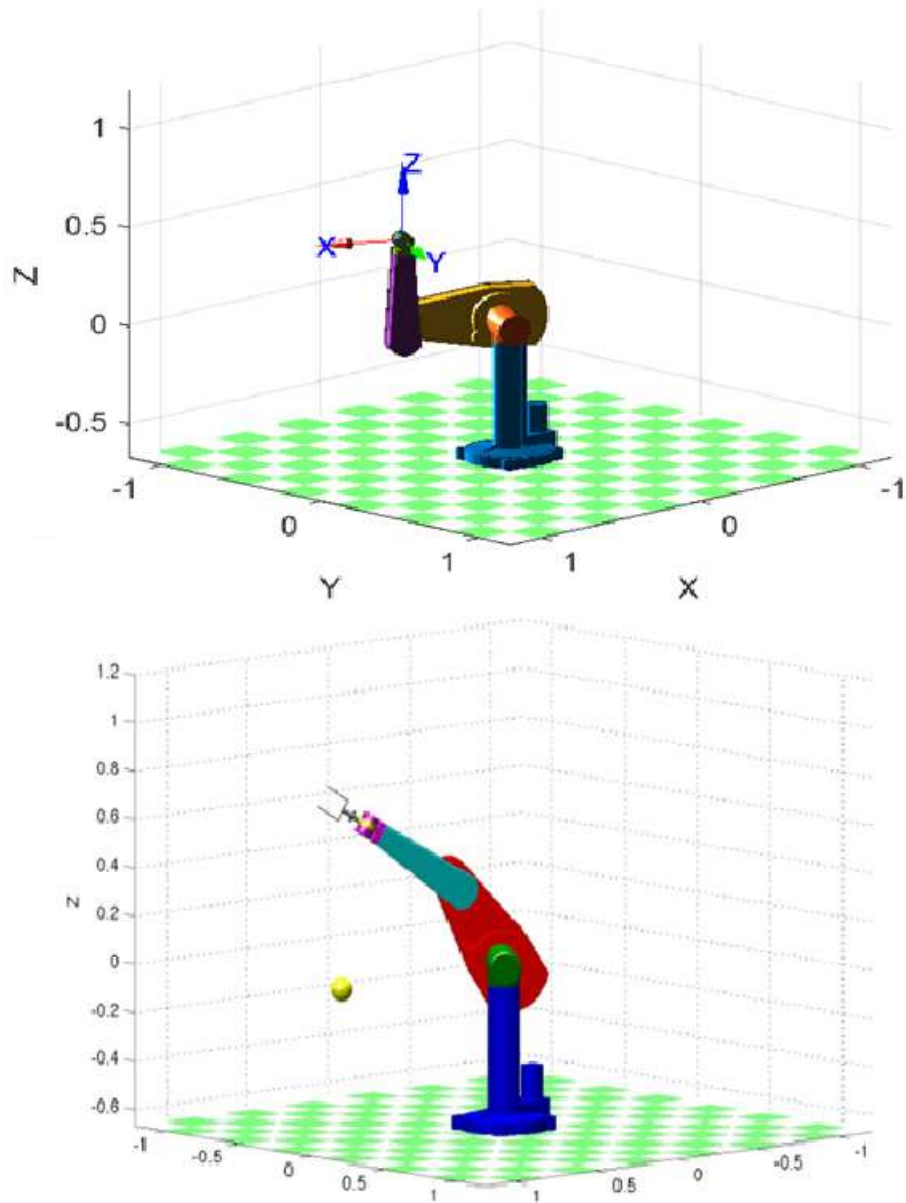


Рисунок 5.1 – Приклад програмування робота в MATLAB

Кінематика маніпулятора визначає залежність між координатами інструмента та положеннями його ланок. Для PUMA 560 існує аналітичне рішення задачі оберненої кінематики, що робить його зручним для досліджень.

Модель динаміки робота визначається параметрами мас, моментів інерції та геометрії ланок. PUMA 560 часто використовується як еталон у дослідженнях алгоритмів керування за моментами, компенсації гравітації та розрахунку оптимальних траєкторій.

Програмування PUMA 560 мовою VAL-II

VAL-II – це командна мова, схожа на BASIC.

Структура програми

```
PROGRAM TEST
```

```
SPEED 40
```

```
MOVE HOME
```

```
MOVE P1
```

```
MOVE P2
```

```
END
```

Призначення основних команд наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Призначення команд на мові VAL-II

Команда	Призначення
MOVE P1	переміщення в точку P1
SPEED 30	відсоток максимальної швидкості
OPEN / CLOSE	керування захватом
DELAY 1.0	затримка 1 с
APPROACH P1	підхід до точки на безпечну відстань
DEPART P1	відхід після виконання дії

Задання координат точок

P1 = TRANS(400, 100, 300, 0, 90, 0)

P2 = TRANS(500, -50, 200, 0, 90, 0)

Програмування у MATLAB (Robotics Toolbox)

Завантаження моделі робота

```
p560 = loadrobot('puma560','DataFormat','row');
```

Відображення робота

```
show(p560, [0 -pi/4 pi/4 0 0 0])
```

Прямі кінематичні рівняння

```
q = [0 -pi/4 pi/4 0 pi/6 0];
```

```
T = getTransform(p560, q, 'tool0')
```

Обернена кінематика

```
T = transl(0.4, 0.2, 0.3);
```

```
q = p560.ikine6s(T);
```

Генерація траєкторії

```
t = (0:0.05:2)';
```

```
q1 = [0 -pi/6 pi/3 0 pi/4 0];
```

```
q2 = [0 -pi/3 pi/2 0 pi/6 0];
```

```
[q,qd,qdd] = jtraj(q1, q2, t);
```

```
p560.plot(q)
```

RCCL (Robotics C Control Language)

Підключення бібліотеки

```
#include <rccl.h>
```

```
ROBOT puma;
```

```
puma = robot_load("puma560");
```

Рух у спільному просторі

```
double q[6] = {0, -0.5, 0.7, 0, 0.2, 0};
```

```
move(JOINT, q);
```

Рух у декартовому просторі

```
POSE p = {0.4, 0.2, 0.3, 0, 1.57, 0};
```

```
move(CARTESIAN, &p);
```

5. ROS + Gazebo

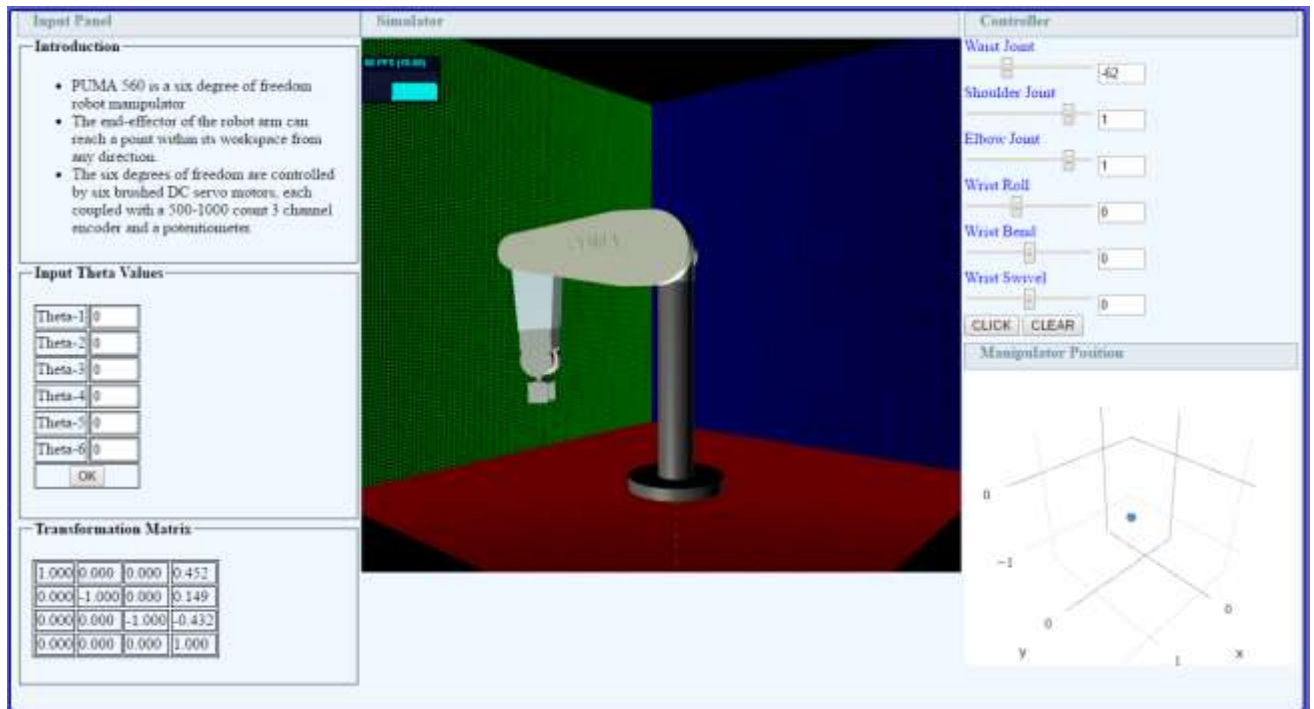


Рисунок 5.2 – Приклад програмування в ROS

В ROS доступні пакети:

- URDF-модель PUMA 560
- контролери: position/velocity/effort
- MoveIt! для планування руху

Приклад запуску:

```
roslaunch puma560_description display.launch
```

Планування руху з MoveIt!

```
group.set_pose_target(pose)
```

```
plan = group.plan()
```

```
group.execute(plan)
```

5.2 Послідовність написання програми для робота

Типова процедура написання програми для робота передбачає виконання

певної послідовності кроків.

Крок 1. Увімкнення та ініціалізація робота.

1. Увімкнути контролер.
2. Перевести робота в режим «Teach».
3. Виконати калібрування з початкової точки HOME.

Крок 2. Навчання.

1. Вибрати точку робочої зони.
2. Перемістити робота у неї через teach-pendant.
3. Записати точку:

POINT P1

Крок 3. Написання програми.

Приклад:

PROGRAM PICK_AND_PLACE

SPEED 40

; Підхід до об'єкта

APPROACH P1

MOVE P1

CLOSE

; Переміщення

MOVE P2

OPEN

DEPART P2

END

Крок 4. Тестування на низькій швидкості.

SPEED 10

RUN PICK_AND_PLACE

Крок 5. Перехід до виробничого режиму.

Після перевірки:

SPEED 60

RUN PICK_AND_PLACE

Дотримання послідовності, яка рекомендується, дозволить забезпечити функціонування робота за заданою програмою і уникнути аварійних ситуацій.

5.3 Програмування робота для дослідження динамічних параметрів

Для полегшення аналізу даних, було прийнято рішення «розкласти» рухи робота по окремих ланках, тобто змусити одночасно рухатися тільки на одну ланку робота. Тому було виділено три види руху: обертання основи, обертання плечей і обертання ліктя.

Програма, необхідна для реалізації таких рухів, буде мати в трьох випадках однаковий вигляд. Визначення двох точок у просторі (початкової та кінцевої) було виконано для кожного випадку шляхом ручного керування роботом, коли робот повинен був виконати рух для переведення схвата з встановленими на ньому трьома акселерометрами з одного положення в інше, дотримуючись колової траєкторії, тобто по колу.

Програма VAL для цього випадку матиме такий вигляд.

1. APPRO PART,0

2. MOVES PART

3. CLOSEI

4. APPRO POS1,0

5. REPEAT 0

6. OPENI

де PART – це унікальне ім'я точки, до якої повинен був переміститися схват, і орієнтацію, яку схват повинен зайняти в цій точці, а POS1 – кінцева точка.

Значення кожного рядка цієї програми в цьому контексті таке:

1. Переміщення до позиції PART.
2. Витримка часу (час перебування в цій позиції).
3. Витримка часу.
4. Переміщення по дузі до місця розташування POS1.
5. Витримка часу.
6. Витримка часу.

Необхідно відзначити, що виконання цієї програми один раз, починаючи з місця PART, змушує робота переміщатися по вільному розташуванню PART в локацію POS1, а потім назад в локацію PART, при цьому кінцевий ефектор завжди слідує по дузі кола.

Інструкції 2, 3, 5 і 6 використовуються тут лише для того, щоб утримувати робота зупиненим у певному місці, і в прикладних програмах, що використовувалися під час збору даних, в кожному місці використовувалася більша затримка, оскільки це виявилось зручним для аналізу даних. Ці інструкції, звичайно, мають інше значення в загальній програмі VAL.

Три відокремлені програми були відредаговані і збережені на диску. Програми отримали назви JOINT1, JOINT2 і JOINT3, і кожна з них відповідає за незалежне обертання відповідного ланки при виконанні.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1.1 Забезпечення умов безпеки праці шляхом механізації і автоматизації технологічних процесів та обладнання

Радикальним методом забезпечення безпеки є механізація, автоматизація та дистанційне керування виробничими процесами. Основною метою цих методів поряд із забезпеченням безпеки є підвищення продуктивності праці, звільнення людини від виконання важких і трудомістких операцій. Водночас із цим – створення кращих умов праці та підвищення загальної культури виробництва.

Ефективним засобом зниження травматизму на важких і малопродуктивних роботах є механізація виробничих процесів. У цьому напрямку проведена велика робота з створення закінчених систем машин та технологічного обладнання, що дозволяє механізувати та автоматизувати технологічні цикли – від надходження сировини до відправки кінцевої продукції. У промисловості нараховується десятки тисяч механізованих і автоматизованих поточних ліній, велика кількість комплексно механізованих і автоматизованих ділень, цехів і виробництв. Існує велика кількість систем машин і обладнання, автоматичних маніпуляторів з програмним управлінням та промислових роботів, що дає можливість виключити ручну і монотонну працю, особливо в тяжких та шкідливих для людини умовах. Автоматизація і механізація дозволяє у складних умовах в значній мірі знизити рівень виробничого травматизму і професійних захворювань.

При впровадженні механізації відбувається полегшення праці тих людей, яких замінили машини. Однак при цьому має бути відповідний нагляд і контроль, щоб вони не могли стати причиною нещасних випадків.

Автоматизація виробничих процесів являє собою вищу форму механізації. Залежно від ступеня участі людини в технологічному процесі вона може бути частковою та комплексною. При частковій автоматизації без участі людини виконуються тільки окремі технологічні операції, які є частиною комплексу технологічних виробничих процесів.

Комплексна автоматизація передбачає повну ізоляцію людини від будь-яких операцій виробничого циклу. Робітник може знаходитись на безпечній відстані від агрегатів. Автоматизація лишає йому контроль за роботою устаткування, машин і механізмів, поєднаних в єдину технологічну лінію, а також обов'язки по їх налагодженню та регулюванню. При цьому потрібна більш висока організація праці, тому комплексна механізація отримала поширення тільки на крупних виробничих підприємствах.

На сучасному етапі розвитку продуктивних сил типовим явищем у виробничій діяльності є праця оператора в автоматизованій системі машин. Узгодження функцій автоматичних і напіваавтоматичних пристроїв з діяльністю оператора є досить складним завданням, яке вирішується методами інженерної психології та вимогами охорони праці.

У процесі автоматизації ускладнюється взаємодія людини з технічними засобами, що вимагає врахування психологічних чинників. Виконання операторами трудових функцій пов'язане з внутрішніми психічними процесами.

Ідеальним у виробничій діяльності має бути оптимальне узгодження фізіологічних і психологічних особливостей оператора з технологічним процесом.

Автоматизація тих чи інших технологічних процесів залежить від характеру і конкретних умов виробництва, ступеня його трудомісткості.

Технологічні процеси при комплексній автоматизації послідовно виконуються на автоматичній лінії без фізичного втручання людини.

Високі швидкості сучасних механізмів настільки ускладнюють управління технологічним обладнанням і технологічними процесами, що психофізіологічні можливості людини неспроможні достатньо швидко і адекватно реагувати на обставини, що складаються.

Безмежно розширює можливості людини впровадження електронної техніки, що дає можливість створювати машини для управління іншими машинами, а також машини, які замінюють людину.

Для вирішення того чи іншого завдання керуючим машинам задається відповідна програма, за допомогою якої вони самостійно ведуть технологічні процеси за оптимальними режимами. Використання електронних машин

позбавляє оператора від напруження, полегшує фізичну працю в такій мірі, яка недосяжна навіть сучасним автоматизованим пристроям, а основне – робить її більш безпечною.

Вирішення питань безпеки на механізованих і автоматизованих системах набуває особливої актуальності при їх налагоджуванні та ремонті. В цьому плані має вирішуватись питання щодо повної механізації ремонтно-монтажних робіт.

Автоматичні лінії, які нині працюють на багатьох виробництвах, самостійно виконують всі задані операції у визначеній послідовності і потребують висококваліфікованого персоналу тільки для налагодження та контролювання. На таких лініях відновлення порушеної роботи технологічного обладнання, режиму технологічного процесу і підтримування визначених параметрів здійснюється відповідними автоматичними пристроями. Таке автоматичне регулювання дає можливість виконувати роботу без втручання людини в технологічний цикл, і при цьому виключаються помилкові дії оператора.

Разом з тим в наш час внаслідок цілого ряду об'єктивних причин у багатьох галузях господарства ще досить великий відсоток немеханізованих і неавтоматизованих робіт. Мають місце в умовах виробництва такі випадки, коли високопродуктивні машини при відсутності механізації для проміжних операцій експлуатуються з низьким коефіцієнтом використання або вимагають великої кількості допоміжних робітників, які іноді працюють в особливо несприятливих умовах. В цих випадках особлива роль відводиться інженерно-технічному персоналу, який в реальних умовах виробництва має розробляти і впроваджувати засоби малої механізації для полегшення ручної праці в допоміжних операціях основного процесу.

6.1.2 Характеристика небезпечних зон обладнання і розробка заходів безпеки

Безпека технологічних процесів визначається безпекою виробничого обладнання, оснащення, сировини і матеріалів, що використовуються. Вона

повинна забезпечуватися комплексом проектно-конструкторських та організаційно-технологічних рішень, які полягають в раціональному виборі як усього технологічного процесу, так і окремих технологічних операцій; підборі виробничого обладнання та приміщень; у виборі способів транспортування та умов зберігання матеріалів, напівфабрикатів, готової продукції та відходів виробництва.

Для забезпечення вимог безпеки виробниче обладнання повинно бути безпечним при монтажі, експлуатації та ремонті як окремо, так і в складі комплексів і технологічних схем.

Небезпечна зона обладнання – це простір, у якому можливий вплив на працюючого небезпечного або шкідливого виробничого фактора. Небезпечна зона може бути локалізована навколо або поблизу рухомих елементів обладнання (зубчастих, пасових або ланцюгових передач, обертових частин, різального інструменту тощо), або зумовлюватися можливістю враження електричним струмом, дією електромагнітних, іонізуючих, лазерних, ультрафіолетових та інфрачервоних випромінювань, шуму, вібрації, ультразвуку, шкідливих газів, парів і пилу, а також можливістю травмування стружкою, що відлітає. Розміри небезпечної зони в просторі і в часі можуть бути постійними (наприклад, зона між пуансоном і матрицею в пресах) і змінними (наприклад, радіус відльоту стружки може змінюватися в залежності від властивостей матеріалу, що обробляється і режимів різання).

Для забезпечення безпеки повинні передбачатися пристрої, які виключають або можливість попадання працюючих в небезпечну зону обладнання, або послаблюють чи виключають дію небезпечного фактора.

Конструктивні частини обладнання повинні виключати можливість їх випадкового пошкодження, яке може викликати небезпеку. Конструктивні матеріали не повинні бути небезпечними або шкідливими. Застосування нових матеріалів та речовин, які не пройшли відповідних перевірок, не допускається.

Рухомі частини обладнання, які становлять небезпеку для працюючих, повинні огорожуватися або оснащуватися іншими засобами захисту. Конструкція обладнання повинна виключати можливість випадкового дотику

працюючих до гарячих чи переохолоджених частин, а також елементів, що мають гострі кромки і кути. Повинен бути передбачений захист від враження електричним струмом, в тому числі і у випадку помилкових дій персоналу, а також виключена можливість нагромадження зарядів статичної електрики в небезпечній кількості.

Конструкція обладнання повинна забезпечувати виключення або зниження до регламентованих рівнів шуму, вібрації, шкідливих випромінювань. Обладнання не повинно служити джерелом виділення в робочу зону виробничих приміщень шкідливих речовин вище гранично допустимих концентрацій, а також великих кількостей тепла і вологи, які погіршують метеорологічні умови.

Обладнання повинно оснащуватися засобами сигналізації про порушення нормального режиму роботи, а в необхідних випадках – засобами аварійної зупинки та відключення.

Для запобігання небезпеці при несподіваному відключенні енергії всі робочі, підйомні та захоплюючі органи і механізми повинні бути оснащені захисними пристроями, які виключають викид чи випадання виробів або інструменту. Також повинна бути виключена можливість самовільного включення приводів робочих органів при повторному включенні енергії після її випадкового відключення.

Органи управління повинні забезпечувати надійність запуску і швидкість зупинки, зручність застосування, зусилля для їх переміщення повинні бути невеликими. Вони повинні мати зручні для роботи і безпечні форму і розміри, а їх конструкція повинна виключати можливість мимовільного ввімкнення та вимкнення, а також здійснення неправильної послідовності операцій.

Органи управління повинні мати символічні позначення або відповідні надписи. Органи аварійного керування повинні бути пофарбовані в червоний колір, оснащені відповідними надписами і розташовані в легкодоступних місцях.

Засоби захисту, яку є конструктивними елементами обладнання, повинні постійно виконувати свої захисні функції: спрацьовувати при проникненні людини в небезпечну зону обладнання, при появі небезпечного або шкідливого фактора.

При відключених, несправних або знятих засобах захисту обладнання повинно автоматично відключатися і повинна бути виключена можливість його включення до відновлення засобів захисту. Засоби захисту повинні здійснювати самоконтроль або бути легкодоступними для контролю та обслуговування.

6.1.3 Основні поняття в галузі охорони праці

Згідно з державним стандартом охорона праці – це система законодавчих актів і відповідних соціально-економічних, технічних, гігієнічних та організаційних заходів, що забезпечують безпеку людини, збереження її здоров'я і працездатності в процесі праці.

Виробнича діяльність передбачає взаємовідносини людини з предметами й знаряддями праці, іншими людьми. У процесі такої взаємодії людина залежно від характеру праці може зазнавати різноманітного зовнішнього впливу: механічного, теплового, хімічного, електричного, електромагнітного, радіаційного й т. ін. Усе це в сукупності характеризує стан безпеки праці, наявність засобів захисту та загальні умови праці.

Під безпекою праці розуміють такий стан виробничих обставин, за яких унеможлиблюється вплив шкідливих або небезпечних виробничих чинників на працюючих.

Під безпекою виробничого обладнання розуміють здатність обладнання зберігати безпечний стан при виконанні заданих функцій в умовах, регламентованих нормативною документацією.

Під засобами захисту працюючих розуміють колективні та індивідуальні засоби, використання яких запобігає дії небезпечних та шкідливих виробничих чинників на працюючих або зменшує цю дію.

У широкому розумінні умови праці включають в себе санітарно-гігієнічну обстановку, рівень технічної оснащеності, характер технологічних процесів, організацію виробничого процесу та робочих місць, режим праці й відпочинку, естетику виробництва та взаємовідносини людей у виробничому процесі.

Санітарно-гігієнічна обстановка визначає санітарний стан виробництва та можливість впливу на працюючих шкідливих виробничих чинників, що можуть

призвести до професійних захворювань. Ці питання вивчає виробнича санітарія.

Виробнича санітарія – це система організаційних і технічних заходів, що запобігають дії шкідливих виробничих чинників на організм людини або зменшують цю дію.

Під організаційними заходами розуміють правильну організацію праці на робочих місцях, дотримання відповідного режиму праці, проведення навчання та інструктажів щодо правильного використання різних речовин, що можуть негативно впливати на стан здоров'я людини та забруднювати навколишнє середовище. Сюди слід віднести організацію постійного нагляду й контролю за дотриманням санітарних норм і правил при використанні речовин і матеріалів з токсичними властивостями, виконанням вимог спеціальних правил при зведенні виробничих споруд і будівель, а також у процесі їх експлуатації.

Під технічними засобами розуміють належне використання існуючих спеціальних колективних та індивідуальних засобів захисту працюючих для боротьби із шкідливими чинниками, а також розробку більш досконалих методів на основі нових наукових досягнень.

Рівень технічної оснащеності й характер технологічних процесів визначає стан забезпечення виробничих підприємств засобами механізації та автоматизації, відповідність їх світовим стандартам. Низку цих питань розглядає техніка безпеки, яка органічно пов'язана з питаннями виробництва й технологій.

Техніка безпеки – це система організаційних і технічних заходів і засобів, що запобігають впливу небезпечних виробничих чинників на працюючих. Техніка безпеки є розділом основ охорони праці. Предмет вивчення цього розділу – безпека праці в умовах виробництва при максимальній її продуктивності. Техніка безпеки ґрунтується на розрахунках і конструюванні запобіжних засобів, пристроїв та апаратів, на спостереженнях та експериментуванні; у полі зору її має бути все те, що необхідне для створення безпечних та нешкідливих умов праці.

Завдання техніки безпеки – вивчати й виявляти всі чинники, що прямо чи опосередковано впливають на виникнення небезпечних моментів, що призводять до нещасних випадків, гострих професійних захворювань та отруєнь, і розробляти запобіжні організаційні та технічні заходи.

До організаційних заходів належать такі: огороження території виробничого підприємства, будівельного майданчика й небезпечних зон; облаштування проходів і проїздів, що забезпечують вільний доступ до всіх об'єктів; забезпечення системи освітлення, водопостачання, енергопостачання; розміщення зон складування, постійних і тимчасових доріг і т. ін.

До технічних заходів належать такі: виконання відповідних інженерних розрахунків, що забезпечують безпеку робіт; розрахунки риштувань; розробка монтажно-технічного устаткування; схеми кріплення будівельних конструкцій, траншей і котлованів; схеми строповки конструкцій, добір канатів, строп, траверс, якорів та інших вантажозахватних пристроїв; забезпечення електробезпеки та безпечної роботи ємностей, що працюють під тиском, та ін. Для вирішення цих питань вивчаються виробничі процеси, обладнання, машини та інструменти, стан будівель, споруд, робочих місць, відповідність колективних та індивідуальних захисних засобів характеру праці та інші чинники, які певною мірою можуть спричинити виникнення небезпечної і шкідливої обстановки у виробничих умовах.

Щоб успішно вирішити зазначені вище проблеми, необхідно:

- створювати безпечну техніку та впроваджувати безпечні технологічні процеси;
- впроваджувати в технологічні процеси автоматизацію, блокування й захисні засоби, що забезпечують безпеку праці;
- навчати персонал правилам та нормам безпеки праці і вимагати їх дотримання;
- виявляти причини травматизму і потенційних небезпек в умовах виробництва;
- вдосконалювати існуючі методи та заходи захисту від шкідливих і небезпечних чинників.

6.1.4 Навчання з питань охорони праці при прийнятті на роботу і в процесі роботи

Організацію навчання та перевірки знань з питань охорони праці працівників при підготовці, перепідготовці, підвищенні кваліфікації на підприємстві здійснюють працівники служби кадрів або інші спеціалісти, яким керівником підприємства доручена організація цієї роботи.

Підготовка працівників для виконання робіт з підвищеною небезпекою здійснюється лише в закладах освіти (ЗО) які одержали в установленому порядку ліцензію Міністерства освіти і науки України та дозвіл Державного нагляду з охорони праці на проведення такого навчання. При підготовці працівників для робіт з підвищеною небезпекою дисципліна загального курсу «Охорона праці» вивчається в обсязі не менше ніж 30 год., а специфічні питання з охорони праці, пов'язані з виконанням робіт з підвищеною небезпекою, вивчаються в курсах спеціальних дисциплін і органічно поєднуються з вивченням технології виробництва.

Для решти робіт підготовка, перепідготовка працівників за професіями можуть здійснюватися як в ЗВО, так і на підприємстві. При цьому дисципліна загального курсу «Охорона праці» вивчається в обсязі не менше ніж 20 год. Робочі навчальні плани і програми підготовки, перепідготовки, підвищення кваліфікації працівників розробляють на підприємстві на основі типових навчальних планів і програм, затверджених Міністерством освіти і науки, молоді та спорту з погодженням з Держнаглядохоронпраці. Навчальні плани та програми підготовки та перепідготовки працівників повинні передбачати теоретичне і практичне (виробниче) навчання з курсу «Охорона праці».

Працівники, яких приймають на роботу, проходять на підприємстві попереднє спеціальне навчання і перевірку знань з питань охорони праці стосовно конкретних робіт, які вони виконуватимуть. Попереднє спеціальне навчання і перевірка знань працівників за його результатами проводиться одноразово до початку самостійної роботи, а також у разі перерви в роботі понад 1 рік. Періодичні перевірки знань працівників проводяться в терміни, встановлені відповідними міжгалузевими і галузевими нормативними актами, але не рідше 1 разу на рік.

На підприємствах для перевірки знань працівників з питань охорони праці наказом керівника створюються постійно діючі комісії. Головами комісій призначаються заступники керівників підприємств, в обов'язки яких входить організація роботи з охорони праці, а в разі потреби створення комісій в окремих структурних підрозділах їх очолюють керівники відповідних підрозділів чи їх заступники.

Перед перевіркою знань працівників з питань охорони праці на підприємстві організовуються заняття: лекції, семінари та консультації. Перелік питань для перевірки знань з охорони праці з урахуванням специфіки виробництва складають члени комісії з перевірки знань з питань охорони праці, погоджує служба охорони праці і затверджує керівник підприємства.

Посадові особи і спеціалісти зобов'язані проходити попередню і періодичну перевірку знань з охорони праці до початку виконання своїх обов'язків, а також періодично один раз на 3 роки, проходять навчання і перевірку знань з питань охорони праці.

Одним з розділів «Типового положення про навчання з питань охорони праці» є інструктажі з питань охорони праці. За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий.

Усі працівники, яких приймають на постійну чи тимчасову роботу і при подальшій роботі, повинні проходити на підприємстві навчання в формі інструктажів з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих.

Вступний інструктаж проводиться спеціалістом служби охорони праці, а в разі відсутності на підприємстві такої служби – іншим фахівцем, на якого наказом по підприємству покладені ці обов'язки. Вступний інструктаж проводиться в кабінеті охорони праці, з використанням сучасних технічних засобів навчання, навчальних та наочних посібників за програмою розробленою службою охорони праці з урахуванням особливостей виробництва. Запис про проведення вступного інструктажу робиться в журналі реєстрації вступного інструктажу, який

зберігається в службі охорони праці або в працівника, що відповідає за проведення вступного інструктажу, а також у документі про прийняття працівника на роботу.

Первинний інструктаж проводиться індивідуально або з групою осіб одного фаху за діючими на підприємстві інструкціями з охорони праці відповідно до виконуваних робіт, а також з урахуванням вимог орієнтовного переліку питань первинного інструктажу.

Повторний інструктаж проводиться індивідуально з окремим працівником або з групою працівників, які виконують однотипні роботи, за обсягом і змістом переліку питань первинного інструктажу, але не рідше: на роботах з підвищеною небезпекою – один раз на 3 місяці; для решти робіт – один раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться індивідуально з окремим працівником або з групою працівників одного фаху. Обсяг і зміст позапланового інструктажу визначаються в кожному окремому випадку залежно від причин і обставин, що спричинили потребу його проведення. Наприклад, при введенні в дію нових або переглянутих нормативних актів про охорону праці, а також при внесенні змін та доповнень до них; при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці; при порушеннях працівником вимог охорони праці, що можуть призвести або призвели до травм, аварій, пожеж тощо; при виявленні особами, які здійснюють нагляд за охороною праці, незнання вимог безпеки стосовно робіт, що виконуються працівником; при перерві в роботі більш ніж на 30 календарних днів – для робіт з підвищеною небезпекою, а для решти робіт – понад 60 днів.

Цільовий інструктаж проводиться індивідуально з окремим працівником або з групою працівників. Обсяг і зміст цільового інструктажу визначається залежно від виду робіт, що ними виконуватимуться.

Первинний, повторний, позаплановий і цільовий інструктажі проводить безпосередній керівник робіт (начальник виробництва, цеху, дільниці, майстер). Ці види інструктажу завершуються перевіркою знань у вигляді усного опитування або за допомогою технічних засобів, а також перевіркою набутих навичок

безпечних методів праці. Знання перевіряє особа, яка проводила інструктаж. При незадовільних результатах перевірки знань, умінь і навичок щодо безпечного виконання робіт після первинного, повторного чи позапланового інструктажів для працівника протягом 10 днів додатково проводяться інструктаж і повторна перевірка знань. При незадовільних результатах і повторної перевірки знань питання щодо працевлаштування працівника вирішується згідно з чинним законодавством. При незадовільних результатах перевірки знань після цільового інструктажу допуск до виконання робіт не надається. Повторна перевірка знань при цьому не дозволяється.

Про проведення первинного, повторного, позапланового та цільового інструктажів особою, якою проводився інструктаж, вноситься запис до журналу реєстрації інструктажів з питань охорони праці. При цьому обов'язкові підписи як того, кого інструктували, так і того, хто інструктував. Сторінки журналу реєстрації повинні бути пронумеровані, журнали прошнуровані і скріплені печаткою.

6.2 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.2.1 Визначення та причини виникнення надзвичайних ситуацій

Законодавство України визначає надзвичайну ситуацію як порушення нормальних умов життя та діяльності людей на об'єкті чи території, спричинених аварією, катастрофою, стихійним лихом, епідемією, епізоотією, великою пожежею, використання засобів ураження, що призвели чи можуть призвести до людських чи матеріальних втрат.

Аварія – це небезпечна подія техногенного характеру, що створює на об'єкті, території або акваторії загрозу для життя і здоров'я людей і призводить до руйнування будівель, споруд, обладнання і транспортних засобів, порушення виробничого або транспортного процесу чи завдає шкоди довкіллю.

Катастрофа – це раптове лихо чи велика подія, яка тягне за собою тяжкі наслідки для людини, тваринного чи рослинного світу, змінюючи умови середовища існування. Це результат різкого чи стрибкоподібного переходу природного, біологічного чи соціально-економічного середовища з виникненням вражаючих факторів, які наносять значну шкоду соціальним і природним системам. Іноді, підкреслюючи всесвітній характер катастрофи, її називають катаклізмом. Залежно від масштабності та тривалості впливу на природне середовище, катастрофи розділяють на локальні, регіональні та глобальні. Прикладами глобальних катастроф можуть служити особливо тяжкі аварії, військові конфлікти, різні стихійні лиха, що заподіюють велику шкоду.

Події природного походження або результат діяльності природних процесів, які за своєю інтенсивністю, масштабом поширення і тривалістю можуть вражати людей, об'єкти економіки та довкілля, звуться небезпечними природними явищами. Руйнівне небезпечне природне явище – це стихійне лихо.

Епідемія – це масове розповсюдження інфекційної хвороби людей у часі та просторі, у межах певного регіону, що перевищує звичайний рівень захворюваності, який реєструється на цій території, в 1,5 раза протягом 3-х днів – в 1-2 районах.

Причинами надзвичайних ситуацій можуть стати також епізоотії – одночасне поширення інфекційної хвороби серед великої кількості одного чи багатьох видів тварин, що значно перевищує звичайний зареєстрований рівень захворюваності на певній території; та епіфітотії – масове інфекційне захворювання рослин, що супроводжується чисельною загибеллю культур і зниженням їх продуктивності.

В Україні щороку виникають тисячі надзвичайно складних ситуацій природного та техногенного характеру, внаслідок яких гине велика кількість людей, а матеріальні збитки сягають кількох мільярдів гривень. Сьогоднішня ситуація в Україні щодо небезпечних природних явищ, аварій і катастроф характеризується як дуже складна. Тенденція зростання кількості природних і особливо техногенних НС, складність цих наслідків змушують розглядати їх як серйозну загрозу безпеці окремої людини, суспільству та навколишньому середовищу, а також стабільності розвитку економіки країни. Для роботи в районі надзвичайної ситуації потрібно залучати значну кількість людських, матеріальних і технічних ресурсів.

Запобігання надзвичайним ситуаціям, ліквідація їх наслідків, максимальне зниження масштабів втрат та збитків перетворилося на загальнодержавну проблему і є одним з найважливіших завдань органів виконавчої влади і управління всіх рівнів.

6.2.2 Декларування промислової безпеки та ліцензування діяльності об'єктів

Декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки здійснюється з метою запобігання надзвичайним ситуаціям, а також забезпечення готовності до локалізації та ліквідації їх наслідків. Основним завданням декларування є покладання на підприємця обов'язків щодо здійснення комплексу робіт з оцінки небезпеки експлуатованих ним об'єктів з урахуванням запроваджених заходів щодо запобігання виникнення і розвитку аварій.

Суб'єкт господарської діяльності ідентифікує об'єкти підвищеної небезпеки відповідно до кількості порогової маси небезпечних речовин.

Декларація безпеки подається наглядовим органам як обов'язковий елемент для одержання ліцензії на експлуатацію об'єктів, а також місцевим органам виконавчої влади і місцевого самоврядування для інформування про проведену роботу.

Завдяки цьому підвищується відповідальність керівників організацій, які експлуатують об'єкти підвищеної небезпеки, в частині безпеки та інформованості про це наглядових органів і органів місцевого самоврядування.

Основи декларування промислової безпеки небезпечних виробництв визначає Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» та нормативно-правові акти Кабінету Міністрів України.

Відповідно до них:

- розробка декларацій промислової безпеки передбачає всебічну оцінку ризику аварій і пов'язані з нею загрози; аналіз достатності запроваджених заходів щодо запобігання, а також до локалізації і ліквідації наслідків аварії на небезпечному об'єкті; розробка заходів, спрямованих на зниження масштабів наслідків аварій і розміру збитків, завданих у разі аварії;

- встановлюється обов'язковість розробки декларації промислової безпеки об'єктів підвищеної небезпеки;

- декларації промислової безпеки розробляються у складі проектної документації на будівництво, розширення, реконструкцію, технічне переоснащення, консервацію і ліквідацію небезпечного виробництва;

- декларація промислової безпеки затверджується керівником організації, яка експлуатує об'єкт підвищеної небезпеки. Керівник цієї організації несе відповідальність за повноту і достовірність відомостей, що містяться у декларації;

- декларація проходить експертизу промислової безпеки у встановленому порядку.

Органи управління територіальної системи цивільного захисту на основі загальнодержавних вимог до декларації безпеки мають розробляти, з урахуванням специфіки території, власні додаткові вимоги до змісту декларації, затверджувати

їх рішеннями місцевих органів виконавчої влади.

Місцеві органи виконавчої влади і самоврядування мають координувати і контролювати роботу з декларування об'єктів підвищеної небезпеки, взаємодіяти з органами Держнаглядохоронпраці України та іншими органами державного нагляду.

Ліцензування діяльності об'єктів підвищеної небезпеки є складовою соціально-економічного механізму забезпечення безпеки населення і захисту навколишнього середовища від аварій та катастроф.

Ліцензування – це заходи, пов'язані з наданням ліцензій, переоформленням документів, підтверджуючих їх наявність, призупиненням і поновленням ліцензій, їх анулюванням і контролем ліцензуючих органів за дотриманням ліцензіатами ліцензійних вимог і умов під час здійснення ліцензованих видів діяльності.

Ліцензія – це спеціальний дозвіл на здійснення конкретного виду діяльності з обов'язковим дотриманням ліцензійних вимог та умов, виданий ліцензуючим органом юридичній або фізичній особі (ліцензіату).

Ліцензійні вимоги і умови – це сукупність установлених положень про конкретні види діяльності, виконання вимог і умов яких є обов'язковим під час здійснення діяльності, яка ліцензується. Ці вимоги і умови включають заходи щодо запобігання аварій та катастроф. Серед переліку видів діяльності, на здійснення яких необхідна ліцензія, значне місце посідають об'єкти, порушення порядку експлуатації яких може призвести до надзвичайних ситуацій. Основними з них є:

- виконання робіт і надання послуг щодо збереження, перевезення і знищення хімічної зброї;
- експлуатація вибухонебезпечних об'єктів;
- експлуатація пожежонебезпечних об'єктів;
- експлуатація хімічно небезпечних об'єктів;
- експлуатація магістрального трубопровідного транспорту;
- експлуатація газонафтодобувних підприємств;
- переробка нафти, газу і продуктів їх переробки;
- транспортування по магістральних трубопроводах нафти, газу і продуктів

їх переробки;

- зберігання нафти, газу і продуктів їх переробки;
- виробництво і зберігання вибухових матеріалів промислового призначення;
- діяльність з експлуатації електричних (газових, теплових) мереж;
- діяльність, пов'язана зі збудниками інфекційних хвороб;
- перевезення пасажирів і вантажів морським, річковим, повітряним, залізничним транспортом;
- перевезення пасажирів автомобільним транспортом (понад 8 осіб) і вантажів

(автотранспортом вантажопідйомністю понад 3,5 т);

- діяльність щодо поводження з небезпечними відходами.

Ліцензуючі органи здійснюють мають такі повноваження:

- 1) надання ліцензій;
- 2) переоформлення документів, які підтверджують наявність ліцензій;
- 3) призупинення дії ліцензій;
- 4) поновлення дії ліцензій;
- 5) контроль за дотриманням організаціями ліцензійних вимог і умов.

У переліку наведених повноважень мають місце ті, здійснення яких може бути спрямованим на запобігання НС, пом'якшення наслідків і зменшення масштабів, що належить до поля діяльності органів управління системи цивільного захисту, особливо на регіональному і місцевому рівнях.

Ліцензування видів діяльності на рівні регіонів здійснюється, як правило, уповноваженими на це республіканськими та територіальними органами технічної інспекції держенергонагляду, держпожнадзора, транспортної інспекції, органами охорони навколишнього природного середовища, природних ресурсів, ядерної безпеки за рішенням місцевих органів виконавчої влади. На порядку денному приєднання до цієї когорти державного нагляду у сфері цивільного захисту.

У процесі розгляду документації на отримання ліцензії проводиться перевірка підприємств органами, які здійснюють ліцензування, на відповідність

наданої документації фактичному стану обладнання, тривалих порушень, заміні зношеного обладнання.

Як засвідчує практика, ліцензування експлуатації об'єктів і робіт підвищеної небезпеки сприяє більш якісному навчанню інженерно-технічного персоналу і робітників, зайнятих експлуатацією потенційно небезпечних виробництв і об'єктів, підвищенню відповідальності за стан безпеки юридичних осіб та індивідуальних підприємців, а також підвищенню ефективності нагляду і контролю за безпекою виробничої діяльності потенційно небезпечних об'єктів.

Ліцензування діяльності в комплексі із заходами з декларування безпеки і страхування відповідальності за завдану шкоду під час експлуатації небезпечного об'єкта сприяє запобіганню аварій і катастроф техногенного та біолого-соціального характеру, зменшенню їх масштабів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ЩОДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки.

Була розроблена і протестована система збору даних для вимірювання одних і тих же фізичних змінних з метою узгодження між результатами чисельного моделювання і результатами експерименту. Замість самого порівняння, суть цієї роботи полягала в тому, щоб створити робочу систему, яка дозволяє користувачеві вимірювати, оцифровувати, зберігати і отримувати для аналізу набори числових даних, що представляють фізичні змінні.

Потреба в автоматизованому обладнанні для збору даних з самого початку проекту диктувала мікропроцесорну систему збору даних, і саме такий підхід був використаний для вирішення проблеми. Було вказано на той факт, що ручне вилучення даних без будь-яких друкованих записів було б громіздким, неточним і схильним до помилок завданням.

Отримавши чітке уявлення про те, яке обладнання необхідне для виконання поставленого завдання, було зроблено підбір кожного компонента системи. Для надання користувачеві системи повного розуміння її роботи було проведено обговорення апаратного та програмного забезпечення основних компонентів системи, а саме А/D перетворювача та керуючого центрального процесора.

Спочатку був розглянутий спосіб компонування різних елементів системи. Далі було пояснено сам процес збору даних, починаючи з генерації, передачі та зберігання даних і закінчуючи пошуком даних для аналізу.

Також в ході роботи було виконано аналіз отриманих даних, який переслідує в основному дві мети: отримання кутової швидкості і вільного від зміщення отриманих даних про тангенціальне прискорення і встановлення залежності між крутним моментом, що розвивається серводвигунами на кожній ланці робота, і отриманими даними напруги двигуна.

Розроблена система збору даних виявилася «зручною для користувача». Можливість взаємодії з системою через ЕПТ-термінал є основною перевагою, яку представляє система. Декілька кодифікацій у програмі для зберігання даних дозволяють змінювати кількість точок даних, що записуються, коефіцієнт

підсилення системи, формат даних при відображенні на терміналі та/або записі на пристрій зберігання даних.

Було визначено, що мікросхема аналого-цифрового перетворювача, яка використовується в системі, має можливість перетворення швидкості близько однієї тисячі виходів на канал в секунду. Однак те, що остаточно визначило швидкість перетворень системи в цілому, так це програма, яка використовувалася для вказівки системі зчитувати те, що знаходиться в мікросхемі A/D перетворювача, і зберігати це число в пам'яті. Для досягнення цієї мети використовувалася спеціально написана програма, яка забезпечила найвищу можливу швидкість перетворення 37 точок даних в секунду, використовуючи тільки один канал одночасно. Вищезазначена швидкість перетворення повинна бути достатньою для цієї програми, але може бути серйозним недоліком для такої програми, як контроль у реальному часі.

Слід зазначити, що система може бути запрограмована на мові асемблера, що призвело б до радикального поліпшення швидкості виконання програми збору даних. Щоб мати можливість програмувати систему на мові асемблера, слід використовувати крос-асемблер, який працює на персональних комп'ютерах.

Аналіз отриманих даних прискорення показав раціональне співставлення з фізичним явищем, яке досліджується і повинен стати хорошою базою порівняння для результатів чисельного моделювання.

Разом з тим, є кілька областей, які можна було б вивчити більш глибоко для розширення можливостей системи.

Програми збору та зберігання даних були написані на BASIC. Програми на мові асемблера повинні різко підвищити швидкість перетворення системи збору даних, і програмування системи таким чином може бути першим покращенням, яке слід розглянути.

Можна було б також дещо підвищити швидкість перетворення за рахунок взаємодії системи з дисководом для жорстких чи SSD дисків, особливо якби можна було отримати зв'язок між двома системами з максимально можливою швидкістю передачі даних, тобто 19200 біт/с.

Плата розширення, яка використовується в системі, має три байтові

програмовані порти вводу/виводу, що забезпечуються вбудованим адаптером периферійного інтерфейсу Intel, які не використовувалися для цього застосування, але можуть бути використані в майбутньому для інтерфейсу принтерів або іншого обладнання з вимогами до паралельного зв'язку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бурштинський М.В., Хай М.В., Харчишин Б.М. Давачі: навчальний посібник 2-ге видання доповнене. Львів ТзОВ «Простір М», 2014. 202 с.
2. Гайченко В.А., Коваль Г.М. Основи безпеки життєдіяльності людини: Навчальний посібник. К.: МАУП, 2002. 226 с.
3. Джигирей В.С. Екологія та охорона навколишнього середовища: Навчальний посібник. К.: Знання, 2002. 203 с.
4. Желібо Є.П., Заверуха Н.М., Зацарний В.В. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник. К.: Каравела. 2023. 344 с.
5. Капаціла Ю. Б., Стефанчук М.С., Кіт С.Б. Огляд інноваційних методів дослідження динамічних характеристик промислового робота. Тези доповіді на XIV міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». Тернопіль, 11-12 грудня 2025 р. С. 84-86.
6. Ковальов Ю. А., Кошель С. О., Манойленко О. П. Проектування промислових роботів та маніпуляторів. К.: Центр навчальної літератури. 2022. 256 с.
7. Павленко І.І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування. Кіровоград: КНТУ, 2007. 420 с.
8. Проць Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: Навчальний посібник. Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. 232 с.
9. Основи наукових досліджень і теорія експерименту : Навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / укл. Ю. Б. Капаціла, П. О. Марущак, В. Б. Савків, О. П. Шовкун. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2023. 186 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/40843>
10. Коноваленко І. В. Платформа .NET та мова програмування C# 8.0 : навч. посіб. / І. В. Коноваленко, П. О. Марущак. – Тернопіль : В. А. Паляниця, 2020 – 320 с. <http://library.megu.edu.ua:8180/jspui/handle/123456789/4115>

- 11.Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. – 324 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39189>
- 12.Капаціла Ю.Б., Савків В.Б. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 60 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48495>
- 13.Капаціла Ю.Б., Шовкун О.П. Дослідження релейного електронного регулятора температури. /Методичні вказівки до лабораторної роботи з курсу «Приводи та автоматика мехатронних систем» для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль: ТНТУ. 2025. 15 с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/50560>.
- 14.Козбур І.Р., «Дослідження часових характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39206>
- 15.Капаціла Ю.Б., Марущак П.О., Савків В.Б. Методичні вказівки з виконання курсової роботи з дисципліни «Основи наукових досліджень» для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Тернопіль: ТНТУ, 2023. 32 с
- 16.Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/1551>
- 17.Методичні вказівки по роботі з програмним симулятором "AVR simulator IDE" з курсу "Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. -

21 с.

- 18.Моделювання нелінійних систем керування у пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2019. - 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28057>
- 19.Моделювання систем керування в пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ, 2019. - 23 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28056>
- 20.Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Multisim. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо . - Тернопіль : ТНТУ Імені Івана Пулюя, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26404>
- 21.Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Proteus VSM. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26397>
- 22.Методичні вказівки до курсового проектування з курсу "Проектування систем автоматизації" / Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Пісьціо В.П. Тернопіль : ТНТУ, 2025. 128 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48646>
- 23.Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка”. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. – 53 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44635>
- 24.Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка”

- Модуль 3. «Імпульсна техніка, вторинні джерела живлення, основи цифрової електроніки» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. -26 с.
- 25.Трембач Р.Б., Шовкун О.П. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Інформаційно – вимірювальні системи” Модуль І. «Вимірювальна техніка» – Тернопіль: ТНТУ., 2024. – 67 с.
- 26.Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський)/ укл.: О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.
- 27.Навчально-методичний посібник до практичних заняття з дисципліни «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» для студентів освітнього ступеня „бакалавр" усіх спеціальностей та форм навчання / Укладачі : О. Я. Гурик, І. Б. Окіпний, В. С. Сенчишин, С. Ю. Мариненко, О. І. Король. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. 123 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48496>
- 28.Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп’ютерні мережі. Книга 1 [навчальний посібник]. Львів : «Магнолія 2006», 2013. 256 с.
- 29.Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп’ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник]. Львів : "Магнолія 2006", 2014. 312 с.
- 30.Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.
- 31.Буров Є., Митник М. Комп’ютерні мережі. (у 2-х томах). Львів, Магнолія, 2018.
- 32.Комплексна безпека інформаційних мережевих систем. Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А. Г. Микитиший, М. М. Митник, О. С. Голотенко, В. В. Карташов. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. –

- 33.Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>
- Розробка автоматизованого процесу програмування робототехнічної комірки / Р. І. Михайлишин, В. Б. Савків, О. А. Загоруйко // Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». Тернопіль, ТНТУ, 2020. с. 10,11.
- 34.Трет'як А.В. Основи робототехніки: навчальний посібник для студентів спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А.В. Трет'як, А.М. Кльон. Полтава, видавництво національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. 135 с.
- 35.Paryanto, M. Brossog, M. Bornschlegl, J. Franke, Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems, Int J Adv Manuf Technol (2015) 78:1315-1328, Springer-Verlag London 2015.
- 36.H. Liu, Y. Zhang, S. Zhu, Novel Inverse Kinematic Approaches for Robot Manipulators with Pieper-criterion based Geometry, International Journal of Control, Automation, and Systems (2015) 13(5):1242-1250.
- 37.C. Urrea, J. Kern, Design, simulation, and comparison of controllers for a redundant robot, Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing, 3, 2016.
- 38.Wu, K.; Kuhlenkötter, B. Experimental Analysis of the Dynamic Stiffness in Industrial Robots. Appl. Sci. 2020, 10, 8332.
- 39.Karim, A.; Schmid, M.; Verl, A.; Hitzer, J. Autonomous modal analysis method for industrial robots based on output-only measurements. Sci. Rep. 2024, 14, 21657.
- 40.Li, Y.; Gao, G.; Na, J.; Xing, Y. Error Sensitivity Flexibility Compensation of Joints for Improving the Positioning Accuracy of Industrial Robots. IEEE Trans.

Autom. Sci. Eng. 2025, 22, 5335-5348.

41. Amogh Patwardhan, Aditya Prakash, Rajeev lochana, and G.Chittawadigi. Kinematic analysis and development of simulation software for nex dexter robotic manipulator. International Conference on Robotics and Smart Manufacturing (RoSMa2018), 2018.