

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка робота манипулятора

Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

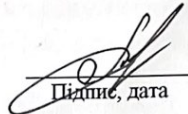
Шифр БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
4 курсу групи РМ-20-1


Підпис

Волкотруб Д.С.
Ініціали, прізвище

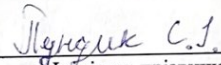
Керівник


Підпис, дата

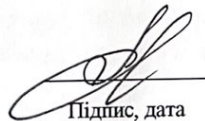
д.т.н., проф. Поліщук О.С.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата


Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.
Ініціали, прізвище

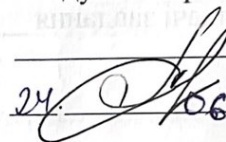
24 06 2024р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень бакалавр
Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 131 «Галузеве машинобудування»
Освітня програма Робототехнічні та мехатронні системи галузі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

 24.06.2024

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Волкотруб Денис Сергійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка робота маніпулятора**
керівник роботи **Поліщук О.С., д.т.н, професор**

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 15 02 2024 р. № 8

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 24.06.2024

3. Вихідні дані до роботи: **технічні характеристики роботів-маніпуляторів аналогів**

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Огляд і аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи

2 Розробка конструкції робота – маніпулятора

3 Розробка електричної частини робота – маніпулятора

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Аркуш 1. Роботи-маніпулятори. Док. оглядовий (A1). Аркуш 2. Робот-маніпулятор. Схема структурна (A2) + Робот-маніпулятор. Схема кінематична (A2).

Аркуш 3 Блок-схема роботи робота-маніпулятора. Документ ілюстраційний (A2) + Схема підключення серводвигуна. Документ ілюстраційний (A2).

Аркуш 4. Робот-маніпулятор. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 5. Система керування роботом-маніпулятором. Документ ілюстраційний (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд і аналіз існуючих та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	01.06.24р.	
2 Розробка конструкції робота – маніпулятора	08.06.24р.	
3 Розробка електричної частини робота – маніпулятора	14.06.24р.	
4 Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	21.06.24р.	

Студент

Підпис

Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

1. Прізвище, ім'я та по батькові **Волкотруб Денис Сергійович**

2. Тема бакалаврської роботи
Розробка робота маніпулятора

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента Мица В.В., к.т.н.

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 84

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки:

1 Огляд і аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи

2 Розробка конструкції робота – маніпулятора

3 Розробка електричної частини робота – маніпулятора

Висновки

Перелік джерел посилання

Підпис студента ДВшф

"24" "06" 2024 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 1 від "26" "06" 2024 р.

Оцінка проекту ЕК добре / В
Рекомендації ЕК вирішення в навчальній процес


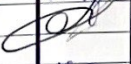
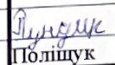

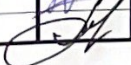
Особливі відмітки -

Технічний секретар Бурек Я.В.

"26" "06" 2024 р.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	6
1 Огляд і аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	7
1.1 Огляд моделей роботів – маніпуляторів	7
1.2 Технічні характеристики роботів– маніпуляторів	18
1.3 Конструктивні особливості роботів – маніпуляторів	23
1.4 Висновки до першого розділу	31
2 Розробка конструкції робота – маніпулятора	32
2.1 Розробка структурної схеми робота– маніпулятора	32
2.2 Розробка кінематичної схеми робота – маніпулятора	34
2.3 Розробка конструкції робота – маніпулятора	35
2.4 Висновки до другого розділу	45
3 Розробка електричної частини робота – маніпулятора	46
3.1 Вибір блоку живлення	46
3.2 Вибір плати живлення	47
3.3 Вибір мікроконтролерної плати Arduino Uno	49
3.4 Вибір плати керування	51
3.5 Вибір понижувача перетворювача для крокових двигунів	53
3.6 Вибір крокового двигуна	55
3.7 Вибір драйвера крокового двигуна	58
3.8 Програмування крокових двигунів	64
3.9 Вибір серводвигуна	65
3.10 Програмування серводвигунів	69

БРМА24.00.00.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
Виконав		Волкотруб		
Перевір.		Поліщук		
Н.контр.				
Затвер.		Поліщук		
Розробка робота маніпулятора			Літера	Арквш
			4	84
ХНУ гр.РМ-20-1				

3.11	Налаштування плати Arduino Uno для взаємодії з роботом	72
3.12	Загальний вигляд системи керування роботом – маніпулятором	75
3.13	Точність позиціонування	76
3.14	Висовок до третього розділу	79
	Висновки	80
	Перелік джерел посилання	82
	Додатки	84

ВСТУП

Сучасне приладобудування немислиме без автоматизованих систем. Автоматизація виробництва, що досягається за допомогою роботизованих систем, значно спрощує процес та гарантує якість кінцевого продукту. Одним з ключових напрямків розвитку приладобудування є вдосконалення та розробка нових методів неруйнівного контролю виробів та виробничих процесів. Зважаючи на бурхливий розвиток галузі, актуальним стає створення нових методик неруйнівного контролю дефектів у приладах, деталях, механізмах та матеріалах. Проте, наразі у сфері виробництва та експлуатаційного контролю виробів існує ряд проблем, однією з яких є вплив людського фактору на результати контролю.

В сучасному виробництві широко використовуються різноманітні роботи-маніпулятори. Проте, не всі з них здатні автономно виконувати певні операції, що робить їх залежними від втручання технічного персоналу.

З огляду на це, розробка навчальної моделі робота-маніпулятора для позиціонування датчиків на виробах зі складною геометрією стає вельми актуальною задачею на сьогоднішній день.

Впровадження цієї технології матиме значний вплив на розвиток приладобудування, адже дозволить створювати більш якісні та надійні вироби. Очікується, що результати дослідження знайдуть практичне застосування у різних галузях промисловості.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1 Огляд моделей роботів – маніпуляторів

Розвиток промисловості стимулював бурхливий прогрес автоматизованих технологій. Одним з прикладів є компанія Universal Robots з Данії, яка спеціалізується на випуску роботів-маніпуляторів для автоматизації циклічних виробничих процесів. Їх продукція представлена лінійкою з трьох легких промислових маніпуляторів з розімкненим кінематичним ланцюгом: UR3, UR5, UR10 (рисунок 1.1).

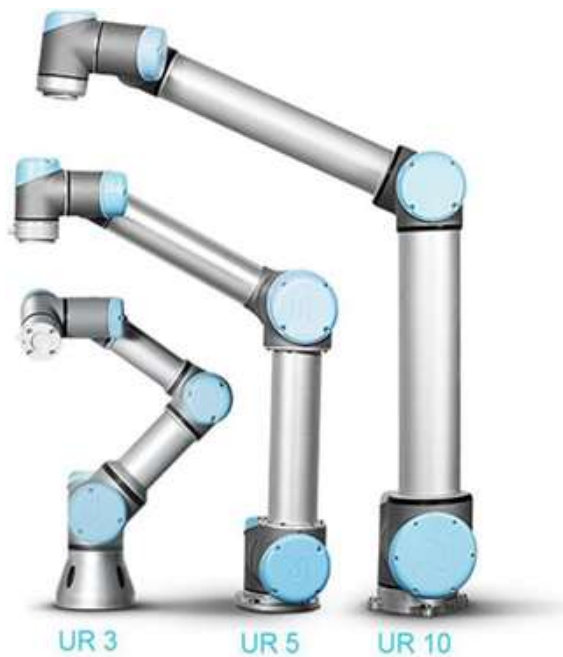


Рисунок 1.1 – Маніпуляційні пристрої з трьома варіаціями кінематичного ланцюга зліва-направо UR3, UR5, UR10

Усі роботи-маніпулятори UR мають 6 ступенів свободи, які поділяються на 3 переносні та 3 орієнтуючі (рисунок 1.2). Це дозволяє їм

виконувати широкий спектр завдань з високою точністю. Варто зазначити, що роботи UR здійснюють лише кутові переміщення.

Класифікація роботів UR ґрунтується на гранично допустимому корисним навантаженні. Додатковими характеристиками, що відрізняють моделі, є радіус робочої зони, вага та діаметр основи.



Рисунок 1.2 – Відображення ступенів свободи у робота-маніпулятора серії UR

Роботи-маніпулятори UR оснащені високоточними датчиками абсолютного положення, що робить їх простими у інтеграції з сторонніми пристроями та обладнанням. Компактна конструкція дозволяє їм розміщуватися навіть у обмежених просторах, наприклад, на робочих станціях або виробничих лініях, де неможливо встановити звичайні роботи [1].

Однією з ключових переваг роботів-маніпуляторів серії UR є їх простота програмування. Завдяки спеціально розробленій та запатентованій технології навіть оператори без спеціальних навичок можуть швидко налаштувати та керувати цими роботами за допомогою інтуїтивно зрозумілої

3D-візуалізації. Програмування здійснюється шляхом простих переміщень робочого органу маніпулятора в потрібні позиції або за допомогою натискання стрілок на спеціальному планшетному додатку.

Окрім цього, значною перевагою перед іншими роботами у роботівманіпуляторів серії UR є їх швидкість налаштування. Оператору, що виконує первинний запуск обладнання, потрібно менше години для розпакування, монтажу і програмування першої простої операції.

Роботи-маніпулятори UR здатні виконувати рутинні завдання в небезпечних і забруднених умовах, замінюючи людей. Завдяки системі управління, яка враховує зовнішні впливи, роботи серії UR можна експлуатувати без захисних огорожень, поруч з людьми. Їхні системи безпеки схвалені та сертифіковані Союзом працівників технічного нагляду Німеччини. Важливо зазначити, що роботів UR можна розміщувати будь-де, адже їх конструкція не потребує спеціальних умов для встановлення [2].

Промислові роботи-маніпулятори серії UR відкривають широкі можливості для автоматизації практично всіх циклічних рутинних процесів. Ці роботи зарекомендували себе як ефективні інструменти в різних галузях. Наприклад, їх використання на ділянках перекладки та упаковки значно підвищило точність та зменшило втрати. Більшість операцій з перекладки тепер виконуються без нагляду оператора.

Важкий робот-маніпулятор FANUC M-2000iA / 1200 від компанії FANUC (рисунок 1.3) є одним з найпотужніших у своєму класі. Він розроблений спеціально для роботи з надзвичайно важкими вантажами. Завдяки цьому роботу можна значно спростити та удосконалити роботизовані системи, адже він здатен замінити 2-4 звичайних роботи, роблячи їх більш надійними та простими в експлуатації.

На відміну від стандартних підйомних пристроїв, таких як конвеєри або крани, які потребують участі людини та несуть ризики, FANUC M-

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2000iA / 1200 повністю автоматизований, не поступаючись їм у потужності. Це мінімізує ризики травматизму на виробництві. Крім того, робот відповідає найсуворішим вимогам до вантажно-розвантажувальних робіт, роблячи його міцним і безпечним рішенням від FANUC.

Цей п'ятиосьовий робот-вантажопідійомник здатен піднімати вантажі до 1200 кг на відстань до 3,7 м. Його головна перевага полягає в тому, що він працює без участі людини, мінімізуючи ризики травматизму та вплив людського фактора. Робот може експлуатуватися при температурах від 0 °С до 45 °С.



Рисунок 1.3 – Робот-маніпулятор моделі FANUC M-2000iA / 1200

FANUC M-2000iA – найпотужніша модель у лінійці FANUC, здатна без проблем справлятися з вантажами вагою до 1200 кг. Цей робот може замінити 2-4 звичайні моделі, роблячи роботизовані системи простішими, надійнішими та зручнішими у програмуванні. Завдяки вильоту 1250 мм, M-2000iA ідеально підходить для переміщення та палетування надважких конструкцій та продуктів (рисунок 1.4).

Головною особливістю цього робота-маніпулятора є найпотужніше у світі зап'ястя, здатне переміщати важкі залізничні колісні пари вагою до 1300 кг. Завдяки цьому він може замінити звичні крани, підійомники та

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

транспортні візки, значно підвищуючи продуктивність та усуваючи небезпечну ручну роботу.

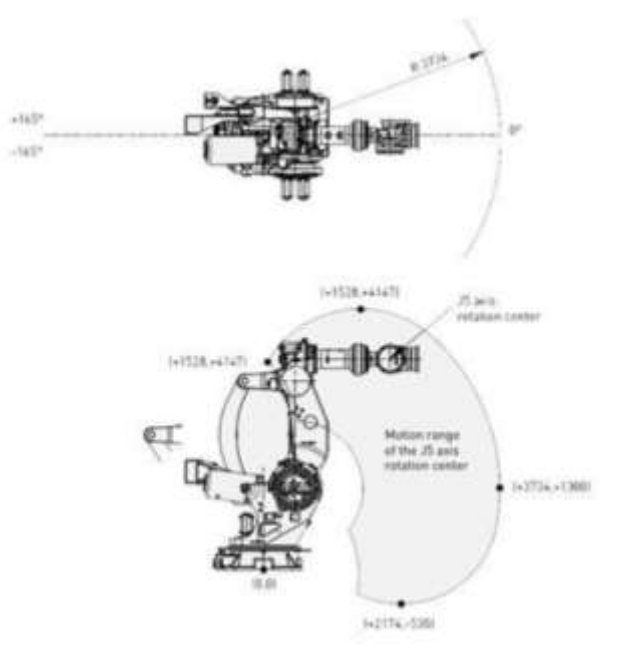


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення робочого діапазону робота FANUC M2000iA / 1200

Завдяки своїм унікальним характеристикам, FANUC M-2000iA / 1200 ідеально підходить для важкої промисловості, де потрібно мінімізувати людський фактор та замінити декілька менш потужних роботів. Ця модель не призначена для використання в легкій промисловості.

Важливо також розглянути модель KR QUANTEC PA від KUKA Robotics (рисунок 1.5). Цей робот-маніпулятор спеціально розроблений для роботи в екстремальних умовах, зокрема при мінусових температурах до -30°C . Це робить його ідеальним вибором для харчової промисловості, де часто потрібна робота в морозильних камерах. Модель KUKA KR QUANTEC PA arctic спеціально розроблена для палетування в таких умовах і не потребує додаткових захисних кожухів чи морозостійкої електроніки, адже вже оснащена ними [3].

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000 ПЗ



Рисунок 1.5 – Модель робота-маніпулятора KR QUANTEC PA

Цей робот втілює в собі передові технології, спрямовані на глибоку оптимізацію виробничих процесів. Він відрізняється високою швидкістю роботи в межах максимальної робочої зони, мінімальною кількістю виступаючих елементів та надзвичайно високою надійністю, що робить його ідеальним вибором для автоматизованих систем. Робот спеціально розроблений для складних навантажувально-розвантажувальних робіт і відрізняється низкою ключових переваг: швидкий робочий цикл, висока продуктивність, компактні розміри, економічність.

Важливо також зазначити про промисловий робот-маніпулятор IRB 120 від АВВ. Цей робот четвертого покоління є одним з найменших у лінійці АВВ і ідеально підходить для завдань обробки матеріалів та збірки (рисунок 1.6) [4].

АВВ IRB 120 знайде застосування в різних галузях, включаючи електроніку, харчову промисловість, енергетику, фармацевтику, медицину та науково-дослідницьку діяльність. Цей компактний 6-осьовий робот з вантажопідйомністю до 5 кг може бути встановлений під будь-яким кутом, що робить його ідеальним для обмежених просторів. Силкові та інформаційні

						БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата			

кабелі прокладені всередині руки робота, щоб уникнути завад та забезпечити гнучкість інтеграції.



Рисунок 1.6 – Модель робота-маніпулятора IRB 120

Завдяки поєднанню легкого алюмінієвого корпусу з потужними компактними двигунами, IRB 120 здатний рухатися з високою швидкістю та точністю. Компактний контролер робота забезпечує додатковий рівень точності управління рухом.

ABB IRB 120 - це найменший промисловий робот компанії, який важить лише 25 кг і має вантажопідйомність 3 кг (4 кг з відключеною 5-ою віссю) та робочу зону до 580 мм. Цей робот є економічно вигідним та надійним рішенням, яке забезпечує швидку окупність інвестицій при мінімальних витратах. Доступна також сертифікована версія для роботи в чистих приміщеннях Clean Room ISO 5 (Class 100). Крім того, IRB 120 є найшвидшим роботом у лінійці IRB.

IRB 120 - це лідер у сфері високошвидкісних застосунків, що потребують гнучкості та найкращої у своєму класі повторюваності позиціонування (до 10 мкм). Зберігши компактність та легкість конструкції, IRB 120 пропонує значно збільшену максимальну швидкість обертання 4-ої, 5-ої та 6-ої осі, що призводить до зростання продуктивності та скорочення

циклу роботи до 25%. Робочий діапазон робота зображений на рисунку 1.7 [5].

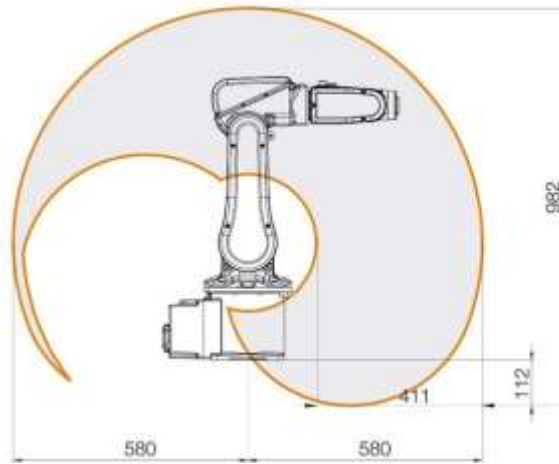


Рисунок 1.7 – Робочий діапазон робота-маніпулятора IRB 120

IRB 120 володіє горизонтальною смугою руху 580 мм, що є найкращим показником у своєму класі, а також чудовою ударною стійкістю. Робот може переміщатися базою по вертикалі на 112 мм і має дуже компактний радіус повороту.

Проаналізувавши характеристики та можливості розглянутих роботів-маніпуляторів, можна виділити ключові переваги та недоліки різних типів роботів, а також окреслити сфери їх застосування.

Окремо слід розглянути модельний ряд промислових роботів-маніпуляторів компанії Кука. Звернемо увагу на 5 основних серій KR QUANTEC:

1. серія Nano: ця серія ідеально підходить для підприємств з обмеженими виробничими площами (рисунку 1.8). Роботи KR QUANTEC Nano ефективно працюють навіть у найтісніших умовах, роблячи роботу з точкового зварювання більш якісною. Завдяки широкому робочому діапазону повороту, ці моделі також чудово підходять для фрезерування та інших завдань;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата



Рисунок 1.8 – Робот-маніпулятор серії Nano

2. серія Pro від Kuка вирізняється підвищеною міцністю, широким робочим діапазоном, високою точністю маніпулятора та значною потужністю, що робить її здатною витримувати найвищі навантаження (рисунок 1.9). Компактна конструкція робота без виступаючих елементів економить виробничі площі та дозволяє створювати компактні робочі зони з високою вантажопідйомністю;



Рисунок 1.9 – Робот-маніпулятор серії Pro

3. серія Extra від Kuка пропонує універсальні роботи, здатні виконувати широкий спектр завдань без значних додаткових інвестицій (рисунок 1.10). Незважаючи на витончену конструкцію та зменшення ваги

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

рухомої частини, ці роботи вражають міцністю та надійністю, а також мають один з найбільших робочих діапазонів у своєму класі. KR QUANTEC Extra знаменує собою новий рівень енергоефективності, продуктивності, точності та готовності до роботи;



Рисунок 1.10 – Робот-маніпулятор серії Extra

4. серія Prime від Kuka поєднує в собі елегантний дизайн та легку конструкцію з неабиякою жорсткістю та високою вантажопідйомністю (рис. 1.11). Ці роботи високо цінуються за виняткову точність траєкторій та здатність працювати короткими циклами. Наприклад, роботи цієї серії чудово підходять для точкового зварювання, демонструючи високу енергоефективність та ефективність у обмеженому просторі. При цьому вони володіють не менш широким робочим діапазоном, ніж роботи серії Extra;

5. серія Ultra від Kuka створена для тих, хто шукає максимально можливу питому потужність та найширший робочий діапазон у класі роботів з високою вантажопідйомністю (рисунок 1.12);

6. важливо підкреслити, що при цьому серія Ultra має мінімальні відмінності у вазі та габаритах від інших промислових роботів Kuka даного сегмента. Неймовірна швидкість та стійкість роботів-маніпуляторів цієї серії гарантують вам досягнення нового рівня продуктивності.



Рисунок 1.11 – Робот-маніпулятор серії Prime



Рисунок 1.12 – Робот-маніпулятор серії Ultra

Після ретельного дослідження різних роботів-маніпуляторів, стало зрозуміло, що кожна модель має як свої плюси, так і мінуси. Проведений аналіз дозволяє чітко окреслити критичні недоліки та дає нам ґрунтовні знання для створення власної моделі робота-маніпулятора, яка буде позбавлена цих недоліків.

Головною вадою розглянутих роботів-маніпуляторів є те, що вони потребують людського керування. На основі проведеного аналізу, можна чітко окреслити шляхи повного усунення людського фактору або його мінімізації в процесі контролю та управління роботом.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.
17

1.2 Технічні характеристики роботів – маніпуляторів

Крім залежності від людського фактору, існуючі роботи-маніпулятори мають й інші недоліки, пов'язані з їхніми технічними характеристиками. Саме технічна складова є ключовим аспектом при проектуванні, розробці та виробництві цих роботів. З технічної точки зору, роботи-маніпулятори суттєво відрізняються один від одного. Це обумовлено, в першу чергу, їхнім цільовим призначенням, а також масштабами застосування.

Звернемося до технічних характеристик роботів-маніпуляторів, представлених у підрозділі 1.1. Більш детальну інформацію з характеристиками роботів серії UR наведено в таблиці 1.1.

Аналіз таблиці показує, що роботи-маніпулятори серії UR мають певний недолік: їм бракує точності позиціонування у порівнянні з деякими аналогами. Проте, ця серія роботів має низку вагомих переваг: компактний діаметр основи, легку вагу та низьке споживання енергії. Важливо зазначити, що габарити роботів UR не суттєво відрізняються від інших промислових роботів Кука в цій категорії. Серія Ultra, з іншого боку, вражає неймовірною швидкістю та стійкістю, що гарантує значне підвищення продуктивності [6].

Більш детальні технічні характеристики робота-маніпулятора FANUC M2000iA / 1200 наведено у таблиці 1.2.

Попри численні переваги, FANUC M-2000iA / 1200 не позбавлений деяких недоліків. Суттєвим мінусом цієї моделі є її складна конструкція, значна вага та габаритність. Варто зазначити, що модель призначена для широкого застосування в автомобільній промисловості.

Робот KR QUANTEC PA функціонує без коливань температурного режиму, що гарантує збереження якості продуктів та захищає їх від утворення льодової кірки. Ця модель розроблена для надзвичайно швидкої та надійної роботи в умовах низьких температур без необхідності підігріву

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

механічних компонентів. Для ознайомлення з більш детальними технічними характеристиками робота-маніпулятора KR QUANTEC PA наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики робота-маніпулятора серії UR від Юніверсал-Роботс

Найменування характеристики	Модель		
	UR3	UR5	UR10
Точність позиціонування	± 0,1 мм	± 0,1 мм	± 0,1 мм
Діапазон робочих температур	0 - + 50°C	0 - + 50°C	0 - + 50°C
Споживана потужність	125 Вт	150 Вт	250 Вт
Маса корисного навантаження	3 кг	5 кг	10 кг
Кількість ступенів свободи	6	6	6
Робочий діапазон основа плече лікоть зап'ясток 1,2,3	±360°	±360°	±360°
Рівень шуму	70 дБ	72 дБ	72 дБ
Діаметр основи	128 мм	149 мм	190 мм
Матеріал	алюміній, поліпропілен		
Довжина з'єднувального кабелю	6	6	6
Вага моделі	11 кг	18,4 кг	28,9 кг

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.
19

Робот KR QUANTEC PA arctic не потребує захисних кожухів під час роботи, що робить його значно вигіднішим в експлуатації порівняно з іншими моделями. Додатковою перевагою є відсутність необхідності підігрівати електроніку, адже вона не генерує теплового випромінювання. Це суттєво економить енергію, адже в промислових морозильних камерах теплові втрати зазвичай компенсуються за рахунок значних витрат на електроенергію [7].

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики робота-маніпулятора FANUC M2000iA / 1200

Найменування характеристики	Показник
Точність позиціонування	$\pm 0,18$ мм
Діапазон робочих температур	0 - + 45°C
Споживана потужність	470 Вт
Маса корисного навантаження	1200 кг
Кількість ступенів свободи	6
Робочий діапазон основа плече лікоть зап'ясток 1,2,3	$\pm 360^\circ$
Рівень шуму	72,8 дБ
Діаметр основи	474 мм
Матеріал	алюміній
Вага моделі	8600 кг

IRB 120 - це робот-маніпулятор, що ідеально підходить для завдань, які потребують високої швидкості та гнучкості, поєднуючи ці якості з кращою

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

повторюваністю операцій. Завдяки компактному дизайну та малій вазі IRB 120 здатен значно збільшувати максимальну швидкість руху осей, що призводить до зростання продуктивності та скорочення циклу роботи до 25%. Більш детальні технічні характеристики робота-маніпулятора IRB 120, виробництва компанії ABB наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики робота-маніпулятора KR QUANTEC PA

Найменування характеристики	Показник
Точність позиціонування	$\pm 0,14$ мм
Діапазон робочих температур	$-30 + 5^{\circ}\text{C}$
Споживана потужність	160 Вт
Маса корисного навантаження	120-180 кг
Кількість ступенів свободи	5
Робочий діапазон основа плече лікоть зап'ясток 1,2,3	$\pm 360^{\circ}$
Рівень шуму	70 дБ
Діаметр основи	388 мм
Матеріал	алюміній
Вага моделі	1075 кг

Цей робот-маніпулятор має легку алюмінієву конструкцію та оснащений двигунами, які дозволяють йому працювати з високим прискоренням [8].

Проаналізувавши характеристики вищезазначених роботів-маніпуляторів, ми сформуваємо технічне завдання з бажаними характеристиками для нового робота-маніпулятора. При цьому враховувалися недоліки розглянутих моделей, такі як надмірна вага, габаритний розмір основи, висока споживана потужність та рівень шуму.

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики робота-маніпулятора IRB 120 від АВВ

Найменування характеристики	Показник
Точність позиціонування	$\pm 0,01$ мм
Діапазон робочих температур	0 - + 45°C
Найменування характеристики	Показник
Споживана потужність	200-600 Вт
Маса корисного навантаження	5 кг
Кількість ступенів свободи	6
Робочий діапазон основа плече лікоть зап'ясток 1,2,3	$\pm 360^\circ$
Рівень шуму	Макимум 70 дБ
Діаметр основи	180 мм
Матеріал	алюміній
Вага моделі	25 кг

1.3 Конструктивні особливості роботів – маніпуляторів

Різноманітність конструкцій роботів-маніпуляторів зумовлена їх поділом на класи за типом управління. Ця класифікація визначає функціональні можливості та сферу застосування роботів. Класи роботів-маніпуляторів:

- керовані роботи покладаються на постійний контроль оператора, який керує кожним їхнім рухом;
- автоматичні та напівавтономні роботи діють за жорстко заданою програмою, не маючи сенсорів та не маючи можливості корегувати дії. Їхня участь у виробничих процесах зазвичай обмежена повторюваними завданнями, що не потребують оперативного втручання людини;
- автономні роботи здатні самостійно виконувати запрограмований цикл дій, ґрунтуючись на заданих алгоритмах та коригуючи свої дії за потреби. Вони можуть повністю обслуговувати свою ділянку конвеєра без залучення оператора, що робить їх оптимальним вибором для задач, які потребують високої продуктивності та точності.

Розглянемо більш детально конструкцію вищезгаданого робота-маніпулятора серії UR від компанії Юніверсал-Роботс. Одним з ключових елементів робота-маніпулятора UR, є його робоча зона, або "зона захвату". Ця зона, розташована на кінці маніпулятора, забезпечує гнучкість та адаптованість робота до різноманітних завдань. Завдяки стандартизованому кріпленню, UR сумісний з широким спектром робочих органів, що дає можливість підбирати оптимальний інструмент для виконання конкретного завдання. Додатково, між робочим органом та кінцевою ланкою маніпулятора можна встановити модулі сило-моментних сенсорів або камери. Ці модулі розширюють функціональні можливості робота, забезпечуючи зворотний зв'язок про силу та положення об'єкта, а

також візуальний контроль над процесом. Таким чином, робоча зона UR, поєднуючи в собі гнучкість, адаптивність та розширювані можливості, робить цей маніпулятор універсальним інструментом для автоматизації різноманітних виробничих та інших завдань.

Система захоплення GRIPKIT (рисунок 1.13) – це комплексне рішення, спеціально розроблене для універсальних роботів. Вона базується на високоякісних модулях захоплення Weiss Robotics, які протягом багатьох років зарекомендували себе як надійні та довговічні в сфері промислової автоматизації.

GRIPKIT – це універсальний інструмент, який пропонує все необхідне для виконання завдань з обробки та маніпулювання протягом лічених хвилин. Він доступний у двох варіантах: сервоелектричному та смарт-пневматичному, і сумісний з усіма моделями універсальних роботів. Серія GRIPKIT-P дає вам можливість скористатися гнучким та простим у використанні пневматичним захватним механізмом.



Рисунок 1.13 – Захват – модель GRIPKIT

Серія GRIPKIT-P базується на промислових модулях, спеціально розроблених для пневматичних захватних пристроїв. Вона доступна у двох розмірах паралельного захвату, а також у форматі 3-пальцевого центричного захвату. GRIPKIT-P охоплює діапазон сил захоплення від 230 до 550

Ньютонів. Ця серія використовує запатентовану Weiss Robotics технологію Smart Pneumatics, яка інтегрує клапани, контроль положення та захвату в компактний та надійний модуль. Це робить роботу з пневматикою на вашому роботі простою та потужною, без потреби у додаткових клапанах або зовнішніх датчиках положення [9].

GRIPKIT-P створений для міцного та надійного захоплення завдяки поєднанню високоточних прецизійно шліфованих направляючих T-слотів з жорстким і міцним корпусом. Ця конструкція, гарантована на 25 мільйонів циклів захоплення, забезпечує бездоганну роботу GRIPKIT-P протягом 24 годин на добу у найвимогливіших умовах, таких як комплектування та пакування товарів.

Захвати серії GRIPKIT-P оснащені високоякісним процесором із компресією та інтегрованою системою зйомки позицій, що робить їх найсучаснішим рішенням для пневматичних захватів. Розширені алгоритми керують та контролюють поточні дії захвату, гарантуючи оптимальні результати в будь-якій ситуації. Завдяки автоматичному визначенню захоплених деталей та контролю рукоятки протягом усього процесу обробки, GRIPKIT-P забезпечує надійність без потреби у зовнішніх датчиках, на відміну від звичайних пневматичних захватів. Це зменшує кількість кабелів, що веде до кращої надійності та простоти використання.

На відміну від традиційних пневматичних захватів, GRIPKIT-P інтегрує технологію клапана безпосередньо в модуль захвату. Це значно збільшує швидкість захоплення та зменшує споживання повітря. Замість використання зовнішніх клапанів та двох пневматичних шлангів на кожен захват, GRIPKIT-P потребує лише одного шланга постійного тиску, який підключається безпосередньо до захвату.

Завдяки простому у використанні плагіну URCaps, GRIPKIT-P без проблем інтегрується з програмним забезпеченням Polyscope. Ця інтеграція

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		25

дозволяє використовувати до 8 GRIPKIT-P з одним роботом, що дає вам можливість реалізувати навіть найскладніші проекти.

Налаштування GRIPKIT-P надзвичайно просте. Вам просто потрібно закріпити його на руці робота за допомогою кабелів, що входять у комплект, та підключити до USB-порту робота через конвертер інтерфейсу. Далі підключіть флеш-накопичувач USB, що надається, до робота та встановіть плагін URcaps. Ви можете вибрати один із прикладів програм з флеш-накопичувача або розпочати роботу з написання власної програми керування захопленням з нуля.

Серія GRIPKIT-P – це комплексне рішення для реалізації програми вибору та розміщення протягом декількох хвилин. Вона включає все необхідне: сам модуль захвату, перетворювач електричного інтерфейсу для підключення до роботоконтролера, монтажну пластину для кріплення захвату на робочій рукоятці, а також всі необхідні кабелі та гвинти.

Сучасні роботи-маніпулятори можуть бути оснащені різноманітними системами контролю, які значно розширюють їхні можливості. Компанія FANUC пропонує широкий спектр рішень, що оптимізують рух роботів, від сервозахватів для роботи з асиметричними або нестандартними об'єктами до складного програмного забезпечення для координування рухів груп роботів (рисунок 1.14). Розширені модулі керування рухом, які інтегруються з зовнішніми елементами, такими як двері та конвеєри, дозволяють синхронізувати роботу роботів з верстатами та виробничими процесами, забезпечуючи максимальну продуктивність.

Завдяки інтеграції серводвигунів, двигунів та контролерів у захватні механізми, роботи-маніпулятори отримують можливість захоплювати та переміщати деталі різного розміру та складності. Інструмент з серводвигуном легко налаштовується та дозволяє швидко переключатися між продуктами. Програмне обмеження максимального значення моменту

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		26

двигуна, програмування в режимі навчання та налаштування сили утримання роблять роботу з захватними механізмами ще більш гнучкою та ефективною.

Захоплення предметів є одним з найскладніших завдань для промислових роботів. На відміну від людини, яка може інстинктивно контролювати силу стиснення та захоплення для різних предметів, сучасна робо-рука потребує чіткого програмування для кожного нового об'єкта. Це особливо важливо для делікатних предметів, наприклад, крихких виробів зі скла, де надмірне стиснення може призвести до пошкодження.



Рисунок 1.14 – Варіація робочої зони робота-маніпулятора

Компанія Soft Robotics розробила революційний м'який робот-маніпулятор, який може захоплювати предмети різної форми без ризику пошкодження. Завдяки унікальній конструкції, йому не потрібна переналаштування для роботи з новими об'єктами, адже захоплення автоматично адаптується до потрібної форми. Цей інноваційний привод дозволяє легко налаштувати промислових роботів і навчити їх швидко та вправно переміщувати навіть найделікатніші предмети [10].

Серцем будь-якого робота є виконуючий пристрій, який відповідає за рушійні функції та взаємодію з об'єктами контролю за допомогою керуючих впливів, що генеруються самим роботом. Кінематична схема робота-маніпулятора зображена на рисунку 1.15.

З цієї схеми видно, що робот-маніпулятор може мати до 7 ступенів свободи.

Виконуючий пристрій більшості промислових роботів-маніпуляторів складається з маніпулятора з робочим органом та механізму переміщення. Ці роботи діють відповідно до заданих законів переміщення, які визначаються технологічними вимогами. Промислові роботи-маніпулятори є багатоступінчастими механізмами, що складаються з кінематичних пар з поступальним або обертовим рухом. Їх сфера застосування дуже широка. На рисунку 1.16 зображено структурну схему промислового робота-маніпулятора.

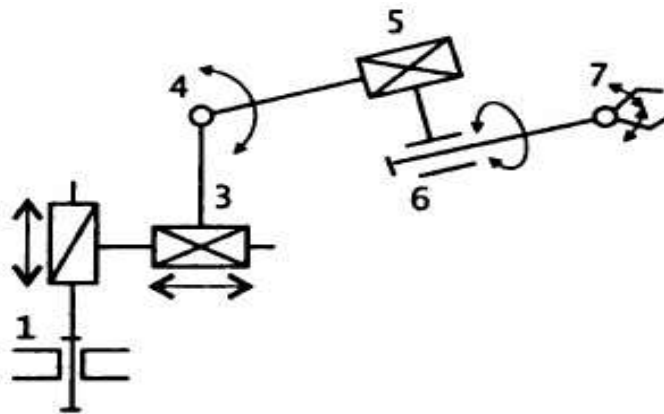


Рисунок 1.15 – Кінематична схема робота-маніпулятора



Рисунок 1.16 – Структурна схема промислового робота-маніпулятора

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Для руху ланок роботів-маніпуляторів найчастіше використовуються гідравлічні та електромеханічні приводи, хоча в деяких випадках застосовуються й пневматичні. До ключових характеристик роботів-маніпуляторів належать кількість ступенів свободи та динамічні показники. Роботи-маніпулятори, призначені для контролю параметрів виробів зі складною геометрією, мають забезпечувати поступовий рух робочої частини по трьох координатах та обертання навколо однієї, двох або трьох осей. Окрім того, вони повинні гарантувати обертовий рух навколо однієї осі з одночасним поступовим переміщенням по двох інших або два обертальних та одне поступове переміщення в радіальному напрямку. Роботи-маніпулятори оснащуються робочим органом, який безпосередньо взаємодіє з об'єктом контролю. Цей робочий орган може бути спеціалізованим захопленням або спеціальним пристроєм, обладнаним відповідними датчиками.

Система управління роботом-маніпулятором зазвичай складається з пульта управління або пристрою керування, а також програмного забезпечення для програмування та навчання. Пульт управління дозволяє оператору вводити команди, керувати маніпулятором, робочим органом та пристроєм переміщення дистанційно або вручну, а також контролювати правильність виконання поставлених завдань. Спілкування оператора з пристроєм керування відбувається за допомогою елементарних команд з пульта управління.

Важливо зазначити, що всі промислові роботи оснащені датчиками. Датчики внутрішньої інформації, такі як перетворювачі, вимірюють положення та швидкість переміщення ланок маніпулятора, статичні та динамічні навантаження, а також стан технічного обладнання. Для збору зовнішньої інформації використовуються різноманітні сенсорні прилади, включаючи візуальні, світлові, локаційні та інші датчики.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

структурні характеристики, як порядок структури, складність структури, структурна значимість кінематичної пари та інформаційний критерій структури.

Складність структури робота-маніпулятора достатньо ефективно оцінюється співвідношенням:

$$\xi (P) \frac{1}{3} \left(\sum_{i=1}^P \rho_i + \sum_{j=1}^P n_j + \omega \right), \quad (1.1)$$

де $\sum_{i=1}^P \rho_i$ – число кінематичних пар в кінематичному ланцюзі;

$\sum_{j=1}^P n_j$ – число рухомих ланок, ω – число ступенів свободи [12].

Порядок структури кінематичної схеми визначається кількістю кінематичних пар, що входять до складу маніпулятора. Маніпулятор n -го порядку має кінцеву множину кінематичних пар. Кінематичний ланцюг робота-маніпулятора може складатися з кінематичних пар одного або декількох типів. У зв'язку з цим, важливою характеристикою є однорідність структури, яка оцінює маневреність маніпуляційної системи. Однорідний кінематичний ланцюг має постійну маневреність, натомість маневреність маніпулятора з неоднорідним ланцюгом може змінюватися залежно від взаємного розташування кінематичних пар.

1.4 Висновок до першого розділу

Цей розділ присвячений аналітичному огляду роботів-маніпуляторів. У ньому описано конструкції роботів, розглянуто механічний опис їх роботи, наведено схему структурної організації, а також схеми відтворення руху та функціональні зв'язки елементів. Окремо розглянуті можливі варіації конструкції робочої зони (зони захвату) роботів-маніпуляторів та сфери їх застосування.

2. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТА – МАНІПУЛЯТОРА

2.1 Розробка структурної схеми робота – маніпулятора

Структурна схема є візуальним представленням компонентів робота-маніпулятора та їх взаємодії. Її розробка – це важливий крок для розуміння, програмування та експлуатації робота. Розробляючи структурну схему робота маніпулятора важливо розуміти її структуру та принцип роботи. Структурна схема є графічним представленням основних компонентів робота та їх взаємодії. Вона слугує візуальною дорожньою картою його функціональності, розкриваючи взаємозв'язок між основними компонентами та демонструючи потік інформації та команд. На основі зробленого огляду була розроблена структурна схема робота маніпулятора на рисунку 2.1.

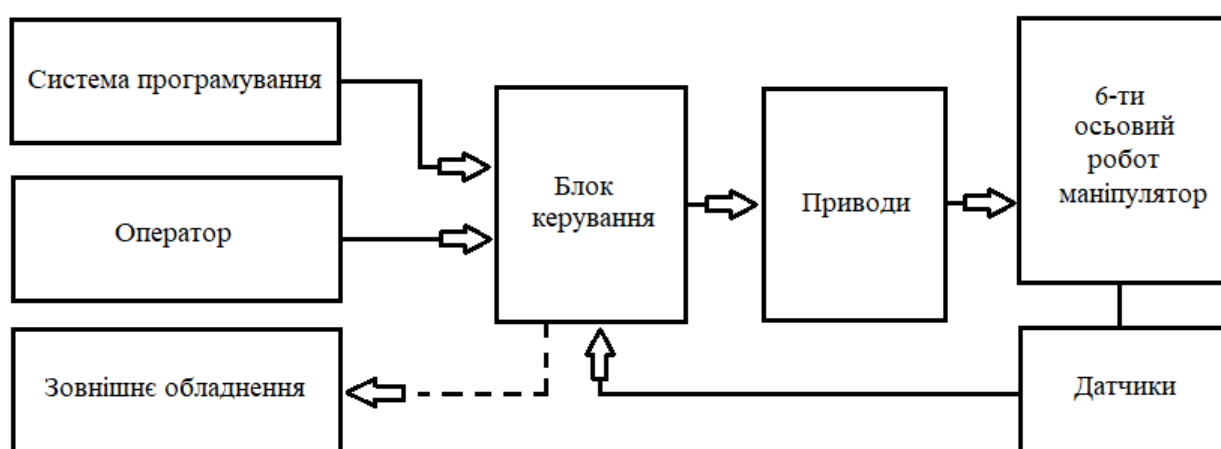


Рисунок 2.1– Структурна схема робота маніпулятора

До структурної схеми входить:

1. система програмування:

- забезпечує створення програм для керування роботом;

- може включати текстове програмування, візуальне програмування або інтерфейс на основі жменків;

- інтерфейси АРІ дозволяють інтегрувати з іншими системами;

2. оператор:

- вводить команди та керує роботом;

- може використовувати пульт дистанційного керування, комп'ютер або інтерфейс віртуальної реальності;

- отримує зворотний зв'язок від датчиків та камер робота;

3. зовнішнє обладнання:

- додаткові пристрої, які розширюють можливості робота;

- може включати захвати, датчики, камери або інші інструменти;

- з'єднується з роботом через порти або бездротові з'єднання;

4. блок керування:

- отримує команди від оператора та системи програмування;

- обробляє команди та відправляє сигнали приводам;

- Контролює датчики та зворотній зв'язок;

5. приводи:

- забезпечують рух суглобів робота;

- можуть бути електричними, пневматичними або гідравлічними;

- керуються сигналами з блоку керування;

6. датчики:

- збирають інформацію про навколишнє середовище та стан робота;

- можуть включати датчики положення, сили, швидкості, відстані та інші;

- надають зворотний зв'язок блоку керування;

7. шестиосьовий робот-маніпулятор:

- механічна рука з шістьма ступенями свободи;

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- забезпечує гнучкість та точність рухів;
- приводиться в рух приводами;
- несе датчики та зовнішнє обладнання;

8. взаємодія компонентів:

- оператор або система програмування генерують команди;
- команди надсилаються до блоку керування;
- блок керування обробляє команди та відправляє сигнали приводам;
- приводи приводять у рух суглоби робота;
- датчики збирають інформацію про навколишнє середовище та стан робота;
- зворотний зв'язок від датчиків надсилається до блоку керування;
- блок керування використовує зворотний зв'язок для коригування рухів робота.

2.2 Розробка кінематичної схеми робота – маніпулятора

Маніпулятор складається з 3 виконавчих ланок, бази, екструдера та п'ятих обертових кінематичних пар (рисунок 2.2). База (L0) схематично зображена колінчатим стрижнем, що складається з горизонтального стрижня L0.1. та вертикального L0.2, обертовою кінематичною парою база рухомо пов'язана вертикальним стрижнем з нерухомою основою та з іншого кінця, горизонтальним стрижнем пов'язана обертовою кінематичною парою, вісь якої перпендикулярна до площини Z. База може обертатись відносно нерухомої основи. Кут повороту відображений через q_1 .

Ланка 1 (L1) схематично зображується вертикальним стрижнем L1. З обох сторін вона рухомо пов'язана обертовими кінематичними парами.

Перша ланка може здійснювати обертові рухи q_2 навколо кінематичної пари, що пов'язує Базу і Першу Ланку.

Ланка 2 (L_2) зображена на схемі стрижнем L_2 . під кутом до горизонтальної вісі. З правої і лівої сторони вона рухомо пов'язана з третьою і першою ланкою обертовими кінематичними парами. Відносно першої ланки друга ланка здійснює обертові рухи q_3 навколо вісі Z .

Ланка 3 (L_3) зображена, як вертикальний стрижень L_3 , що рухомо закріплений з другою ланкою та обертовою кінематичною парою з 4 ланкою. Сегмент може здійснювати обертові рухи по вісі Z відносно другої ланки.

Остання ланка в кінематичній схемі четверта, L_4 . може здійснювати рухи навколо вісі Ланки 3 на кут повороту q_5 завдяки обертовій кінематичній парі, якою вона з'єднана з попередньою ланкою. Механічний захоплювач з захватними елементами, який здійснює рух q_6 , за рахунок чого забезпечується затискання – розтискання об'єкта маніпулювання.

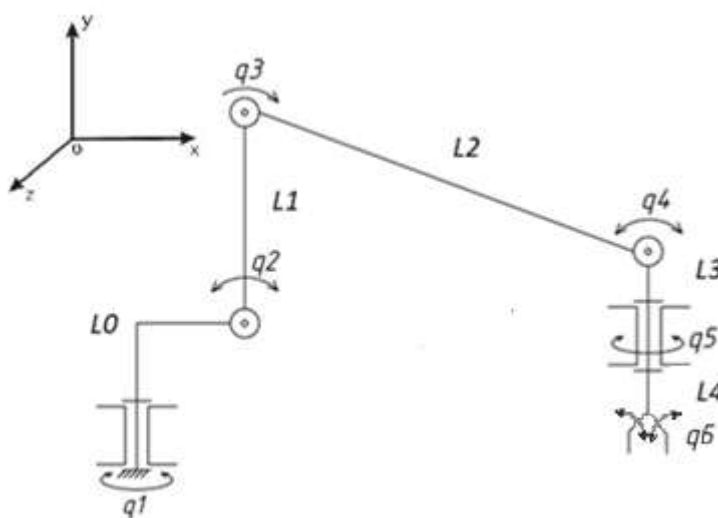


Рисунок 2.2 – Кінематична схема маніпулятора

2.3 Розробка конструкції робота-маніпулятора

Конструювання робота-маніпулятора для позиціонування датчиків на виробках зі складною геометрією (рисунок 2.3).

З метою розробки маніпулятора, було проведено дослідження існуючих аналогів та створив прототип власного робота. Цей робот призначений для двох цілей: навчання студентів керуванню роботом та автоматизації промислових процесів. Також можливе використання даного роботу у процесі контролю, при оснащенні активної частини робота-маніпулятора відповідними датчиками, наприклад ультразвуковими.



Рисунок 2.3 – Модель робота-маніпулятора

З метою спрощення реалізації, конструкція робота-маніпулятора була розділена на три ключові частини:

1. активна частина: цей компонент відповідає за рухи та виконання завдань маніпулятора;
2. рукоятка: забезпечує керування роботом та з'єднання активної частини з робочою зоною;
3. робоча зона: область, де відбувається безпосередня взаємодія маніпулятора з предметами або середовищем.

Розподіл конструкції на три частини був обумовлений обмеженнями 3D-принтера, який використовувався для друку деталей. Розмір робочої поверхні принтера не дозволяв виготовити цілісну конструкцію, тому її було розділено на менші частини, які могли бути надруковані окремо.

Серцем активної частини маніпулятора є стаціонарна зона, що вміщає серводвигун та підшипники. Ці компоненти славляться злагодженою роботою, забезпечуючи обертання рукоятки разом з робочою частиною навколо осі. Більше того, активна частина відповідає за просторове розташування рукоятки. Детальне зображення внутрішніх компонентів активної частини представлено на рисунку 2.4.

Для втілення в життя активної частини робота-маніпулятора, її віртуальну модель було створено в програмному комплексі SolidWorks. Далі цю модель розділили на складові компоненти, які згодом друкувалися на 3D-принтері. Дискові основи активної частини, що з'єднуються між собою гвинтами, слугують основою для розміщення підшипника. Цей підшипник буде відповідати за плавний та точний обертальний рух активної частини.



Рисунок 2.4 – Внутрішні складові активної частини робота-маніпулятора

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.
37

Для успішного складання активної частини маніпулятора знадобилися такі матеріали:

1. - кроковий двигун Nema 17;
2. - гвинти M3 x 10мм та M3 x 8мм;
3. - шурупи M3 x 3 мм та M4 x 3 мм;
4. - підшипник 10 мм x 30 мм x 9 мм, 6200zz;
5. - сталеві кульки 10 мм.

Створення активної частини маніпулятора розпочалося з віртуального дизайну в SolidWorks, де була створена 3D-модель всієї конструкції. Ця модель дозволила візуалізувати та проаналізувати деталі, перш ніж переходити до фізичного виготовлення. Наступним кроком стало використання програмного забезпечення Ultimaker Cura, яке адаптувало модель до конкретного 3D-принтера, задаючи розміри, матеріал та щільність друку.

Рисунок 2.5 демонструє 3D-модель активної частини маніпулятора з внутрішніми компонентами. В центрі моделі розміщений кроковий двигун, який буде відповідати за обертальний рух та підшипники що забезпечать плавне та точне обертання. Десять сталевих кульок, слугують додатковим компонентом, оптимізуючи роботу механізму.



Рисунок 2.5 – Змодельована активна частина робота-маніпулятора

Сталеві кульки, розміщені всередині підшипників, відіграють важливу роль у функціонуванні активної частини маніпулятора. Вони забезпечують плавне та обертання верхньої частини конструкції навколо своєї осі, що дозволяє рукоятці маніпулятора вільно обертатися на 360 градусів. Для з'єднання верхньої та нижньої частин конструкції використовуються 10 гвинтів, рівномірно розташованих по колу. Ці з'єднання забезпечують жорсткість та міцність конструкції, гарантуючи її стійкість до навантажень під час роботи. Детальне зображення зібраної активної частини робота-маніпулятора на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Роздрукована на 3D-принтері та зібрана активна частина робота-маніпулятора

Для друку деталей активної частини маніпулятора використовувався пластик PLA, який характеризується наступними механічними властивостями:

1. міцність на розтяг: 51 МПа. Це свідчить про те, що пластик витримує значні навантаження на розрив, не руйнуючись;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.
39

2. відносне подовження при розриві: 30%. Цей показник вказує на те, що пластик може розтягуватися на 30% своєї початкової довжини, перш ніж порватися;

3. модуль пружності при розтягу: 2300 МПа. Ця характеристика описує жорсткість пластику при розтягуванні. Чим вище модуль пружності, тим жорсткішим є матеріал;

4. модуль пружності при згинанні: 1440 МПа. Цей показник описує жорсткість пластику при згинанні;

5. міцність при згинанні: 80 МПа. Ця характеристика вказує на те, яке максимальне навантаження може витримати пластик при згинанні, перш ніж зламатися.

Вибір PLA пластику для друку деталей активної частини маніпулятора був зумовлений його кращими міцнісними характеристиками порівняно з ABS пластиком. PLA пластик володіє більшою міцністю на розтяг, що робить його більш стійким до механічних навантажень та деформацій. Це особливо важливо для даної конструкції, де деталі піддаються значним навантаженням під час роботи. На рисунку 2.6 представлений кінцевий вигляд 1/3 конструкції робота-маніпулятора, а саме активної частини. Ця частина включає в себе кроковий двигун, підшипники, сталеві кульки, верхню та нижню частини, з'єднані гвинтами. Завдяки ретельному проектуванню та підбору компонентів, а також використанню міцного та екологічного пластику PLA, активна частина маніпулятора гарантує надійну та довговічну роботу.

В активній частині маніпулятора розміщені елементи активного переміщення: кроковий двигун Nema17 для забезпечення руху та потенціометр BOURNS 3590S для контролю положення.

Для синхронної роботи рукоятки з захватом та активною частиною було встановлено 5 серводвигунів MG995. Вибір даного типу двигуна

ґрунтувався на аналізі прикладів роботів-маніпуляторів та відповідності характеристик двигуна вимогам до цієї частини конструкції.



Рисунок 2.6 – Активна частина робота-маніпулятора в зібраному стані

Основною задачею рукоятки та її плечей є передача крутного моменту від активної частини до захвату, таким чином робот-маніпулятор матиме 5 ступенів свободи. Для реалізації складання даної конструкції необхідно було використати такі матеріали:

- гвинти М3 х 8мм, М3 х 10мм, М3 х 63мм та М3 х 16мм;
- підшипники типу 688zz з розміром 8 мм х 16 мм х 5 мм;
- гайка М3 10 мм;
- серводвигун MG995.

Змодельований вигляд рукоятки та плечей представлено на рисунку 2.7. Оскільки при 3D-друку неможливо досягти точного розміру отворів під гвинти та підшипники, всі отвори було зашліфовано після друку. Щільність заповнення деталей рукоятки матеріалом при друку становила не менше 50%.

Кінцевий вигляд рукоятки робота-маніпулятора представлено на рисунку 2.8.



Рисунок 2.7 – Модель рукоятки та плечей



Рисунок 2.8 – Рукоятка робота-маніпулятора в зібраному стані

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.
42

Як видно з рисунку 2.8, для керування рукояткою встановлено 3 серводвигуни.

Однак, не менш важливою частиною робота-маніпулятора є зона захвату. Її було виготовлено з наступних матеріалів:

- гвинти М3 х 25мм, М3 х 10 мм, М3 х 8мм;
- підшипники типу 688zz;
- серводвигун MG995.

Розроблена зона захвату представлена на рисунку 2.9. Як і у випадку з рукояткою, отвори в зоні захвату було зашліфовано після друку, оскільки 3D-друк не гарантує точного розміру. Щільність заповнення деталей зони захвату матеріалом при друку становила не менше 70%.

Зона захвату складається з двох частин з перфорованою внутрішньою частиною. Це робиться для того, щоб забезпечити чіткий захвату деталей під час роботи робота-маніпулятора.

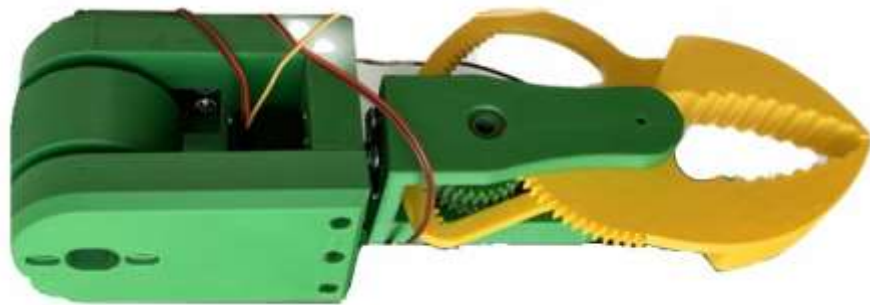


Рисунок 2.9 – Зона захвату робота-маніпулятора в зібраному стані

Зона захвату з'єднується з рукояткою за допомогою окремого елемента, який слугує з'єднувальною частиною між ними (рисунок 2.10). Цей елемент кріпиться до зони захвату за допомогою гвинтів.

Після 3D-друку, шліфування та збирання всіх деталей, отримано завершену модель робота-маніпулятора, призначеного для позиціонування

датчиків на виробках зі складною геометрією. Ця модель представлена на рисунку 2.11.



Рисунок 2.10 – Зона захвату з кріпильними елементами в зібраному стані



Рисунок 2.11 – Модель робота-маніпулятора в зібраному стані

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000 ПЗ

Зібраний робот-маніпулятор, готовий до програмування та подальшого використання відповідно до запланованих цілей.

2.4 Висновки до другого розділу

Цей розділ описує процес створення робота-маніпулятора для позиціонування датчиків на виробах зі складною геометрією.

Були обрані компоненти, описано їх функції та інтеграцію в загальну конструкцію. За допомогою SolidWorks було розроблено 3D-модель, яка лягла в основу макету. Деталі надруковано на 3D-принтері та зібрано відповідно до конструкції. Описано основні вузли та принципи їх взаємодії. Зібраний робот готовий до програмування.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТИНИ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

Серцевиною робота-маніпулятора є два активні елементи: серводвигун та кроковий двигун. Їх функціонування неможливе без попереднього програмування, тому розуміння принципів та особливостей програмування обох типів двигунів, а також поєднання їх роботи, є ключовим для успішного керування роботом.

3.1 Вибір блоку живлення

Блок живлення - це справжнє "серце" робота-маніпулятора. Він забезпечує його енергією, щоб він міг рухатися, відчувати та виконувати всі свої завдання.

Блок живлення перетворює змінну напругу з розетки (АС) на постійну (DC), адже саме на DC працюють всі електронні штучки в роботі. Дає роботу "сили", щоб все працювало плавно, навіть коли він виконує складні завдання. Фільтрує шум з розетки, щоб він не псував роботу електроніки. Захищає робота від перевантажень, якщо раптом щось піде не так.

При виборі блоку живлення важливо врахувати:

- напругу: впевнитися, що вона сумісна з усіма компонентами вашого робота. Найпоширеніші - 5 В, 12 В та 24 В;
- потужність: блок живлення повинен бути "м'язистим" достатньо, щоб живити все, навіть коли робот наполегливо працює;
- тип: є два основних типи: імпульсні (компактні та легкі) та трансформаторні (більші, але могутніші);

Блок живлення MR-36-12V-3A чудово підходить для створення робота-маніпулятора. Блок живлення MR-36-12V-3A представлений на рисунку 3.1.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		46



Рисунок 3.1 – Блок живлення MR-36-12V-3A

3.2 Вибір плати живлення

Плата живлення робота-маніпулятора - це критичний компонент, який забезпечує живленням всі його двигуни, датчики та інші електронні компоненти. Вона перетворює змінну напругу мережі змінного струму (AC) на постійну напругу (DC), необхідну для роботи електроніки маніпулятора. Плати живлення представлена на рисунок 3.2.

Її надійність, ефективність та здатність забезпечити необхідну потужність безпосередньо впливають на функціональність та можливості маніпулятора.

До цих функцій входить:

- забезпечення живленням: плата живлення подає енергію всім електронним компонентам маніпулятора, включаючи двигуни, датчики, мікроконтролери та інші;
- регулювання напруги: плата живлення регулює напругу, яка подається на різні компоненти, щоб забезпечити їхню стійку роботу;
- захист від перевантажень: плата живлення захищає компоненти від пошкоджень у разі перевантаження струмом або короткого замикання;

- фільтрація: плата живлення фільтрує шум і перешкоди з мережі змінного струму, щоб забезпечити чисте та стабільне живлення для електроніки.

Існує два основних типи плат живлення змінного струму (AC) та постійного струму (DC). Плата змінного струму живлення (AC) перетворює змінну напругу мережі змінного струму на постійну напругу, необхідну для роботи електроніки маніпулятора. Вони, як правило, більші та важчі, ніж плати живлення постійного струму, але можуть забезпечити більшу потужність. Плата постійного струму (DC) живлення отримує постійну напругу від акумулятора або іншого джерела постійного струму і перетворює її на різні напруги, необхідні для роботи електроніки маніпулятора. Вони, як правило, менші та легші, ніж плати живлення змінного струму, але можуть забезпечити меншу потужність.

Вибір типу плати живлення для робота-маніпулятора залежить від кількох факторів, включаючи:

- потужність: кількість потужності, необхідної маніпулятору, буде залежати від розміру маніпулятора, типу двигунів, які він використовує, і завдань, які він повинен виконувати;
- напруга: різні електронні компоненти маніпулятора потребують різної напруги для роботи. Плата живлення повинна мати можливість забезпечити ці напруги;
- розмір і вага: розмір і вага плати живлення можуть бути важливими міркуваннями, якщо маніпулятор повинен бути портативним;
- ефективність: ефективність плати живлення буде визначати, скільки енергії втрачається у вигляді тепла. Більш ефективна плата живлення буде генерувати менше тепла і буде більш енергоефективною;

- 14 цифрових вхідно-вихідних штирів (з яких 6 можна використовувати як ШІМ-виходи);

- 6 аналогових вхідних штирів;
- кварцовий генератор 16 МГц;
- USB-з'єднання для програмування;
- роз'єм живлення постійного струму;
- світлодіодний індикатор живлення;
- скидаюча кнопка.

Роль Arduino Uno в роботі маніпулятора:

- контроль серво/крокових двигунів: Arduino Uno може використовуватися для надсилання команд серво- та кроковим двигунам, що керують рухами маніпулятора;

- зчитування даних із датчиків: Arduino Uno може зчитувати дані з датчиків, таких як датчики відстані, датчики положення та датчики сили, які використовуються для надання зворотного зв'язку про положення та стан маніпулятора;

- виконання обчислень: Arduino Uno може виконувати обчислення, необхідні для управління маніпулятором, такі як кінематика прямої та оберненої трансмісії, планування траєкторії та керування рухом;

- зв'язок з комп'ютером: Arduino Uno може зв'язуватися з комп'ютером для отримання команд, надсилання даних та візуалізації стану маніпулятора.

Перевагою використання Arduino Uno є її простота використання та програмування робить її доступною для початківців, а доступна ціна робить її економічно вигідним вибором для проектів. Гнучкість Arduino Uno дозволяє використовувати її з різними типами датчиків, пристроїв та програмного забезпечення, що робить її гнучкою платформою для реалізації

різноманітних завдань. Додатково, Arduino має велику та активну спільноту користувачів, які завжди готові надати підтримку та ресурси.

Із недоліків використання Arduino Uno це обмежена потужність обробки та швидкість. Arduino Uno має обмежену потужність обробки, що може обмежувати складність проектів, які можна на ній виконувати. Також Arduino Uno може бути не такою швидкою, як інші мікроконтролерні плати, що може бути проблемою для проектів, які вимагають високої швидкості реагування.

Arduino Uno потужна та універсальна мікроконтролерна плата, яка чудово підходить для створення робота-маніпулятора. Її простота використання, доступність та гнучкість роблять її чудовим вибором.



Рисунок 3.3 - Мікроконтролерна плата Arduino Uno

3.4 Вибір плати керування

Плата керування - це "мозок" вашого маніпулятора, який відповідає за прийом команд від Arduino Uno, їх обробку та надсилання відповідних сигналів на виконавчі механізми (крокові та серводвигуни). Її функції можна розділити на дві категорії:

- Прийом та обробка даних: плата керування отримує команди від Arduino Uno у вигляді цифрових сигналів або послідовних даних. Далі, вона

інтерпретує ці команди, розуміючи, який рух маніпулятора вони описують (наприклад, переміщення руки вправо, обертання зап'ястя). На основі отриманих команд та інформації про кінематику маніпулятора, плата керування розраховує траєкторію руху кожного суглоба;

- управління виконавчими механізмами: плата керування, отримавши чітку траєкторію руху, генерує сигнали керування для крокових та серводвигунів. Ці сигнали, у вигляді імпульсів з певною шириною (PWM) або послідовних даних, чітко вказують кожному двигуну, як саме й коли рухатися.

Плата також регулює швидкість та потужність руху, забезпечуючи плавне та точне маневрування маніпулятора. Деякі плати можуть отримувати зворотний зв'язок від датчиків, встановлених на маніпуляторі, для коректування траєкторії руху та покращення точності позиціонування.

При виборі плати керування для роботи маніпулятора слід врахувати такі фактори:

- кількість суглобів: плата керування повинна мати достатньо каналів для управління всіма суглобами вашого маніпулятора;
- тип виконавчих механізмів: плата керування повинна бути сумісна з типом виконавчих механізмів, які ви використовуєте (крокові або серводвигуни);
- функціональність: деякі плати керування пропонують додаткові функції, такі як інтерполяція руху, планування траєкторії та моніторинг зворотного зв'язку;
- інтерфейс: плата керування повинна мати зручний для вас інтерфейс для підключення до Arduino Uno та виконавчих механізмів;
- вартість: готові плати керування, як правило, дорожчі, ніж саморобні.

Приклади плат керування:

- Arduino Motor Shield: це проста та недорога плата керування, яка сумісна з кроковими та серводвигунами рисунок 3.4;
- Adafruit Motor Shield V2: ця плата керування пропонує більше функцій, ніж Arduino Motor Shield, включаючи інтерполяцію руху та моніторинг зворотного зв'язку;
- SparkFun Pololu Micro Maestro 12-Channel Servo Controller: ця плата керування спеціально розроблена для серводвигунів і пропонує високу точність та швидкість керування;
- Custom DIY H-bridge: для досвідчених користувачів, саморобний H-міст може бути кращим варіант.



Рисунок 3.4 - Arduino Motor Shield

3.5 Вибір понижувача перетворювача для крокових двигунів

Понижувач перетворювач для крокових двигунів - це важливий компонент маніпулятора, який відповідає за перетворення напруги живлення до рівня, що підходить для роботи крокових двигунів (рисунок 3.5). Він забезпечує стійке та надійне живлення.

Функції:

- перетворення напруги: понижувач перетворювач приймає напругу

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

живлення (зазвичай 12В або 24В) та перетворює її на нижчу напругу, необхідну для роботи крокових двигунів (зазвичай 5В або 24В);

- забезпечення стабільного струму: понижувач перетворювач підтримує стабільний струм, навіть при змінах навантаження або коливаннях напруги живлення. Це гарантує плавну та точну роботу крокових двигунів;
- захист від перевантажень: понижувач перетворювач має вбудовані захисні механізми, які запобігають перевантаженню, перегріву та короткому замиканню. Це робить його надійним та безпечним компонентом.

Типи понижуючих перетворювачів:

- лінійні понижуючі перетворювачі: ці перетворювачі прості та недорогі, але мають менший ККД (коефіцієнт корисної дії) та генерують більше тепла;
- імпульсні понижуючі перетворювачі: ці перетворювачі більш складні та дорогі, але мають вищий ККД та генерують менше тепла.

Вибір понижуючого перетворювача:

При виборі понижуючого перетворювача для крокових двигунів важливо врахувати наступні фактори:

- напруга живлення: виберіть перетворювач, який може працювати з напругою вашого джерела живлення;
- вихідна напруга: виберіть перетворювач, який дає напругу, необхідну для роботи ваших крокових двигунів;
- струм: виберіть перетворювач, який може витримувати струм, необхідний для ваших крокових двигунів;
- ККД: виберіть перетворювач з високим ККД, щоб мінімізувати втрати енергії;
- розмір: виберіть перетворювач відповідного розміру, який буде зручно розмістити у вашій системі.



Рисунок 3.5 - Понижувач перетворювач для крокових двигунів

3.6 Вибір крокового двигуна

Нарівні з сервоприводами, крокові двигуни відіграють ключову роль в автоматизованих системах та робототехніці. Їх можна зустріти в безлічі пристроїв, від CD-приводів до 3D-принтерів та роботів-маніпуляторів.

Кроковий двигун це - електромеханічний агрегат, що перетворює сигнал керування на дискретні кроки обертання ротора, чітко фіксуючи його у заданому положенні без пристроїв зворотного зв'язку (рисунок 3.6). При проектуванні конкретних систем доводиться обирати між сервомотором і кроковим двигуном. Коли необхідне точне позиціонування та чітке регулювання швидкості, а необхідні момент і швидкість не перевищують допустимих меж, кроковий двигун стає найекономнішим рішенням. Як і для звичайних двигунів, для збільшення моменту може використовуватися понижуючий редуктор. Однак для крокових двигунів редуктор не завжди підходить. На відміну від колекторних двигунів, у яких момент зростає зі збільшенням швидкості, кроковий двигун має більший момент на низьких швидкостях. До того ж, крокові двигуни мають значно меншу максимальну швидкість порівняно з колекторними, що обмежує максимальне передавальне число i , відповідно, збільшення моменту за допомогою

редуктора. Готові крокові двигуни з редукторами, хоча й існують, але не є поширеними.

Функціонування всіх існуючих крокових двигунів ґрунтується на дискретній зміні стану електромагнітного поля в робочому просторі електродвигуна. Це досягається за допомогою імпульсного збудження (або перемикання) його обмоток.

Електромеханічний перетворювач енергії, який генерує синхронізуючий момент або утримує зусилля в кожному з циклічно повторюваних допустимих станів, де кількість $n \geq 2$, при дотриманні умов спрямованого переходу в наступний стійкий стан, може бути використаний як кроковий двигун. Цим вимогам відповідає широкий спектр пристроїв: електромагніти з поворотною пружиною і храповим, анкерним або фрикційним механізмом, синхронні електричні машини, асинхронні електричні машини з неповною кліткою на роторі, сельсини.

За видами крокових двигунів їх поділяють на:

- двигуни зі змінним магнітним опором;
- двигуни з постійними магнітами;
- гібридні двигуни;
- біполярні і уніполярні крокові двигуни [13].

Величина моменту, що генерується кроковим двигуном, визначається трьома основними чинниками такі як швидкість, струм в обмотках та схема драйвера. Для досягнення високих швидкостей обертання з області розгону, необхідно розпочинати роботу з низької швидкості з області старту, а потім поступово збільшувати швидкість. Під час розгону двигун проходить через ряд швидкостей, деякі з яких можуть призводити до небажаного явища резонансу. Для стійкого та плавного розгону рекомендується використовувати навантаження з моментом інерції, не меншим за момент інерції

ротора. На ненавантаженому двигуні резонансні явища проявляються найсильніше.

Під час розгону або гальмування важливо правильно підібрати закон зміни швидкості та максимально допустиме прискорення. Прискорення має бути тим менше, чим вище інерційність навантаження. Критерій вибору режиму розгону - це розгін до потрібної швидкості для конкретного навантаження за мінімальний час. На практиці найчастіше використовують розгін і гальмування з постійним прискоренням.

Зазвичай закон, за яким здійснюється розгін або гальмування крокового двигуна, реалізується програмно за допомогою мікроконтролера. Це пов'язано з тим, що мікроконтролер, як правило, є джерелом тактової частоти для драйвера крокового двигуна.

Крокові двигуни схильні до негативного явища, яке називається резонансом. Це проявляється у різкому зниженні крутного моменту на деяких швидкостях, що може призвести до втрати кроків та розсинхронізації. Ефект виникає, коли частота кроків збігається з власною резонансною частотою ротора двигуна. При кроці ротор не одразу фіксується у новому положенні, а здійснює затухаючі коливання. Систему "ротор-магнітне поле-статор" можна уявити як пружинний маятник. Частота його коливань залежить від моменту інерції ротора (з урахуванням навантаження) та величини магнітного поля. Через складну конфігурацію магнітного поля власна резонансна частота ротора також залежить від амплітуди коливань. З її зменшенням частота зростає, наближаючись до малоамплітудної частоти, яку простіше розрахувати. Ця частота залежить від кута кроку та співвідношення моменту утримання до моменту інерції ротора. Більший момент утримання та менший момент інерції призводять до збільшення резонансної частоти.

Перевага крокових двигунів полягає в тому, що кут повороту ротора визначається кількістю імпульсів, що подаються на двигун. Двигун забезпечує повний крутний момент навіть у режимі очікування (коли обмотка знаходиться під напругою), забезпечуючи точне позиціонування і повторюваність. Точність хорошого крокового двигуна становить 3-5% від розміру кроку. Ця похибка не накопичується від кроку до кроку. Кроковий двигун вирізняється можливістю швидкого запуску, гальмування та зміни напрямку обертання. Завдяки відсутності щіток він відрізняється високою надійністю. Однозначна залежність положення ротора від вхідних імпульсів робить можливим точне позиціонування без зворотного зв'язку. Двигун здатен розвивати дуже низькі швидкості обертання, що робить його незамінним у випадках, коли навантаження приєднується безпосередньо до валу, без потреби у проміжному редукторі. Термін служби крокового двигуна обмежується лише зносом підшипників, а його робочий діапазон швидкостей досить широкий. Швидкість обертання валу прямо пропорційна частоті вхідних імпульсів.



Рисунок 3.6 – Кроковий двигун

3.7 Вибір драйвера крокового двигуна

Драйвер крокового двигуна – це електронний інтерфейс, який посередникує між контролером (наприклад, мікроконтролером Arduino) та

кроковим двигуном. Він перетворює низьковольтні сигнали управління від контролера у високовольтні та високоструміві сигнали, необхідні для керування обмотками двигуна.

Управляти кроковим двигуном набагато складніше на відміну від звичайних колекторних двигунів, керування кроковим двигуном потребує більш складного підходу. Це пов'язано з необхідністю послідовного перемикання напруги в обмотках та одночасного контролю струму. Для вирішення цієї задачі розроблено спеціальні пристрої - драйвери крокових двигунів. Драйвер крокового двигуна виступає посередником між контролером та самим двигуном, приймаючи сигнали управління та перетворюючи їх на необхідні команди для точного позиціонування ротора. Цей "розумний" пристрій здатен ділити фізичний крок двигуна на значно дрібніші дискретні кроки, забезпечуючи неймовірну точність та плавність ходу.

До драйверу крокового двигуна підключається живлення та сам двигун (його обмотки) і сигнали управління. Стандартом управління сигналами є STEP / DIR або CW / CCW і сигнал ENABLE.

Протокол STEP/DIR - це простий та широко використовуваний метод керування кроковими двигунами. Він використовує два сигнали для керування обертанням двигуна:

Сигнал STEP: Цей сигнал визначає кількість кроків, які повинен зробити двигун. Кожен імпульс STEP відповідає одному кроку.

Сигнал DIR: Цей сигнал визначає напрямок обертання двигуна. Високий рівень DIR відповідає обертанню за годинниковою стрілкою, а низький рівень - обертанню проти годинникової стрілки.

Протокол CW/CCW - це простий та зручний метод керування кроковими двигунами, який використовує один сигнал для визначення напрямку та швидкості обертання. Цей протокол відрізняється своєю лаконічністю та

легкістю реалізації, роблячи його популярним вибором у багатьох застосунках.

Сигнал CW/CCW: цей сигнал є ключовим елементом протоколу. Він може бути представлений у двох станах:

- високий рівень (CW): цей стан сигналу вказує на те, що двигун повинен обертатися за годинниковою стрілкою;
- низький рівень (CCW): цей стан сигналу вказує на те, що двигун повинен обертатися проти годинникової стрілки.

Частота сигналу CW/CCW визначає швидкість обертання двигуна. Чим вища частота сигналу, тим швидше обертається двигун.

Сигнал ENABLE - це важливий елемент керування кроковим двигуном, який використовується для його активації та деактивації. Він діє як вимикач, даючи драйверу знати, коли двигун повинен працювати, а коли - ні.

Драйвери крокового двигуна при програмуванні можуть мати додаткові функції:

- контроль перевантажень по струму;
- контроль перевищення напруги живлення, захист від ефекту зворотної ЕРС від ШД [14].

При гальмуванні крокового двигуна виникає зворотна ЕРС (електрорушійна сила), яка накладається на напругу живлення, генеруючи короткочасний стрибок. Швидкість гальмування впливає на величину стрибка: чим вона вища, тим потужніший стрибок. Цей стрибок може призвести до виходу з ладу драйвера, тому в ньому передбачений захист.

Кроковий двигун володіє додатковими можливостями, які роблять його роботу більш економною та ефективною. При відсутності сигналу STEP (простій) двигун автоматично переходить в режим AUTO-SLEEP, знижуючи струм обмотки та споживання енергії. В діапазоні 6-12 об/сек може виникати резонанс, що супроводжується гудінням та зупинкою ротора. Автоматична

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		60

компенсація резонансу усуває вібрацію та гудіння, роблячи обертання двигуна плавним та стійким в усьому діапазоні частот. Ці функції активуються за допомогою налаштування драйвера та значно покращують характеристики крокового двигуна.

Таким чином, вбудований генератор STEP, що знаходиться в драйвері крокового двигуна, є зручною функцією для пробного запуску драйвера без підключення до персонального комп'ютера або іншого зовнішнього генератора STEP-сигналів. Цей генератор також буде корисним для створення простих систем переміщення без використання персонального комп'ютера.

Візьмемо для прикладу драйвер крокового двигуна Allegro A4988. Це універсальний цифровий драйвер крокового двигуна з передовими алгоритмами керування та системою, яка гарантує плавне обертання, оптимальний крутний момент і стабільність роботи двигуна. З цим драйвером двигун може працювати з меншим рівнем шуму, меншим нагріванням і більш плавним рухом (рисунок 3.7).

Драйвер A4988 - це компактний та простий у використанні драйвер крокових двигунів, що володіє мікроконтролером для зручного керування. Він може працювати з напругою живлення від 8 до 35 В та забезпечувати струм до 1 А на фазу без радіатора (до 2 А з радіатором). A4988 оснащений захистом від перевантаження та перегріву, що робить його надійним та безпечним у використанні. Важливою характеристикою крокових двигунів є кількість кроків на один оборот 360°. Наприклад, для двигунів Nema17 це значення становить 200 кроків, що відповідає 1.8° на крок. Драйвер A4988 розширює цю функціональність завдяки можливості керування проміжними кроками, пропонуючи п'ять режимів мікрокроку: 1 (повний), 1/2, 1/4, 1/8 та 1/16.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.7 – Драйвера крокового двигуна Allegro A4988

Особливості та переваги драйвера A4988:

- автоматичне виявлення / виділення режиму розпаду;
- змішані та повільні режими розпаду струму;
- захист кросовер-струм;
- захист від короткого замикання на землю;
- короткий захист навантаження;
- 3,3 та 5 В сумісна логічна поставка;
- низькі RDS (ON) виходи;
- термічна схема відключення;
- синхронне випрямлення для розсіювання низької потужності;
- внутрішній UVLO;
- п'ять вибраних режимів кроку: повна, 1/2, 1/4, 1/8 та 1/16 [15].

Призначення контактів драйвера та їхнє підключення дуже важливі. На рисунку 3.8 показано типову діаграму застосування драйвера з його підключенням.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.
62

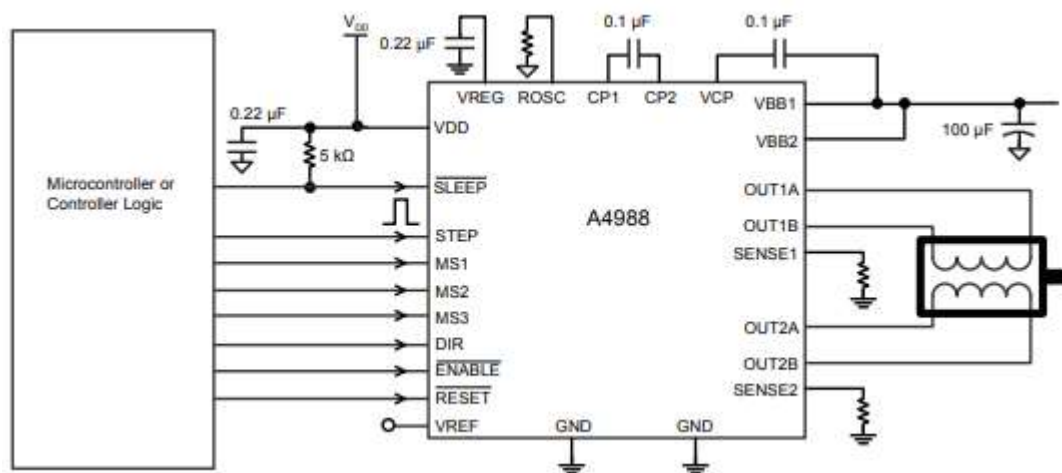


Рисунок 3.8 - Типова діаграма застосування драйвера з підключенням

Розглянемо детальніше призначення контактів драйвера A4988:

- STEP - генерація імпульсів для руху двигунів (кожен імпульс - крок);
- DIR - установка напрямку обертання;
- VDD - живлення мікросхеми (3.5 -5В);
- 2B, 2A, 1A, 1B - для підключення обмоток двигуна;
- VMOT - живлення для двигуна (8 - 35 В);
- RESET - скидання мікросхеми;
- GND – загальний;
- ENABLE - включення / вимикання драйвера;
- MS1, MS2, MS3 - контакти для установки мікрокроку.

Робота в мікрокроковому режимі вимагає низьких струмів; модуль драйвера A4988 дає змогу обмежувати відповідний струм за допомогою потенціометра на платі. Оскільки драйвер дуже чутливий до коливань напруги живлення двигуна, рекомендується встановлювати конденсатор великої ємності.

Отже, A4988 від Allegro підходить для широкого спектру крокових двигунів, розмірами NEMA від 17 до 34. Може бути використаний в різних

видах застосувань, таких як верстати лазерної різки і гравіювання, високоточні координатні столи, етикетувальні машини і т.д.

Отже, A4988 від Allegro підходить для широкого спектру крокових двигунів за розмірами від 17 до 34. Його можна використовувати в широкому спектрі застосувань, як-от верстати для лазерного різання і гравіювання, високоточні координатні столи та етикетувальні машини і тд.

3.8 Програмування крокових двигунів

Як і у випадку з серводвигунами, для керування кроковими двигунами за допомогою плат Arduino існують спеціальні бібліотеки. Зокрема, в Arduino IDE вже вбудована бібліотека, що значно спрощує роботу з цими двигунами.

Програмування кількості кроків здійснюється наступним чином: програма використовує серійний монітор. Після ініціалізації монітор вмикається і на ньому відображається кількість "кроків": Після підключення бібліотеки кроків ініціалізуються керуючі виводи "in1" - "in4". Для оголошення даних пінів з використанням бібліотеки крокових двигунів, використовується наступна команда:

`Stepper motor (768, in1Pin, in2Pin, in3Pin, in4Pin)`, де першим параметром є номер від 'in1' до 'in4'. Перший параметр - це кількість "кроків", які кроковий двигун робить за один повний оберт. Для точного позиціонування, можна обертати ротор двигуна з дискретністю в один крок. Після цього встановлюється зв'язок за серійним протоколом, в результаті чого плата Arduino може отримувати команди з вікна серійного монітора IDE Arduino.

Наступна команда встановлює швидкість обертання ротора крокового двигуна:

```
motor.setSpeed(10);
```

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Проте, сьогодні сервоприводи вийшли за рамки простої допоміжної ролі. Їх функціонал розширився, і тепер вони є ключовими компонентами сервомеханізмів, забезпечуючи точне та динамічне керування рухом.

Сучасне машино і приладобудування прагне до автоматизації та спрощення виробничих процесів. Це досягається шляхом вдосконалення конструкцій, роблячи їх більш простими, але водночас ефективними. Сервоприводи стають незамінними помічниками в цьому прагненні, адже вони чудово підходять для підтримки постійної швидкості в промислових роботах та верстатах.

Сервоприводи - це не просто двигуни, а розумні механізми, що знаходять застосування в найрізноманітніших галузях. Їх можна зустріти на свердлильних верстатах, у транспортних засобах, системах допоміжного призначення, а також:

- паперовій та пакувальній промисловості: сервоприводи забезпечують точність та швидкість при виготовленні паперу, картону та упаковки;
- виробництві листового металопрокату: ці пристрої роблять можливим високоточне різання, штампування та інші операції з листовим металом;
- металообробних верстатах: завдяки сервоприводам, верстати можуть виконувати складні та точні операції з металом;
- транспортних засобах: сервоприводи використовуються в системах керування, гальмування та інших системах, забезпечуючи плавність та чіткість роботи;
- деревообробній промисловості: ці пристрої роблять деревообробне обладнання більш точним та зручним у використанні;

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- в інших системах: сервоприводи застосовуються скрізь, де потрібна висока точність та контроль над рухом, а використання традиційних перетворювачів частоти не є ефективним. [14]

Сучасне обладнання, що потребує високої точності та продуктивності, неможливо уявити без сервоприводів. Ці розумні механізми завоювали популярність завдяки низці ключових переваг:

- бездоганна точність: сервоприводи забезпечують бездоганний контроль над процесами, роблячи їх незамінними в таких сферах, як медичне обладнання, наукові дослідження та виробництво високоточних деталей;

- гнучкість керування: ці пристрої дають можливість гнучко регулювати швидкісні режими, роблячи роботу обладнання більш ефективною та адаптивною до мінливих умов;

- стійкість до перешкод: низька чутливість сервоприводів до перешкод гарантує плавність та чіткість роботи обладнання;

- компактність: сучасні сервоприводи мають невеликі габарити, що робить їх зручними для використання в обмеженому просторі. [15]

Їхньою ключовою особливістю є здатність підвищувати потужність, якщо надходить із зовнішнього джерела енергія, що відрізняється від тієї, яка потрібна "на виході", або якщо вхідні параметри нестабільні.

Це стає можливим завдяки системі зворотного зв'язку, яка працює за принципом замкнутого контуру. Датчики збирають дані про фактичне положення, швидкість та інші параметри роботи механізму, і передають їх до керуючої системи. Ця система аналізує отримані дані, порівнює їх із заданими параметрами та коригує роботу сервоприводу, щоб забезпечити максимально точне виконання поставленого завдання. Таким чином, сервоприводи не лише передають енергію, але й отримують зворотний зв'язок.

За габаритними показниками ці агрегати діляться на мікропривід, стандартні конфігурації і великогабаритні пристрої [16].

Ефективність роботи сервоприводів оцінюється за двома ключовими параметрами: швидкістю повороту валу та крутним моментом. Швидкість, яка вимірюється в секундах, характеризує час, необхідний для переміщення валу з одного положення в інше. Крутний момент, що вимірюється в кг·см, вказує на силу, з якою вал може обертатися навколо осі обертання. Цей параметр, окрім цільового призначення сервоприводу, залежить від конструкції редуктора, зокрема, від кількості його ступенів та передавальних чисел.

Ще двадцять років тому домінували аналогові сервоприводи. Сьогодні ж все більшої популярності набувають цифрові модифікації, які користуються перевагою у розробників, інженерів та конструкторів [17].

За останнє десятиліття розробники та виробники аналогових сервоприводів досягли значних успіхів. Ці пристрої стали більш компактними, їхні технічні характеристики суттєво покращилися: значно зросла швидкість обертання валу, а також збільшився крутний момент.

Новим етапом розвитку сервоприводів стала поява цифрових модифікацій, які мають ряд переваг навіть порівняно з сервоприводами колекторного типу.

На перший погляд, аналогові та цифрові сервоприводи не мають суттєвих відмінностей. Їхні корпуси та механічні частини можуть бути схожими. Проте ключова різниця полягає в платах управління.

У цифрових моделях замість мікросхеми використовується мікропроцесор. Він аналізує вхідні сигнали, обчислює необхідні команди та керує двигуном. Деякі помилково вважають, що принцип роботи аналогових та цифрових сервоприводів кардинально відрізняється. Це не так. Обидва

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

типи можуть мати однакові механізми, силові агрегати та змінні резистори (потенціометри).

В аналоговому сервоприводі відбувається зчитування сигналу з приймача та його порівняння з поточним положенням валу сервомотора. Різниця між сигналами надсилається на підсилювач, який генерує відповідний керуючий сигнал для двигуна. Сигнал з підсилювача подається на двигун, приводячи його вал до заданого положення. Процес управління відбувається з мінімальною частотою 50 Гц (50 циклів в секунду). Це означає, що між імпульсами, які надсилаються на двигун, виникають паузи ("мертва зона"). В "мертвій зоні" знаковість сигналу може змінитися на протилежну.

Цифрові сервоприводи оснащені спеціальним процесором, який працює на високих частотах. Це дозволяє їм обробляти вхідні сигнали та генерувати керуючі імпульси на двигун з мінімальною частотою 300 Гц (300 циклів в секунду). Завдяки цьому цифрові сервоприводи мають високий показник крутіння, а також якісно оптимізоване центрування.

Єдиним недоліком є те, що батарея розряджається в цифрових пристроях швидше, ніж в аналогових.

3.10 Програмування серводвигунів

Плата Arduino, яка широко використовується для створення роботів-маніпуляторів, отримала нове розширення своїх функцій завдяки бібліотеці Servo. Ця бібліотека робить Arduino потужним інструментом для керування серводвигунами, що значно розширює спектр задач, які може виконувати робототехніка на базі Arduino.

Бібліотека Servo надає зручний інтерфейс для програмування, що робить її доступною навіть для початківців. Завдяки цій бібліотеці Arduino

може одночасно керувати декількома серводвигунами: до 12 на більшості плат Arduino та до 48 на Arduino Mega [18].

Схема підключення серводвигуна доволі проста (рисунок 3.10).

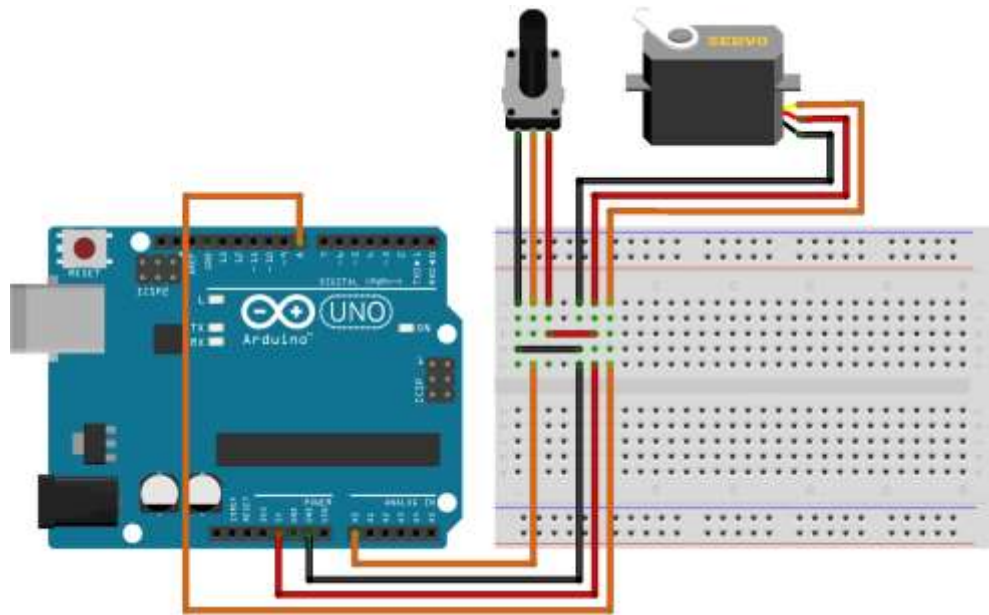


Рисунок 3.10 – Схема підключення серводвигуна до плати Arduino Uno

Серводвигун має три дроти: дріт живлення, дріт заземлення та сигнальний провід.

- дріт живлення, зазвичай червоного кольору, під'єднується до виводу 5V плати Arduino;
- дріт заземлення, зазвичай чорного або коричневого кольору, з'єднується з відповідним виводом на платі Arduino;
- сигнальний провід, зазвичай жовтого, оранжевого або білого кольору, під'єднується до цифрового виводу Arduino.

Важливо зазначити, що серводвигуни споживають значний струм. Тому, варто використовувати два або більше двигуни, рекомендується живити їх від окремого джерела живлення, а не від виводу +5V Arduino. При цьому земляні виводи Arduino та зовнішнього джерела живлення повинні бути з'єднані.

Розглянемо більш детально функції, які надає бібліотека Servo, а саме:

- `uint8_t attach (int pin);`
- `uint8_t attach (int pin, int min, int max).`

Даною функцією ми можемо вказати пін до якого підключений керуючий провід сервовдвигуна. Синтаксично дана команда описується так:

- `servo.attach (pin)` або `servo.attach (pin, min, max).`

Параметри, які застосовуються у даній синтаксичній команді:

- `Servo` - об'єкт класу `Servo`;
- `pin` - номер порта до якого підключена серва;
- `min` (опціонально) - ширина імпульсу в мікросекундах встановлює положення вала серви в 0 градусів (по-замовчуванню 544);
- `max` (опціонально) - ширина імпульсу в мікросекундах встановлює положення вала серви в 180 градусів (по-замовчуванню 2400).

Приклад застосування бібліотеки при написанні коду управління роботом-маніпулятором:

```
#include <Servo.h>
Servo myservo;
void setup ()
{
myservo.attach (9);
}
void loop () {} [19].
```

Отже, програмування серводвигуна здійснюється безпосередньо через електронну плату та не викликає особливих складнощів при заданні вихідних параметрів роботи.

3.11 Налаштування плати Arduino Uno для взаємодії з роботом

Для керування сконструйованим роботом-рукою потрібна плата Arduino. З'єднання плати з ПК здійснюється через програмне середовище Arduino IDE. Це програмне забезпечення доступне для користувачів Windows і дозволяє писати програмні коди для платформи Arduino. Ця платформа орієнтована на майстрів, які планують програмувати в неіндустріальних масштабах, а також на тих, хто використовує Arduino для створення простих систем автоматизації та робототехніки.

Arduino IDE включає в себе простий текстовий редактор коду, компілятор, менеджер проектів та модуль для завантаження прошивки в мікроконтролер. Ця інтегрована платформа написана на мові програмування Java й базується на відкритому коді. Для програмування Arduino використовується мова C++ (з компілятором AVR-GCC).

Дане програмне середовище має такі переваги:

- можливість поглибити знання мови C ++;
- кілька варіантів мов програмування;
- програма сумісна з усіма версіями операційних систем Windows;
- наявність необхідних для роботи інструментів;
- функції збереження, експорту, перевірки, пошуку, заміни скетчів;
- зручний для використання і розуміння інтерфейс;
- доступність до завантажування;
- вбудований набір прикладів програм.

Після встановлення Arduino IDE на комп'ютер, під'єднайте плату Arduino до нього. З'єднання здійснюється за допомогою USB-кабелю. Правильне підключення індикуюється світлодіодом "ON", що загоряється на платі, а також миготінням світлодіода "L". Це значить, що на плату подається

живлення, і мікроконтролер Arduino запускає заводську програму "Blink" (миготіння світлодіодом).

Робочий інтерфес програми Arduino IDE зображено на рисунку 3.11.



Рисунку 3.11 – Робочий інтерфес програми Arduino IDE

Для налаштування Arduino IDE під конкретну плату Arduino, необхідно повідомити програмі, з якою саме платою будемо працювати. Для цього потрібно в меню «Інструменти» обрати категорію «Плата» та обрати модель плати, яка використовується.

Після підключення плати, перейдемо до завантаження коду. Arduino IDE пропонує широкий спектр готових прикладів, які допоможуть вам скомпілювати власний програмний код.

Код програми для управління сконструйованим роботом-маніпулятором можна знайти у Додатку А.

Після написання коду та його завантаження на плату Arduino, робот-маніпулятор буде готовий до роботи.

Ознайомимося детальніше з алгоритмом роботи сконструйованого робота-маніпулятора. На рисунку 3.12 представлено алгоритм роботи робота-маніпулятора у вигляді блок-схеми.

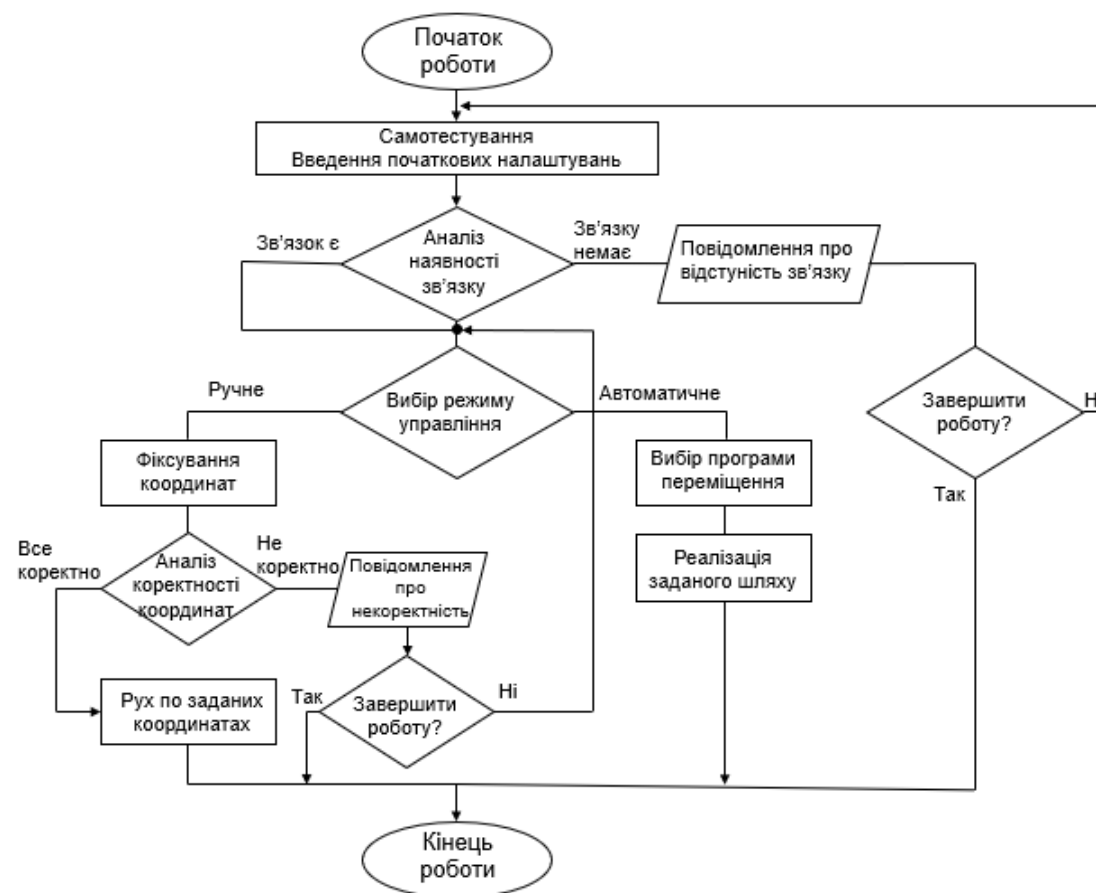


Рисунок 3.12 – Алгоритм роботи робота-маніпулятора у вигляді блок-схеми

Робота починається з активації робота та його самотестування. На цьому етапі також вводяться початкові налаштування. Після налаштування система перевіряє зв'язок з пристроєм. Якщо зв'язок встановлено, обирається режим управління. Доступні два режими: ручний та автоматичний. В автоматичному режимі активна частина маніпулятора рухається по траєкторії, заздалегідь визначеній програмним кодом. При виборі ручного управління система фіксує координати та аналізує їх правильність. Якщо координати вказано вірно, робот-маніпулятор переміщається до них. У разі помилки система повідомляє про некоректні координати. Після цього

програма може або завершити роботу, або повернутися до початкового етапу - вибору режиму управління.

Після завершення руху, програма зупиняє роботу та сповіщає про її закінчення. Детальний код управління роботом-маніпулятором можна знайти у Додатку А.

3.12 Загальний вигляд системи керування роботом – маніпулятором

Система керування роботом-маніпулятором – це комплекс програмно-апаратних засобів, які забезпечують його рух, взаємодію з навколишнім середовищем та виконання поставлених завдань. Вона складається з наступних основних компонентів (рисунок 3.13):

1. блок живлення, що забезпечує живлення всієї системи, включаючи: Arduino Uno, понижувач перетворювач, драйвери крокових двигунів та серводвигун;
2. мікроконтролерна плата Arduino Uno, що є "мозком" системи та яка обробляє дані з датчиків, генерує команди для драйверів двигунів та спілкується з користувачем;
3. понижувач перетворювач для крокових двигунів, що перетворює напругу з блоку живлення на відповідну для крокових двигунів;
4. драйвер крокового двигуна, що перетворює команди з Arduino Uno на сигнали, які керують кроковими двигунами;
5. кроковий двигун, що рухає суглоби маніпулятора відповідно до заданих команд;
6. серводвигун, що забезпечує точне та плавне управління рухом маніпулятора.

Принцип роботи.

величину "розкиду" помилки позиціонування, але й її середнє значення, що робить її більш універсальною характеристикою. Іншими словами, точність показує, якою максимальною може бути помилка позиціонування осі. Точність є однією з найважливіших характеристик робота-маніпулятора. Однак, багато виробників промислових роботів-маніпуляторів вказують лише "точність робота", не уточнюючи "фактор охоплення", тобто коефіцієнт пропорційності.

Точність є однією з найважливіших характеристик верстата і визначається комплексом факторів, серед яких ключовими є неспіввісність та неперпендикулярність напрямних осей.

Важливо розуміти різницю між параметрами точності позиціонування та похибкою позиціонування. Похибка позиціонування робочої частини робота - це відхилення її фактичного положення від того, що задано керуючою програмою.

При відомому законі руху в часі, на похибку позиціонування впливає низка факторів.

До них належать:

- люфт редуктора: він може призвести до неточної передачі зусилля, що негативно впливає на точність позиціонування;
- зміна швидкості через температурні коливання: при нагріванні або охолодженні двигуна його характеристики змінюються, що може призвести до відхилень від заданої траєкторії;
- зміна напруги живлення: нестабільність напруги живлення може призвести до збоїв у роботі двигуна, що також негативно впливає на точність позиціонування.

Важливо зазначити, що ці похибки мають випадковий характер. Тому їх точне значення визначити складно. Для оцінки їх впливу можна провести експеримент, порівнюючи реальну та задану позиції.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						77
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок точності позиціонування для робота-маніпулятора можна розділити на три основні етапи:

- 1) необхідно знайти складові розмірної ланцюга, а саме лінійні кутові розміри, відхилення які впливають на рух активної частини робота;
- 2) необхідно визначити складові параметри розмірного ланцюга;
- 3) необхідно розрахувати відхилення активної частини робота та порівняти її з максимально допустимою величиною відхилення для даної частини робота [20].

Відхилення активної частини робота-маніпулятора в системі координат розглядається як кінцева ланка в складному розмірному ланцюгу, який складається з відхилень лінійних та кутових розмірів елементів системи "робот - активна частина - деталь".

Використання теоретико-імовірнісного методу для вирішення рівняння в цьому ланцюгу дозволяє врахувати закони розподілу відхилень розмірів активної частини при роботі робота і випадковий характер складових похибок, таких як зміщення і перекося осей при підйомі важких деталей або роботі у важкодоступній зоні.

Відхилення в розмірному ланцюзі бувають двох видів:

- 1) паралельне зміщення осей - векторні помилки;
- 2) перекося осей - кутові помилки.

Кутові помилки складових ланок (перекося осей) і векторні помилки (паралельне зміщення осей) підсумовуються шляхом приведення кутових помилок до векторного виду в площині замикаючої ланки через передаточні відношення:

$$e_{\Sigma} = \frac{1}{k_{\Sigma}} \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \cdot k_i^2 \cdot e_i^2} \right) \quad (3.1)$$

де e_{Σ} – половина величини відхилення активної частини замикаючої ланки;

k_{Σ} – коефіцієнт відносної втрати замикаючої ланки;

k_i - коефіцієнт відносного розсіювання складових ланки (половина величини відхилення активної частини);

e_i – похибка складових ланки;

n – число складових ланки;

i – номер складової ланки.

Коефіцієнт відносного розсіювання замикаючої ланки визначається за формулою:

$$k_{\Sigma} = 1 + \frac{0,55}{\sum_{i=1}^n e_i} \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n k_i \cdot e_i} - \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2} \right) \quad (3.2)$$

Коефіцієнт відносної асиметрії замикаючої ланки визначається за формулою:

$$a_{\Sigma} = \frac{0,59 \cdot \sum_{i=1}^n a_i \cdot e_i}{\sum_{i=1}^n e_i} \quad (3.3)$$

де a_i – коефіцієнт відносної асиметрії кривої розподілення складових ланок. Для кожної ланки необхідно визначати характеристики розподілення k_i та a_i [21].

3.14 Висновки до третього розділу

У цьому розділі ми розглянули процес налаштування плати Arduino для взаємодії з роботом-маніпулятором та його керування. Також описано поетапний алгоритм роботи розробленої програми керування роботом. Детально розглянуто характеристики, принцип роботи та особливості основних рушійних елементів робота-маніпулятора, та методи їх програмування. Також розглянуто різні методи розрахунку точності позиціонування, та показано їхню практичну цінність.

ВИСНОВКИ

В процесі написання бакалаврської роботи була розроблена модель робота-маніпулятора, а також програмне забезпечення для управління ним. Ця модель може використовуватися для неруйнівного контролю об'єктів складної форми.

В першому розділі було проведено аналітичний огляд роботів-маніпуляторів. Було описано конструкції роботів, розглянуто механічний опис їх роботи, а також наведено схему структурної організації та схеми відтворення руху і функціональних зв'язків елементів. Зокрема, були розглянуті можливі варіації конструкції робочої зони (зони захвату) роботів-маніпуляторів та сфери їх застосування.

В другому розділі було описано процес створення робота-маніпулятора для позиціонування датчиків на виробах зі складною геометрією. Були обрані компоненти, описано їх функції та інтеграцію в загальну конструкцію.

За допомогою SolidWorks було розроблено 3D-модель, яка лягла в основу макету. Деталі надруковано на 3D-принтері та зібрано відповідно до конструкції. Було описано основні вузли та принципи їх взаємодії. Робот був готовий до програмування.

В третьому розділі було розроблено програмне забезпечення для робота-маніпулятора, а також розглянутий процес налаштування плати Arduino для взаємодії з роботом та його керування. Було описано поетапний алгоритм роботи розробленої програми керування роботом-маніпулятором. Детально розглянули характеристики, принцип роботи та особливості основних рушійних елементів робота, та методи їх програмування. Зокрема,

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						80
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

проаналізувано та висвітлено різні методи розрахунку точності позиціонування, показано їхню практичну цінність.

Запропонований пристрій, а саме робот маніпулятор має велике значення у розвитку приладобудування, адже він може створювати більш якісні та надійні вироби.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						81
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лобанов Л. М. Застосування сучасних інформаційних технологій для вирішення завдань автоматизації технологічних процесів//Л. М. Лобанов, Є. М. Шаповалов, В. А. Коляда. // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2014. – №4. – С. 52–56.
2. CUSTOMIZE YOUR UR ROBOT WITH CUTTING-EDGE PRODUCTS [Електронний ресурс] // 1. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.universal-robots.com/plus/>.
3. Промислові роботи FANUC [Електронний ресурс] // 1. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/uqbjj>.
4. KR QUANTEC PA [Електронний ресурс] // 1. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/uqbkb>.
5. ABB's 6 axis robot – for flexible and compact production [Електронний ресурс] // 1. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/uqbkf>.
6. UR3 Technical specifications. // 1. – 2018. – №110103. – С. 1.
7. KR QUANTEC PA With HO and arctic Variants Specification. // 1. – 2018. – С. 141.
8. Technical data for the IRB 120 industrial robot [Електронний ресурс] // 1. – 2018. - Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/uqbln>.
9. Technical Data GRIPKIT [Електронний ресурс] // 1. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.weiss-robotics.com/gripkit/en/>.
10. Nanshu Lu. Flexible and Stretchable Electronics Paving the Way for Soft Robotics / Nanshu Lu, Dae-Hyeong Kim. // 1. – 2013. – С. 51.
11. Роботи – маніпулятори, що використовуються у зварювальному виробництві, їх технологічні можливості та сфера застосування. [Електронний ресурс] // 1. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/uqbmb>.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		82

12. Булгаков А. Г. Промислові роботи: Кінематика, динаміка, контроль та управління / А. Г. Булгаков, В. А. Воробйов: Солон-Прес, 2007. - 489 с. - (1).

13. Призначення виконавчих двигунів і вимоги, які до них пред'являються [Електронний ресурс] // 1. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/uqnkp>

14. Servo library [Електронний ресурс] // 1. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.arduino.cc/en/Reference/Servo>.

15. DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection, 2018. – (5). – (4988-DS; вип. 5).

16. Скарпіно М. Двигуни для моделістів. Посібник з крокових двигунів, сервоприводів та інших типів електродвигунів / Мэттью Скарпіно: Вільямс, 2016. – 432 с. – (1).

17. Сервоприводи в пакувальному обладнанні [Електронний ресурс] // 1. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/uqbrh>.

18. Використання сервоприводів при автоматизації обладнання [Електронний ресурс] // 1. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/uqcic>.

19. Точність і динаміка сервоприводів [Електронний ресурс] // 1. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/uqcik>.

20. Servo Library [Електронний ресурс] // 1. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/uqcin>.

21. Arduino Servo Attach [Електронний ресурс] // 1. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.arduino.cc/en/Reference/ServoAttach>.

ДОДАТКИ

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						84
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		