

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Пояснювальна записка**

Другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

«Моделювання пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора»  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи ІТМРТМ-20-1

Чуб О. В.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 172 Телекомунікації та  
Радіотехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інтелектуальні технології  
мікросистемної радіоелектронної техніки  
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Новоселов С.П.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАМ

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Невлюдов І. Ш.  
(прізвище, ініціали)

2021 р.

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
Тип програми Освітньо-професійна  
Освітня програма Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
Зав. кафедри КІТАМ

\_\_\_\_\_ (підпис)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_ р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Чубу Олександру Володимировичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора

Затверджена наказом по університету від 08.11.2021 № 1696 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10.12.2021 р.

3. Вихідні дані до роботи: габаритні розміри пристрою – не більше 150 мм x 150 мм x 80 мм; вага – не більше 0,3 кг; напруга живлення – 5 В; максимальне навантаження – 500 г.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

4.1 Аналіз технічного завдання \_\_\_\_\_

4.2 Теоретичне обґрунтування конструкції пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора \_\_\_\_\_

4.3 Моделювання вузлу стикування інструменту з маніпулятором \_\_\_\_\_

4.4 Виготовлення експериментального зразка пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора \_\_\_\_\_

4.5 Висновки \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt) – 23 с. формату А4

## 6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	доц. Сичова О.В.		

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	08.09.2021	виконав
2	Аналіз завдання	09.09.2021	виконав
3	Огляд літератури за темою роботи	10.09.2021	виконав
4	Аналіз предметної області	20.09.2021	виконав
5	Проведення розрахунків	01.10.2021	виконав
6	Створення ескізу	15.10.2021	виконав
7	Створення 3D-моделі макету	01.11.2021	виконав
8	Друк моделі та її аналіз	16.11.2021	виконав
9	Оформлення атестаційної роботи	20.11.2021	виконав
10	Перевірка роботи керівником	25.11.2021	виконав
11	Нормоконтроль	01.12.2021	виконав
12	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichек	05.12.2021	виконав
13	Подання роботи на рецензію	08.12.2021	виконав
14	Подання роботи на підпис зав. кафедрою	10.12.2021	виконав
15	Подання роботи в ЕК	14.12.2021	виконав

Дата видачі завдання 08.09.2021

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Чуб О.В.  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

проф. Новоселов С.П.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 70 с., 7 табл., 43 рис., 2 дод., 9 джерел.

### МАНІПУЛЯТОР, ПРОМИСЛОВИЙ РОБОТ, ЗАХВАТНИЙ ПРИСТРІЙ, ІНСТРУМЕНТ МАНІПУЛЯТОРА, ХВОСТОВИК ІНСТРУМЕНТА

Об'єкт дослідження – маніпулятор промислового робота.

Предмет дослідження – пристрій для швидкої заміни інструменту маніпулятора промислового робота.

Мета дослідження – розробка пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора.

Завдання дослідження – проаналізувати вимоги технічного завдання та розглянути види інструменту, що використовується промисловими роботами; охарактеризувати будову кріплень інструменту до маніпулятора промислового робота та визначити конструктивні особливості місць кріплення змінних інструментів; дослідити конструкції пристроїв для швидкої заміни інструменту маніпулятора; змодельовати вузол стикування інструменту з маніпулятором; виготовити експериментальний зразок пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора.

В роботі проведено аналіз завдання та існуючих аналогічних функціональних рішень, основних вимог та обмежень на розробку пристрою, проаналізовано основні проблеми вибору хвостовика інструмента та розроблено альтернативну модель хвостовика та його кріплення до корпусу маніпулятора.

За результатами роботи опубліковано тези доповіді у збірнику міжнародної конференції Виробництво & мехатронні системи 2021 [1].

## **ABSTRACT**

Explanatory note: 70 pages, 7 tables, 43 drawings, 2 applications, 9 sources.

**MANIPULATOR, INDUSTRIAL WORK, CUTTING DEVICE,  
MANIPULATOR TOOL, TOOL SHAFT**

Object of study – industrial robot manipulator.

Subject of study – device for quick replacement of industrial robot manipulator tool.

The aim of the study – development of a device for quick replacement of the manipulator tool.

The task of the research is to analyze the requirements of the technical task and to consider the types of tools used in industrial works; to characterize the structure of fastenings of the tool to the manipulator of industrial robot and to define design features of places of fastening of replaceable tools; to investigate the theoretical substantiation of the design of the device for quick replacement of the manipulator tool; to model the joint of the tool with the manipulator; make an experimental sample of the device for quick replacement of the manipulator tool.

The analysis of the task and existing similar functional solutions, basic requirements and limitations for device development are analyzed, the main problems of tool shank selection are analyzed and an alternative model of shank and its attachment to the manipulator body was developed.

Based on the results of the work, the abstracts of the report were published in the proceedings of the international conference Production & Mechatronic Systems 2021.

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Аналіз технічного завдання.....	10
1.1 Аналіз вимог технічного завдання.....	10
1.2 Аналіз типів інструментів, що використовуються промисловими роботам..	11
1.3 Аналіз будови кріплень інструменту до маніпулятор промислового робота.....	13
1.4 Конструктивні особливості місць кріплення змінних інструментів.....	15
1.5 Постановка задачі.....	21
2 Теоретичне обґрунтування конструкції пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора.....	23
2.1 Вибір типу хвостовика інструменту.....	23
2.2 Визначення базових поверхонь для встановлення інструменту.....	28
2.3 Розрахунок надійності вузлів стикування інструменту з маніпулятором....	35
2.4 Розробка конструкції пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора промислового робота.....	40
2.5 Висновки до розділу 2.....	48
3 Моделювання вузлу стикування інструменту з маніпулятором.....	49
3.1 Вибір програмного середовища для моделювання.....	49
3.2 Розробка 3D-моделі хвостовика інструменту.....	49
3.3 Розробка 3D-моделі пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора.....	52
3.4 Висновки до 3 розділу.....	60
4 Виготовлення експериментального зразка пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора.....	61
4.1 Вибір матеріалу і обладнання для виготовлення експериментального зразка пристрою.....	61
4.2 Аналіз масо-габаритних характеристик отриманого зразка.....	62

4.3 Порівняння отриманих експериментальних результатів з теоретичними розрахунками.....	62
4.4 Висновки до 4 розділу.....	67
Висновки.....	68
Перелік джерел посилання.....	69
Додаток А.....	71

## ВСТУП

Маніпуляційні роботи (МР) дозволяють підвищити продуктивність технологічних процесів, усунути присутність людей на небезпечних ділянках, проводити операції в агресивних середовищах. Важливим компонентом МР є сам маніпулятор – пристрій для виконання рухових функцій, аналогічних функціям руки людини при переміщенні об'єктів в просторі, оснащене робочим органом.

Серед проблем, які виникають при впровадженні роботів у виробництво, найбільш актуальною проблемою є створення робочого органу, який буде вирішувати поставлені перед ним задачі. Яким би не був промисловий робот (ПР) і якби не рухався його маніпулятор, без відповідного робочого органу робот не дасть жодної користі на виробництві.

Останнім часом активно ведуться розробки захватних пристроїв (ЗП), здатних захоплювати і базувати неорієнтовано розташовані об'єкти, але це все-одно не дозволяє швидко змінювати інструмент. Тому систематизація та аналіз конструкцій захватних інструментів, розробка методів їх вибору, розрахунку та проектування, встановлення вимог до них в залежності від характеру виконуваних операцій і рекомендацій щодо застосування мають дуже важливе значення.

Пристрої для швидкої заміни інструменту маніпуляторів служать для швидкої та точної заміни різних інструментів з корпусом маніпулятора. Ці об'єкти можуть мати різні розміри, форму, масу і володіти різноманітними фізичними властивостями, що потребує застосування пристроїв різного характеру. Тому такі пристрої відносяться до числа змінних елементів промислових роботів. Як правило, МР комплектують набором типових для даної моделі пристроїв для заміни інструментів, які можна змінювати в залежності від вимог конкретного робочого завдання.

Однак, незважаючи на широкий спектр досліджень в цій галузі, все ще залишаються не вирішеними в повному обсязі питання, пов'язані з розробкою способів та алгоритмів моделювання пристроїв для швидкої заміни інструменту МР. Недостатньо чітко описані задачі створення моделей для швидкої заміни інструменту МР, а також особливості їх впровадження.

Виходячи з вищенаведеного, розробка пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора є актуальним завданням.

Метою роботи є розробка пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора.

Областю застосування пристрою для швидкої заміни інструмента маніпулятора є агресивне середовище для роботи в яких важлива швидкість або немає можливості заміни пристрою оператором.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз сучасного стану питання та сучасних технологічних рішень;
- провести аналіз конструктивних особливостей аналогів для виявлення особливостей та уточнення вимог на розробку пристрою;
- провести попередні розрахунки конструкції;
- розробити ескіз власного пристрою;
- розробити 3D модель згідно ескізу та роздрукувати її;
- оформити пояснювальну записку згідно з рекомендаціями [2], вимогами, ДСТУ 3008:2015 [3] та методичними вказівками [4].

## 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

### 1.1 Аналіз вимог технічного завдання

При різному застосуванні маніпулятора зазвичай одного захватного пристрою (ЗП) недостатньо, тому необхідно передбачати можливість заміни його повністю або складових частин захоплення [5].

Основною вимогою для підвищення мульти-функціональності маніпулятора – є заміна робочого органу (інструменту).

Існують різні види встановлення та закріплення ЗП та інструментів до руки маніпулятора. Вони можуть бути жорсткими або пружними (рухливими). При жорсткому встановленні та закріпленні не допускаються відносні переміщення ЗП чи інструменту щодо руки маніпулятора на всіх етапах роботи. Відносно пружного виду встановлення допускаються малі відносні переміщення на всіх або деяких етапах залежно від діючих сил чи спеціальних сигналів (команд).

Жорстка установка та закріплення ЗП та інструментів до руки маніпулятора відносяться виключно до типу нерухомих роз'ємних з'єднань (ГОСТ 23887-79) і до класу IV роз'ємних з'єднань, що здійснюються різними кріпильними та фіксуючими деталями (гвинтами, болтами, шпильками та шпильками, циліндр і т. д.). Найчастіше вимогу жорсткості висувають при встановленні на руці маніпулятора обробних інструментів (свердлів, розгорток, різьбонарізних головок, фрез та і т.д.), а також при маніпулюванні важкими (понад 100 кг) і великогабаритними об'єктами [6].

У всіх випадках основною є вимога надійного закріплення, що виключає появу люфту. Додатковою, але важливою в нашому випадку є вимога простоти складання та розбирання з'єднання за для збереження можливості швидкої заміни інструменту, яке впливає з необхідності оперативної заміни робочого органу. Внаслідок цього потрібно, щоб розбирання та складання могли

проводитися без застосування спеціального інструменту і тим більше без засобів контролю [6].

В роботі необхідно розробити пристрій для швидкої заміни інструменту маніпулятора, не потребуючого додаткового підналагодження з метою більш точного узгодження інструменту з обладнанням.

## 1.2 Аналіз типів інструментів, що використовуються промисловими роботами

Робот-маніпулятор призначений для виконання механічних операцій в своєму робочому просторі і є багатоланковим просторовим механізмом з розімкненим кінематичним ланцюгом, ланки якої послідовно з'єднані між собою зчленуваннями різного типу (обертальні або поступальні), оснащений приводами і робочим органом.

Робочі органи маніпулятора поділяються на:

- захватні пристрої;
- технологічні робочі органи.

Захватні пристрої в свою чергу поділяються на:

- зажимні (ЗП утримує об'єкт завдяки кінематичному впливу робочих елементів, наприклад, губок, пальців, кліщів і т.д. за допомогою сили тертя);
- притяжні (ЗП забезпечує силову дію на об'єкт завдяки використанню різних фізичних принципів: вакуумних та магнітних).

Об'єкти можуть мати різні розміри, форму, масу, матеріал і мати різні фізичні властивості. До ЗП висуваються вимоги спільного і спеціального характеру, пов'язані з конкретними умовами роботи. Обов'язкові вимоги: надійність захвату і утримання об'єкту; стабільність базування; недопустимість пошкодження або руйнування об'єктів захвату. Саме через це до ЗП ПР, працюючих в різних умовах, пред'являються додаткові вимоги: багатодіапазонність (можливість захвата і базування предметів в широкому

діапазоні їх мас, розмірів і форми); забезпечення захвату близько розташованих деталей; легкість і швидкість заміни.

Щодо технологічних робочих органів, то це інструменти призначені для виконання певних технологічних процесів. До них відносяться, наприклад, кліщі для контактної точкового зварювання, пальник для дугового зварювання плавленням, металодетектор тощо [6].

Робочі органи промислового робота (ПР) в залежності від їх призначення можуть оснащуватись додатковими пристроями для виконання орієнтовних переміщень і деяких технологічних операцій.

ЗП по числу робочих позицій діляться на однопозиційні і багатопозиційні, а по характеру управління – на наступні чотири групи.

Некеровані ЗП з постійними магнітами або вакуумними присосками без примусового розрядження. В такому ЗП для зняття об'єкта потребується докласти більше зусиль, ніж для його утримання.

Команді ЗП керуються тільки по командам на захват чи відпущення об'єкта. До них відносяться пристрої з пружинним приводом, які оснащуються стопорним механізмом, який працює через такт.

Жорстко програмовані ЗП керуються системою числового програмного управління ПР. Переміщення губок, взаємне розташування робочих елементів і сила зажима в таких пристроях змінюється в залежності від заданої програми, завдяки якій може здійснюватися також управління роботою допоміжних технологічних пристроїв.

Адаптивні ЗП – програмовані пристрої, оснащені різними датчиками зовнішньої інформації (форми об'єкту, стан поверхні, маси об'єкта, сили зажиму тощо [7]).

В даний час створено і знаходиться в експлуатації велика кількість різних робочих органів ПР. Різноманіття їх моделей та конструкцій визначається двома основними обставинами:

– велика кількість типорозмірних об'єктів, якими повинен маніпулювати робот;

- різні фізичні принципи дії робочих органів.

### 1.3 Аналіз будови кріплень інструменту до маніпулятора промислового робота

В механічних ЗП для кріплення використовують різні технічні рішення. За характером кріплення до руки промислового робота всі захватні пристрої можна поділити на чотири групи: незмінні – є невід’ємною частиною конструкції робота, заміна яких не передбачена; змінні – самостійні вузли з базовими поверхнями для кріплення до руки робота (кріплення таких пристроїв, наприклад фланцеве за допомогою болтів, не передбачає їх швидкої заміни); швидкозмінні, а в загальному виді – робочі органи кріпляться за допомогою спеціальних механізмів, як наприклад, байонетний замок, і можуть швидко замінюватись; автоматично змінні – оснащуються механізмами, які дозволяють виконати їх автоматичну заміну.

Жорстка установка та закріплення ЗП та інструментів до руки маніпулятора відносяться виключно до типу нерухомих роз’ємних з’єднань (ГОСТ 23887-79) і до класу IV роз’ємних з’єднань, що здійснюються різними кріпильними та фіксуючими деталями (гвинтами, болтами, шпильками і т.д.). Найчастіше вимогу жорсткості висувають при встановленні на руці маніпулятора обробних інструментів (свердлів, розгортки, різьбонарізних головок, фрез), а також при маніпулюванні важкими (понад 100 кг) і великогабаритними об’єктами. Основною є вимога надійного закріплення, що виключає самовідгвинчування, появу люфту.

Змінним є робочий орган цілком (якщо ЗП, то разом із приводом – рис. 1.1, а). При цьому з’являється можливість вводити в комплект захвати, що мають різні енергетичні характеристики і значення ходу вихідної ланки приводу, включати набір ЗП, що використовують інші принципи дії (електромагнітні, вакуумні). Якщо ПР використовується як виробничий, то передбачається зміна робочих органів, що виконують основну технологічну

операцію, наприклад зварювальні кліщі. Основним недоліком цього способу заміни ЗП є громіздкість конструкції, що замінюється

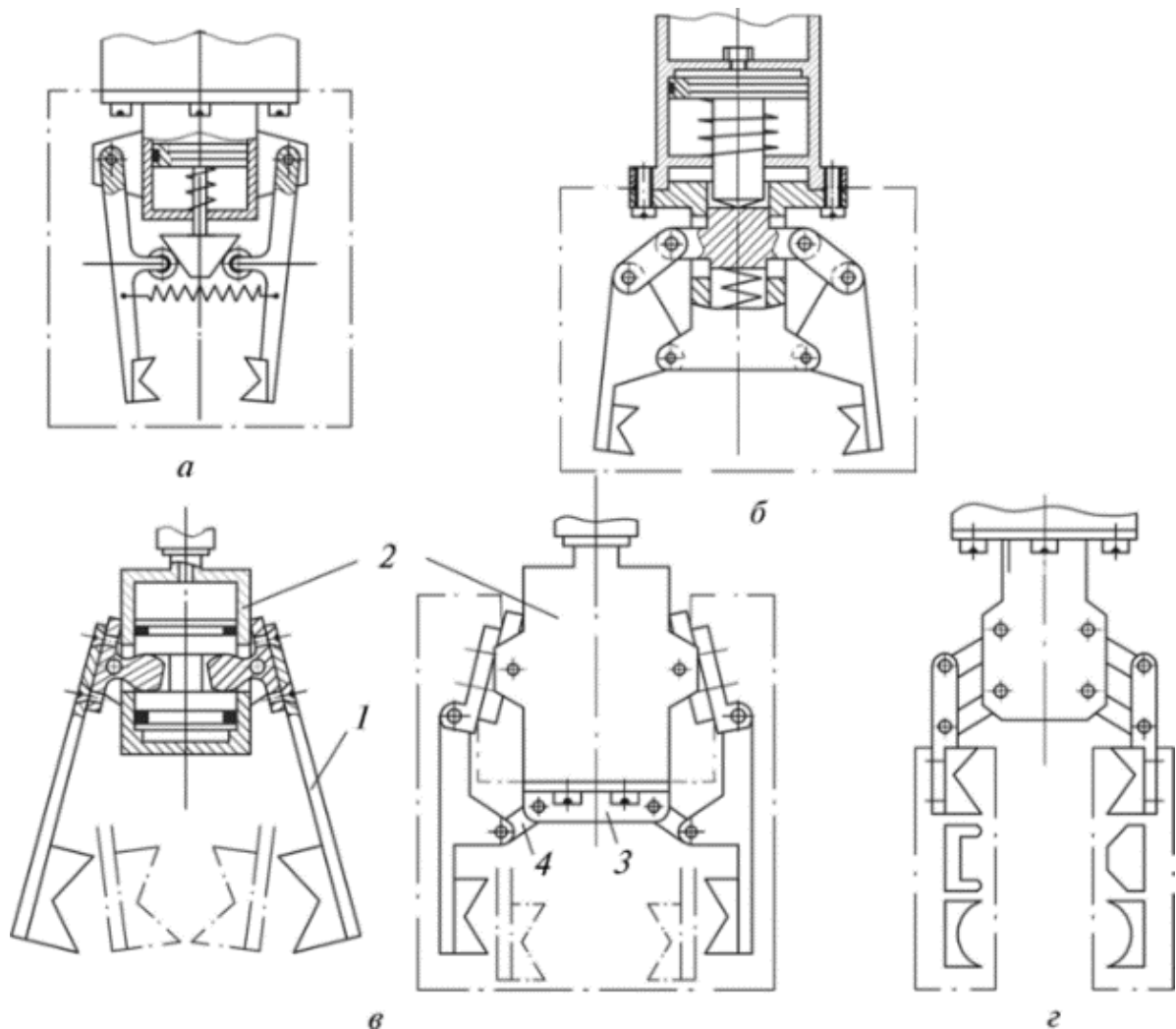


Рисунок 1.1 – Загальний вид змінних захватів

Змінними є механізми передачі та перетворення руху захвата (рис. 1.1, б), а двигун (зазвичай пневмоциліндр) залишається незмінним. При цьому принцип дії захвата зберігається, природно, тим самим, але при цьому можна вибором механізму передачі руху задавати різні напрямки переміщень робочих елементів, збільшувати діапазон їх розкриття за рахунок зменшення зусилля захоплення і навпаки. При зміні захвата не виникають труднощі, пов'язані зі стикуванням силових магістралей, і, отже, не знижується надійність з'єднань та ущільнень.

Змінними є ланки механізму передачі та перетворення руху ЗП. На рис. 1.1 в, показано, як заміною важелів / іншими, що здійснюють коливальний рух (малюнок ліворуч), і установкою кришки 3 з сережками 4 на корпусі 2 захвата (малюнок праворуч) можна змінити його кінематику і забезпечити плоскопаралельне переміщення робочих елементів.

Змінними є робочі елементи механізму передачі та перетворення руху (рис. 1.1, г). При цьому забезпечується пристосованість ЗП до форми поверхні об'єкта, за яку проводиться захоплення, у певних межах можна зміщувати діапазон розкриття захвата.

Перші дві групи потребують втручання оператора для заміни інструменту, тому розглянемо швидкозмінні та автоматично змінні.

На цей час розроблено чимало швидкозмінних інструментів, вузли кріплення яких дозволяють їх з'єднувати з рукою маніпулятора найпростішими рухами та часто без застосування спеціального інструменту. При конструюванні стикувальних вузлів широко використовується накопичений досвід у суміжних областях машино- та приладобудування. Вручну можуть виконуватися всі операції зняття непотрібного, встановлення та закріплення необхідного ЗП або лише деякі зі складових частин. В останньому випадку при автоматизованій заміні інструменту процес з'єднання може виконуватися в режимі ручного управління з основного або виносного пульта. Такий спосіб є найкращим з точки зору найменшого втручання оператора.

#### 1.4 Конструктивні особливості місць кріплення змінних інструментів

При створенні ПР із автоматичною заміною інструменту найбільші складнощі викликає проектування простих та надійних вузлів їх стикування з рукою маніпулятора.

Під час проектування вузлів стикування ЗП з пензлем маніпулятора в першу чергу повинні вирішуватись три питання: завдання баз для змінних захвата, забезпечення легкої установки ЗП на бази та надійне закріплення їх

при базуванні. Основні схеми базування ЗП представлені на рис. 1.2. Базуючими можуть бути такі поєднання поверхонь: площину та поверхні двох штифтів, площину та поверхні виступу, конус та поверхні поздовжнього виступу, поверхні призми. Зауважимо, що оскільки зусилля, що діють на ЗП, відносно невеликі, можна використовувати базування по малих ділянках поверхонь або лініях. Важливою є вимога, щоб установка на бази здійснювалася простим рухом (бажано, прямолінійним) та утримання змінної частини у стані базування здійснювалося з необхідною силою, яка прикладена в тому ж напрямку. Всі описані схеми задовольняють цю вимогу.

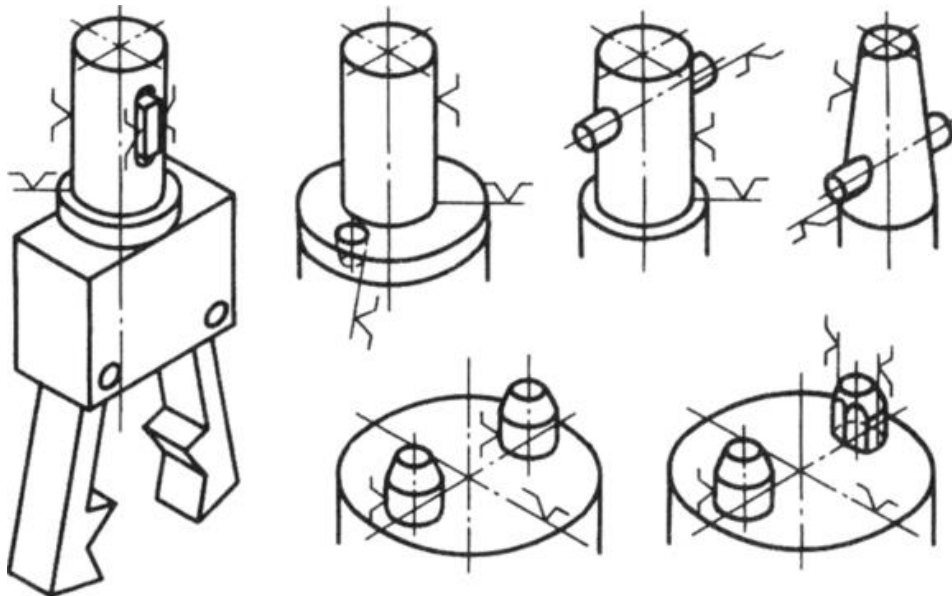


Рисунок 1.2 – Основні схеми базування інструменту

Забезпечення правильної установки ЗП на бази у процесі програмного зближення руки маніпулятора зі схопленням при з'єднанні можна розглядати як окремий випадок завдання автоматичного складання. Поєднання має відбутися за наявності узгодження в положенні та взаємній орієнтації хвостовика захвата і частини у відповідь на руці маніпулятора, при цьому необхідно виключити заїдання і заклинювання ланок. Для цього потрібно обґрунтовано вибирати зазори у взаємопов'язаних парах, наприклад, вал-втулка, повинні бути передбачені західні фаски та скоси на поверхнях, якими відбувається ковзання,

забезпечена низька шорсткість поверхонь. З'єднання захвата з рукою маніпулятора має бути таким, щоб його можна було легко розібрати та від'єднати, тому деякі традиційні види з'єднань не задовольняють цю вимогу. Так, з'єднання деталей за допомогою конуса Морзе забезпечує точне і надійне їхнє фіксування із заклинюванням, проте від'єднання вимагає великих зусиль, наприклад, шляхом удару. Але для його виконання потрібне суттєве ускладнення конструкції з'єднання.

Самостійною та найскладнішою є завдання закріплення ЗП (утримання, фіксації), з'єданого з рукою ПР, при базуванні. Пристрій, що забезпечує утримуючу силу при базуванні за функціональним призначенням, є вузько спеціалізованим пристосуванням, призначеним для захоплення та утримання хвостовика ЗП. Як і для основного ЗП, утримуюче зусилля може створюватися різними засобами та на основі різних фізичних принципів: за допомогою пружних елементів, самостійними приводами (пневматичними, гідравлічними або електричними), магнітами або електромагнітами, вакуумними камерами, а також різними поєднаннями. Розглянемо якісні особливості перерахованих варіантів та проілюструємо ці особливості на конкретних прикладах.

При використанні пружних елементів, наприклад пружин, зусилля створюється за рахунок їх стиснення або розтягування при роботі приводів ПР, коли хвостовик захвата, що знаходиться в гнізді, взаємодіє з відповідною частиною, що переміщається. Приклад наведено на рис. 1.3.

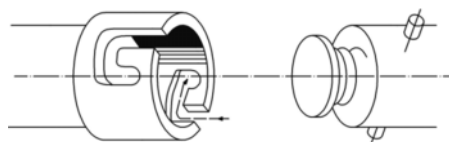


Рисунок. 1.3. Схема байонетного з'єднання деталей

Фіксація хвостовика захвата відбувається у фігурному пазі, вирізаному пензлем маніпулятора. Рух виступу на хвостовику змінного захвата зображено штриховою лінією зі стрілками. На першому етапі переміщення стискається пружина, яка здійснює фіксацію у кінцевому положенні. Закріплення та

звільнення здійснюються за відносно невеликих зусиль (моментів), які розвиваються двигунами основних приводів маніпулятора. Регулювання зусиль може відбуватись попереднім підтисканням пружини. Характерним для використання пружин як джерело зусиль є необхідність виконання складних, багатоступінчастих рухів. У разі необхідно подвійне переміщення: спочатку висунування руки вперед до упору, та був поворот навколо поздовжньої її осі. З'єднання за допомогою описаного пристрою виявляється надійним, якщо під час маніпулювання об'єкта поздовжня складова сили інерції, що діє на схоплення разом з предметом, менше сили стиснення пружини в положенні його фіксації. Це характерно для ПР з малопотужними двигунами (насамперед для маніпуляторів з електроприводом) та плавним гальмуванням об'єкта в точці позиціонування. Працюючи ПР з пневмоприводами і позиційною системою управління виникають великі навантаження, завдяки яким можливе мимовільне звільнення захвата.

Для швидкороз'ємних з'єднань як фіксуючі елементи часто застосовуються різні засувки. Клинові засувки при дії поздовжніх сил забезпечують підтискання хвостовика захвату до частини у відповідь, оскільки напрям переміщення засувки вибирається завжди перпендикулярним до основного відносного переміщення. Поздовжні переміщення засувок і необхідні зусилля підтискання можуть бути забезпечені за допомогою пружин або спеціальних керованих силових елементів, наприклад, малопотужних пневмоциліндрів, мембранних приводів або електромагнітів. Силкові елементи можуть бути розташовані на руці маніпулятора, на змінному захваті або на пристрої, в якому відбувається зміна захвата. Можливі конструкції, в яких засувка спрацьовує від переміщення або повороту руки маніпулятора. Найбільш зручними в експлуатації є пристрої, в яких засувка перемикається то в одне, то в інше положення при послідовних натисканнях маніпулятора руки на захват.

Існують також конструкції змінних захватів, утримування яких здійснюється за допомогою електромагніта або вакуумної камери. Утримуюча

здатність таких вузлів обмежена, але може бути достатньою, особливо якщо вжити заходів для полегшення захвату і збільшення поверхні стикувань.

В даний час найбільшого поширення набули змінні захвати з самостійними приводами, найчастіше з пневматичними. Деякі варіанти зміни ЗП зображені на рис. 1.4.

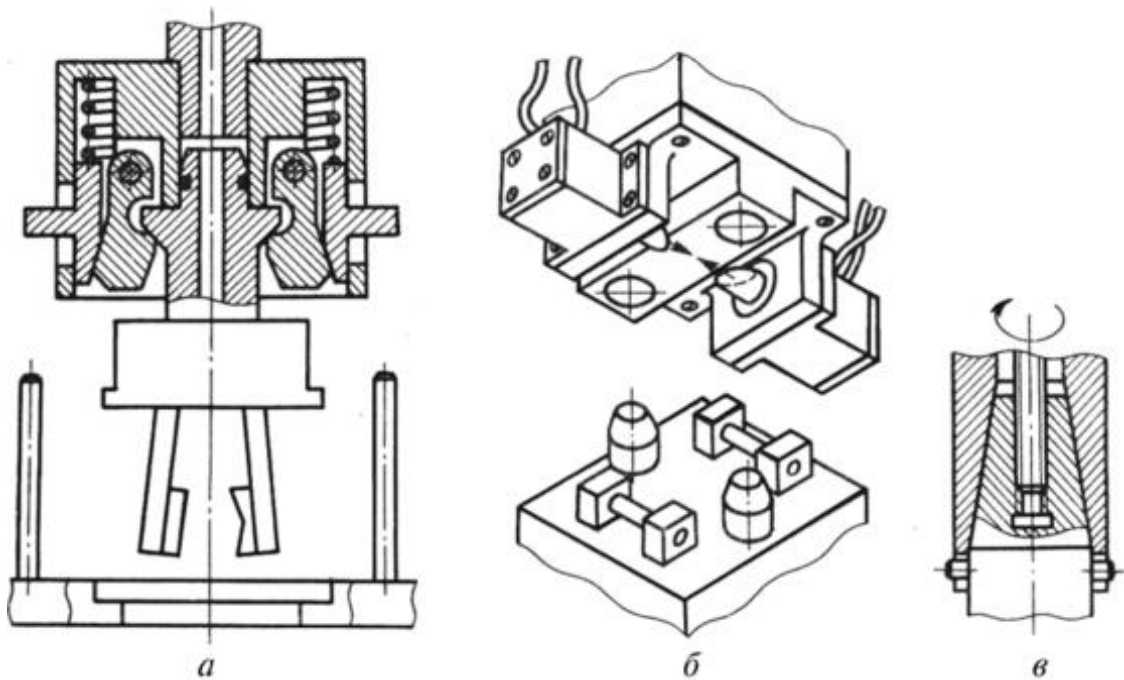


Рисунок 1.4 – Варіанти заміни ЗП

Найчастіше хвостовик змінного захвата підтягується до руки і притискається до базової площини поздовжньою силою, що створюється приводом. Притиски, якими передається сила притиску, можуть бути розташовані як зовні, так і всередині (рис. 1.4, а, б). Підтягування та притискання до базової поверхні можуть здійснюватися за допомогою гвинта, що обертається поворотним двигуном (рис. 1.4, в) або від пневмоциліндра через спеціальну передачу (рис. 1.4, а). Поздовжня сила може створюватися клинковою передачею, вісь пневмоциліндра в цьому випадку перпендикулярна до поздовжньої осі руки маніпулятора (рис. 1.4 б). Використання вузлів змінних захватів із самостійними приводами дозволяє отримувати практично будь-які необхідні значення утримуючих сил, але при цьому збільшується маса,

ускладнюються конструкція та система управління. Іноді передбачається поєднання приводу захвата з приводом вузла кріплення (наприклад, за рахунок того, що в різних діапазонах ходу поршня той самий пневмоциліндр виконує різні функції).

Самостійним завданням є стикування трубопроводів та кабелів. З'єднання трубопроводів необхідно тоді, коли змінним є захоплення разом з пневмоциліндром або вакуумний захватний пристрій. Штекерні роз'єми необхідні для електричних каналів зв'язку датчиків відчуття з пристроєм управління. Для вузлів стикування трубопроводів необхідні ущільнення, які б не перешкоджали стикуванню і допускали багаторазове з'єднання.

Автоматизація складальних операцій, крім похибок взаємного розташування ЗП, ПР і оснащення, може утруднюватися наявністю малих зазорів між деталями, що сполучаються, коли потрібно проводити особливо точні рухи. Похибки виникають із різних причин. Основні із них:

- і випадкові помилки у визначенні точних розмірів деталей, що збираються (наявність допусків на розміри, несуттєві для виду та властивостей кінцевої конструкції);
- випадкові помилки у визначенні початкових положень деталей, що збираються (похибки виконавчого пристрою, що утримує первинний об'єкт) і маніпулятора, що подає вторинні об'єкти до місця складання;
- похибки у позиціонуванні робота (систематичні помилки, недостатня роздільна здатність, заїдання під дією зовнішніх збурень, вібрації).

Похибки взаємного розташування, як зазначалося, компенсують двома принципово різними способами:

- активний спосіб – із застосуванням датчиків, що вимірюють зусилля та моменти, що виникають при поєднанні деталей, і видають команди на додаткові переміщення виконавчих вузлів та захватного пристрою робота;
- пасивний спосіб – із застосуванням кінематичних елементів та пристроїв, які встановлюються зазвичай безпосередньо на складальному

захватному пристрої або інструменті. Ці елементи забезпечують автопошук поверхонь, що сполучаються [8].

Для автопошуку на деталях, що сполучаються, необхідно мати відповідні допоміжні поверхні: фаски, скоси.

Перший спосіб більш універсальний, проте потрібне оснащення складального обладнання широким набором засобів адаптації. Другий спосіб менш універсальний, але потрібні менші витрати часу на виконання складальної операції, а сенсорне оснащення обмежується пристроями пошуку деталі та контролю її наявності на складальній позиції.

Під час складання сили реакції, що виникають при контакті первинного (базового) і вторинного (об'єктів, що вставляються), впливають на всі елементи кінематичного ланцюга маніпулятора, розташовані до вторинного об'єкта. При цьому залежно від розміщення сенсорних елементів можливі три типи технічних рішень [9].

Отже, на стикувальних вузлах змінних захватних пристроїв та кисті маніпулятора доцільно встановлювати контактні чи безконтактні датчики контролю виконання операцій приєднання чи роз'єднання [5].

### 1.5 Постанова задачі

Метою є розробка та практична реалізація пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора.

Відповідно до поставленої мети потрібно вирішити такі задачі:

- розглянути типи хвостовика інструменту, що використовується промисловими роботами;
- охарактеризувати будову кріплень інструменту до маніпулятора промислового робота та визначити конструктивні особливості місць кріплення змінних інструментів;
- дослідити теоретичне обґрунтування конструкції пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора;

- змоделювати вузол стикування інструменту з маніпулятором;
- виготовити експериментальний зразок пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора.

## 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ШВИДКОЇ ЗАМІНИ ІНСТРУМЕНТУ МАНІПУЛЯТОРА

### 2.1 Вибір типу хвостовика інструменту

В якості хвостовика може виступати направляючий штифт, основна ціль якого є правильна орієнтація інструмента до різьбових отворів маніпулятора які в подальшому фіксуються болтом. Даний вид фіксації потребує втручання оператора або дуже складної системи загвинчування болта, тому цей варіант не є доцільним для швидкої та автоматичної заміни інструменту маніпулятора.

У варіанті використання кріплення з використанням байонетного замка фіксування хвостовика змінного інструмента відбувається у фігурному пазі, вирізаному у корпусі. Рух виступу на хвостовику змінного ЗП зображено штриховою лінією зі стрілками на рис. 1.3. На першому етапі руху підтискається пружина, вона здійснює фіксування в кінцевому положенні.

Закріплення та звільнення здійснюються за відносно невеликих зусиль (моментів), що розвиваються двигунами основних приводів ПР.

Регулювання зусиль може здійснюватися попереднім підтисканням пружин. Характерним для використання пружин як джерело зусиль є необхідність виконання складних, багатоетапних рухів. У разі необхідності можливий подвійний рух: спочатку висування руки вперед до упору та обертання навколо поздовжньої осі руки.

З'єднання за допомогою описаного пристрою виявляється досить надійним, якщо на всіх етапах перенесення предмета поздовжня складова сили інерції, що діє на ЗУ разом з предметом, менше сили підібгана пружини в положенні фіксування ЗУ.

Даний метод є доволі складним в реалізації через нагромадження конструкції штифта, що вимагає високої надійності елементів кріплення, бо в випадку несправності або відсутності одного з вузлів утримання кріплення

буде ненадійним; в разі поломки пружини унеможлиблюється затискання штифта в замкнутому положенні байонетного замка через відсутність сили розтискання; у разі наявності декількох штифтів не має можливості повернути конструкцію інструмента або вимагає додаткових ускладнень конструкції, а саме можливості руху штифта інструмента незалежно від самого інструменту, що приводить до підвищення вартості.

Нижче розглянемо пристрій податливості з віддаленим центром коригування (ППВЦ або – Remote Compliance Center – RCC).

Це пасивний пристрій призначений для спрощення складання. Принцип дії цього пристрою, запатентованого США 1979 р. Дж.Л. Невінсом та Д. Є. Уїтні, заснований на геометричних властивостях шарнірного чотирикутника, узагальнених у разі тривимірного простору (рис. 2.1):

- конструкція із трьох паралельних стрижнів дозволяє здійснювати поступальне переміщення (просторова аналогія шарнірного паралелограма);
- конструкція з трьох стрижнів з осями, що перетинаються, дозволяє отримати подобу сферичного шарніра, забезпечуючи влаштування податливості з віддаленим центром коригування (ППВЦ)

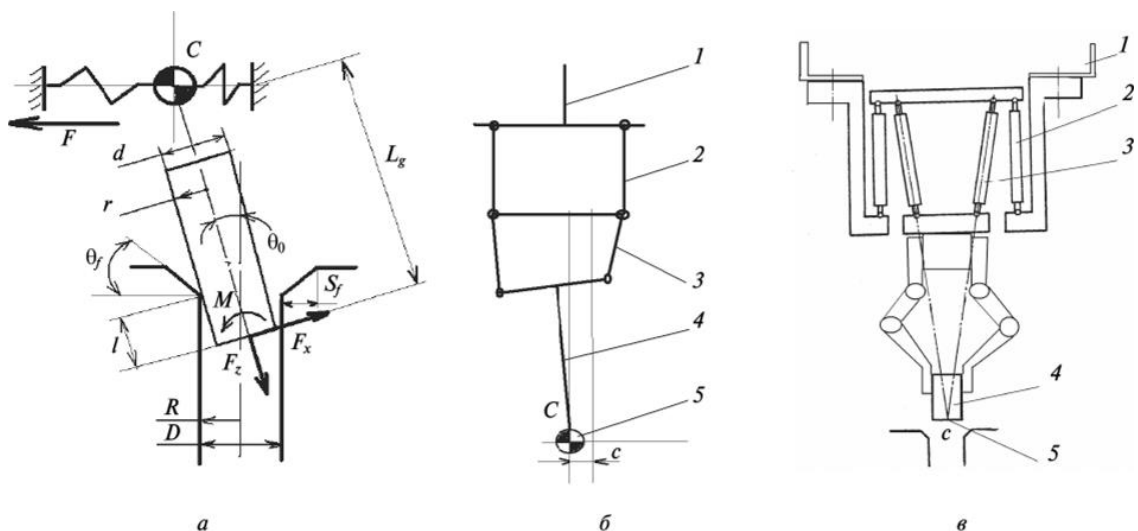


Рисунок 2.1 – Влаштування податливості з віддаленим центром коригування (ППВЦ):

На рис. 2.1 зображено влаштування податливості з віддаленим центром коригування, де а – штифт, підвішений на ППВЦ; б – схема роботи ППВЦ; в – приклад конструкції ППВЦ, в якому стрижні, що становлять його структуру, рухомо закріплені на підставах за допомогою кульових цапф (точка є віддаленим центром коригування положення); 1 – рука маніпулятора; 2 – стрижні лінійної частини ППВЦ; 3 – стрижні обертальної частини ППВЦ; 4 – деталь; 5 – віддалений центруючий повороти з невеликою амплітудою навколо точки перетину осей стрижнів, яка в даному пристрої називається центром коригування і розташована в кінці стрижня.

Подібний пристрій дозволяє розмежувати поступальне та обертальне переміщення стрижня, які викликані зусиллями, прикладеними в центрі коригування.

Очевидно, при складанні ці зусилля збігаються з силами та моментами реакції, що виникають при контакті штифт-отвір. В даному випадку центрування забезпечується за рахунок ковзання фаски стрижня за фаскою зенківки отвору.

Схема роботи ППВЦ зображена на рис. 2.1 б: одна з частин пристрою (обертальна – 3) утримує штифт так, що він може здійснювати кутові переміщення в просторі навколо певної точки (віддаленого центру – С), а інша (лінійна – 2) частина забезпечує усунення штифта в бічних напрямках. При виконанні типової операції частина 3 працює при проходженні штифтом зони зенківки, а частина 2 безпосередньо при вставленні в отвір.

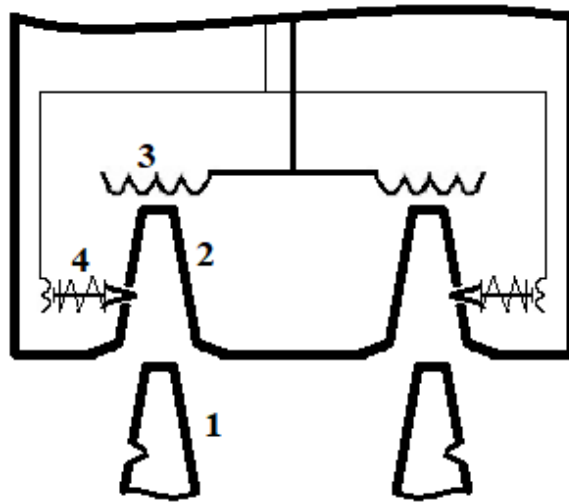
За допомогою такого пристрою можна дуже швидко (за кілька часток секунди) здійснювати вставку штифта в отвір з малим проміжком (соті частки міліметра). Але даний вид також потребує додаткових ускладнень конструкції маніпулятора що призводить до складності виготовлення, обслуговування та підвищення вартості конструкції.

Основними проблемами є:

- необхідність використання болта для жорстокого з'єднання, потрібне втручання оператора або складної системи автоматичного загвинчування;
- при використанні шарнірних з'єднань необхідна висока точність з малими допусками та посадками, що підвищує вартість;
- необхідний контроль якості та правильності з'єднання інструменту з маніпулятором за допомогою, наприклад, датчика, що в свою чергу також підвищує вартість;
- для всіх використовуваних інструментів необхідне єдине уніфіковане кріплення для можливості фіксації з маніпулятором, або використання більш технологічного рішення з можливістю автоматичної заміни, яке також підвищує вартість [10];
- проблема знаходження необхідного інструменту – необхідність передбачення зору маніпулятора для правильного знаходження та вибору інструменту, та правильна орієнтація згідно кріплень інструмента [11];
- підтвердження, що обраний інструмент є правильним для того чи іншого виду роботи, що потребує наявності датчику чи другого виду контролю обраного інструмента.

Для вирішення проблем складності та вартості виготовлення штифту пропонується:

- використовувати штифт конусної форми в конструкції маніпулятора для його фіксації в конусному отворі інструменту та переміщення його за допомогою електромагніту, що зображено на рис. 2.2.
- використання штифту циліндричної форми, переміщення якого відбувається завдяки сервоприводу та двом додатковим елементам для перетворення крутного зусилля в прямолінійне, що зображено на рис. 2.3.



- 1 – конусний штифт інструменту; 2 – паз в корпусі маніпулятора;  
 3 – електромагніт; 4 – клинова засувка з пружиною та електромагнітом

Рисунок 2.2 – Схема кріплення інструменту до маніпулятора за допомогою конусних штифтів

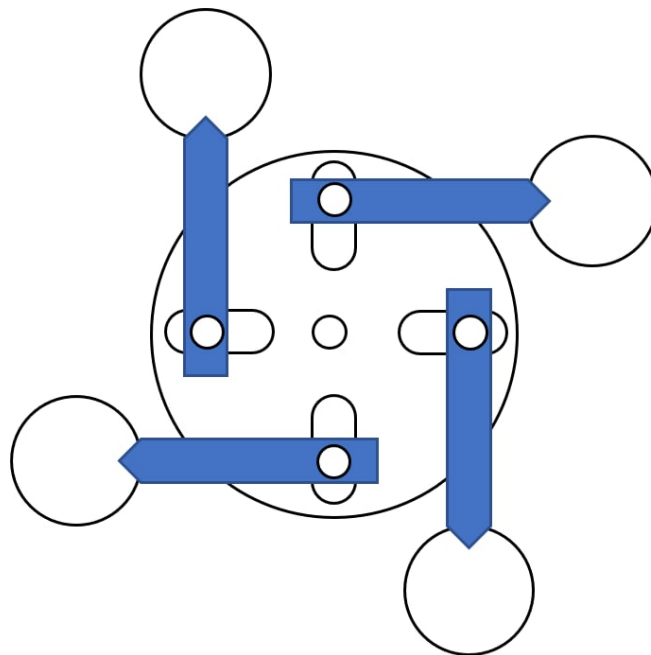


Рисунок 2.3 – Схема переміщення стопорного штифту за допомогою сервоприводу

Постійне ввімкнення електромагніту не є правильним з точки зору доцільного використання енергоресурсів, тому доречно передбачити фіксацію штифту в кінцевому положенні за допомогою клинових засувки в конструкції маніпулятора, які будуть тримати інструмент без постійного використання електромагніту.

## 2.2 Визначення базових поверхонь для встановлення інструменту

Аналіз пристроїв існуючих ПР дозволив рекомендувати ряд конструкцій місць кріплення інструменту, а саме виконання змінного та швидкозмінного. Змінні інструменти виконані у вигляді самостійних вузлів і мають базові поверхні для кріплення до роботи, але не відповідають вимогам швидкої заміни. Швидкозмінні – це змінні інструменти, конструкція базових поверхонь яких забезпечує швидку зміну.

В якості конструктивного виконання місць кріплення змінних інструментів прийнято використовувати фланцеве кріплення. Для чого на ПР виконується фланець з центральним центруючим отвором і різьбовими отворами кругом нього. Така конструкція проста та універсальна. Вона дозволяє розміщувати частину елементів інструменту всередині руки робота, виконувати зв'язок інструменту, не маючи вбудованого приводу, з приводом який знаходиться в руці маніпулятора. Передбачено два виконання фланців – круглої та квадратної форми, (рис 2.4) при чому координати різьбових отворів в обох випадках залишаються постійними і обидва виконання є взаємозамінними. На круглих фланцях великих розмірів виконуються чотири додаткові кріпильні отвори. Ряд розмірів фланців по внутрішньому діаметру ( $d$ ) прийнято із конструктивних міркувань і містить вісім значень від 10 до 200 мм. Конструкції місць кріплення змінних інструментів на руці ПР представлені на рис.2.3 основні розміри приведені в табл. 2.1.

Допустимі значення крутних і згинальних моментів на кріпленнях змінних інструментів приведені в табл. 2.2 [5].

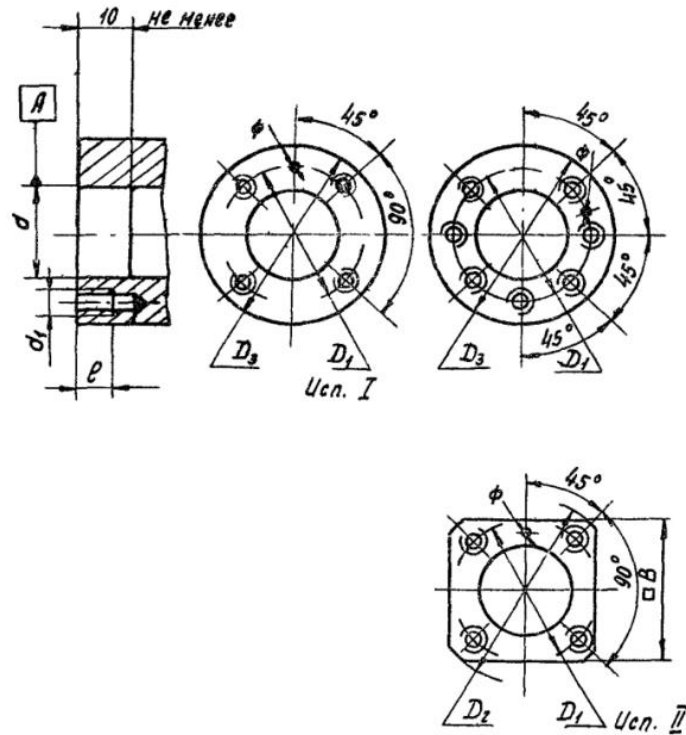


Рисунок 2.4 – Зразок фланцевого з'єднання круглої та квадратної форми

Таблиця 2.1 – Розміри конструкції місць кріплення змінних інструментів маніпулятора

Розміри місць кріплення змінних інструментів, мм										
d	D <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	l, не менше	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub> , не менше	Діаметр отв. під штифт		n		B
						вик. I	вик. II	вик. I	вик. II	
10	18	M4	6	26	26	3	2	4	4	20
20	30	M5	7	40	40	4	2			30
40	52	M6	9	64	64	5	3			52
60	76	M8	12	92	92	6	3			76
90	110	M10	15	144	130	8	4	8	8	110
120	140	M10	15	180	160	8	4			140
160	184	M12	18	240	208	10	5			184
200	232	M16	24	300	264	12	5			232

Таблиця 2.2 – Крутні і згинальні моменти на кріпленні змінних інструментів

Діаметр базового отвору, мм	Допустимі значення крутного (чисельник) і згинального (знаменник) моментів, Н/м	
	вик. I	вик. II
10	4/20	4,4/20
20	12/50	12/50
40	30/40	30/140
60	80/400	80/400
90	310/1300	180/900
120	400/1700	230/1100
160	770/3300	440/2200
200	1845/7800	1050/5200

В якості конструктивного виконання місць кріплення швидкозмінних інструментів прийнято байонетне кріплення конструкції, яке добре себе зарекомендувало в деяких ПР. В залежності від вимог, воно може використовуватись як для бистої ручної заміни ЗУ, так і для автоматичної. Конструкція місць кріплення представлена на рис. 2.5, основні розміри наведено в табл. 2.3.

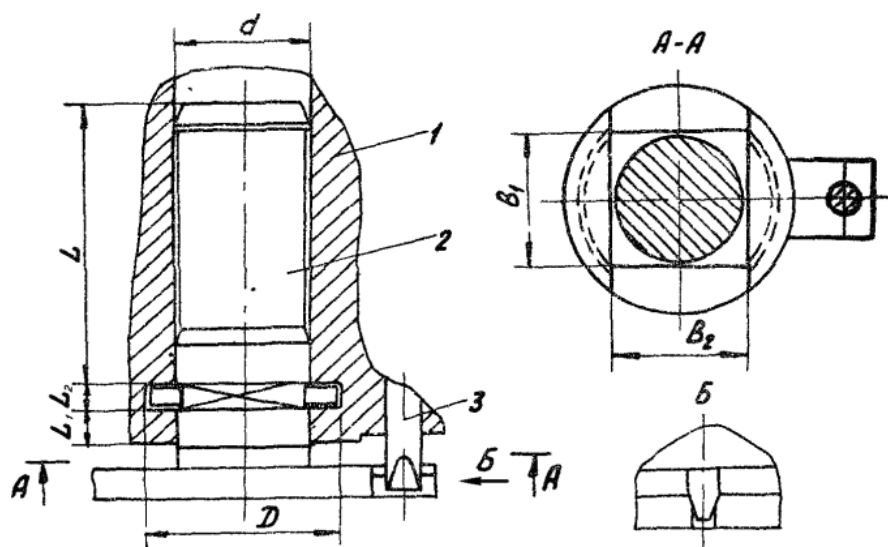


Рисунок 2.5 – Конструкція місця кріплення швидкозмінного інструменту

Таблиця 2.3 – Розміри конструкцій місць кріплення для швидкозмінних інструментів

Розміри місць кріплення для швидкозмінних інструментів, мм						
d	D	L	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>
20	32	40	7	6	20	21
30	44	60	9	8	30	31
40	56	85	9	8	50	51
50	68	100	9	8	50	51
60	80	120	11	10	60	31

Вузол кріплення включає (на рис. 2.5) – гніздо (1), хвостовик (2), пристрій для кутової фіксації (3). Для заміни ЗУ потрібно повернути його відносно гнізда на 90° і вийняти з гнізда. Допустимі осьові навантаження на місця кріплення швидкозмінних інструментів для сталі 35 (ГОСТ 1050-88) при діаметрі хвостовика 20, 30, 40, 50, 60 мм – 12, 25, 34, 43,65 Н осьового навантаження відповідно [5].

Механізм автоматичної заміни інструменту – виконується на основі нормалізованого швидкозмінного кріплення (рис 2.5). Схема механізму представлена на рис 2.6. Інструмент, призначений для автоматичної заміни, поміщається в магазинний пристрій, який може мати вигляд нерухомої стойки або поворотного диску з відповідними гніздами. Інструмент опирається на торцеву поверхню стойки фланцем 8 і центрується циліндричним пояском 9 по гнізду, маючи форму отвору з вирізом для проходу верхньої частини корпусу інструмента. Кутове положення визначається штифтом 2.

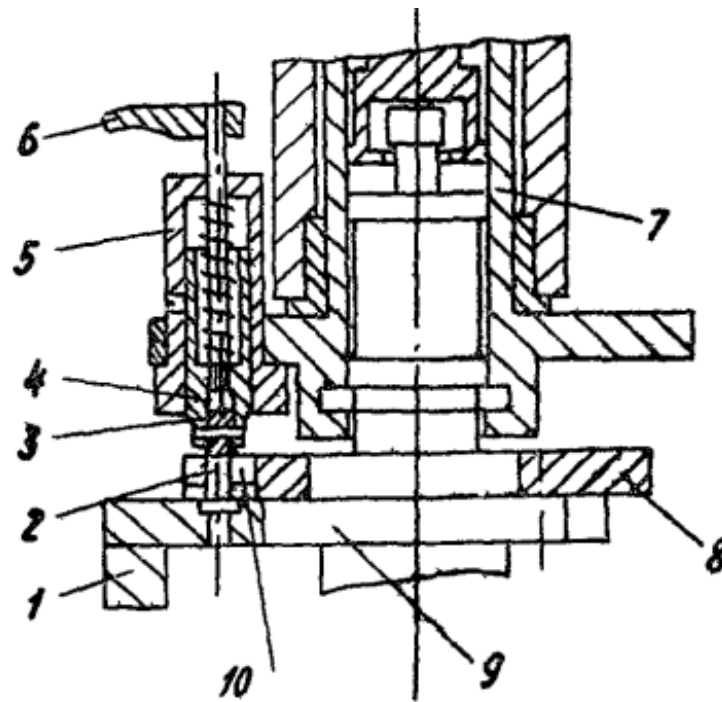


Рисунок 2.6 – Механізм автоматичної заміни інструменту

Кутова фіксація інструменту в руці ПР 7 здійснюється фіксатором 4, який представляє собою пружну скалку з роликом 3. Він закріплюється на втулці 5, розміщену на руці ПР 7. Від повороту скалка утримується гвинтом. Вона також зв'язана з рукояткою 6 для ручної розфіксації інструменту. На рис. 2.6 показаний момент установлення інструменту в гніздо магазину 1 перед розстібуванням байонетного замку або моменту що передуює взяття інструменту з магазину. При повороті руки 7 на  $90^\circ$  ролик 3 віджатоного фіксатору котиться по поверхні фланцю 8. Після повороту на  $90^\circ$  рука 7 йде ввєрх, залишаючи інструмент в гнізді магазину 1.

Якщо необхідно взяти інструмент з магазину, рука переміщуючись вертикально, надівається на його хвостовик. При цьому фіксатор повернутий на  $90^\circ$  відносно пазу. Взаємодіючи з фланцем 8, фіксатор віджимається. При повороті руки 7 на  $90^\circ$  байонетний замок застібується, а ролик 3 котиться по поверхні фланцю 8. В кінці повороту ролик 3 переміщується в торець штифта 2. Далі рука піднімається з встановленим інструментом, при чому паз 10 інструменту сходить з штифта 2, а фіксатор входить в нього під дією пружини [5].

Наведені методи в більшості використовуються при встановленні ЗП як інструмент маніпулятора, але вони втрачають в універсальності через потребу використання фланцю, потребують втручання оператора для зміни інструменту, чи повороту самого інструменту для його фіксації в кінцевому положенні, що накладає додаткові складності в проектуванні трубопроводів, необхідних для роботи інструментів, що використовують пневмо-, гідро- та вакуумну магістраль. Для використання широкого спектру інструментів доцільно використовувати уніфіковану базову поверхню.

Тому доцільно як основну базову поверхню для встановлення інструменту використовувати рівну площину для більш щільного з'єднання та простоти виготовлення. На цій площині присутні конусні отвори під штифт для фіксації інструменту відносно осі маніпулятора, навколо отворів також використовуються елементи пасивного пошуку – скоси, що зменшує вимоги до точності знаходження хвостовика інструменту, шляхом направлення штифту в коректне положення. Утримання хвостовика в кінцевому положенні виконується за допомогою стопорного штифту, що входить до отвору в інструменті.

Алгоритм встановлення інструменту, з фіксацією за допомогою виштовхування стопорного штифту електромагнітом, виглядає наступним чином: маніпулятор знаходить необхідний інструмент, за допомогою датчиків чи систем комп'ютерного зору. Орієнтує поверхню встановлення інструменту під інструмент (паз під штифт). Прямолінійним переміщенням маніпулятора, проходить стикування з інструментом, на певній заданій відстані один від одного, подається напруга на основний електромагніт, який остаточно переміщує інструмент в кінцеве положення. В кінцевому положенні, під силою пружності пружини, клинова засувка входить в паз штифту, фіксуючи інструмент. Стикування виконано, електромагніт вимикається. Для додатково контролю успішного стикування можна використовувати набір датчиків.

Алгоритм відстикування інструменту: подача напруги на допоміжний магніт, що діє на клинову засувку з магнітного матеріалу, та в свою чергу

притягуючись до магніту вивільняє штифт інструменту, який під силою тяжіння переміщується вниз. В випадку застрявання штифту в корпусі, подається напруга на основний магніт але в оберненому полюсі, який виштовхує штифт, допомагаючи вивільнити інструмент. Відстикування успішне.

Алгоритм стикування інструменту, з фіксацією за допомогою стопорного штифту переміщуваного сервоприводом виглядає наступним чином: маніпулятор знаходить необхідний інструмент, за допомогою датчиків чи систем комп'ютерного зору. Орієнтує поверхню встановлення інструменту під інструмент (паз під штифт). При натисканні кнопки 1, сервопривід переводиться в положення відкритий переміщуючи стопорні штифти всередину корпусу. Прямолінійним переміщенням маніпулятора, проходить стикування з інструментом, на певній відстані магніт що розташований в інструменті, притягується до вимкненого електромагніту що розташований в корпусу маніпулятора переміщуючись в крайнє положення. Сервопривід переводиться в положення закритий, фіксуючи інструмент. Стикування виконано.. Для додаткового контролю успішного стикування можна використовувати набір датчиків.

Алгоритм відстикування інструменту: При натисканні кнопки 2, сервопривід переміщується в положення відкритий, на електромагніт подається струм, створюючи полюс обернений магніту інструменту, таким чином виштовхуючи інструмент, інструмент вивільняється, сервопривід переводиться в положення закритий.

Другий алгоритм є відносно простішим в реалізації та досить надійним в утриманні інструменту при різних механічних впливах, таких як швидке переміщення або вібрація тощо, тому був обраний для подальшої розробки.

### 2.3 Розрахунок надійності вузлів стикування інструменту з маніпулятором

Основною вимогою надійності вузлів стикування інструменту з маніпулятором є збереження властивостей хвостовика інструменту з базовою поверхнею встановлення при багаторазовому стикуванні, розстикуванні та виконанні роботи.

За основу досліджуваного об'єкту, обрано двох ланковий маніпулятор, з довжиною ланки 50см [9], на кінці якого знаходиться основна базова поверхня, для встановлення інструменту. Найбільше навантаження на злам буде в місці переходу хвостовика інструменту в його продовження – корпус. Щоб правильно обрати матеріал, товщину та кількість хвостовиків, необхідно обчислити максимальне навантаження на один хвостовик, аби змоделювати конструкцію, що витримає задане навантаження.

Умова розрахунку міцності виражається формулою 2.1

$$\tau_{cp} = \frac{Q}{F_{cp}} \leq [\tau_{cp}], \quad (2.1)$$

де  $\tau_{cp}$  – навантаження зрізу в площині розрахованого перерізу,  $Q$  – поперечна сила,  $F_{cp}$  – площа зрізу,  $[\tau_{cp}]$  – допустиме навантаження на зріз.

В зв'язку з доступністю та вартістю, матеріалом прототипу обрано АБС-пластик. Максимальна допустима вага інструмента або інструмента з навантаженням згідно технічного завдання 0,5 кг, тобто 4,9 Н, з діаметром хвостовика 1см.

Виходячи з даних параметрів розрахуємо максимальне навантаження на злам:

$$\tau_{cp} = \frac{4,9}{0,0000785} = 62,42 \text{ МПа},$$

Також необхідно розрахувати максимальну напругу в перерізі, що виникає під час навантаження, що зображено на рис. 2.7

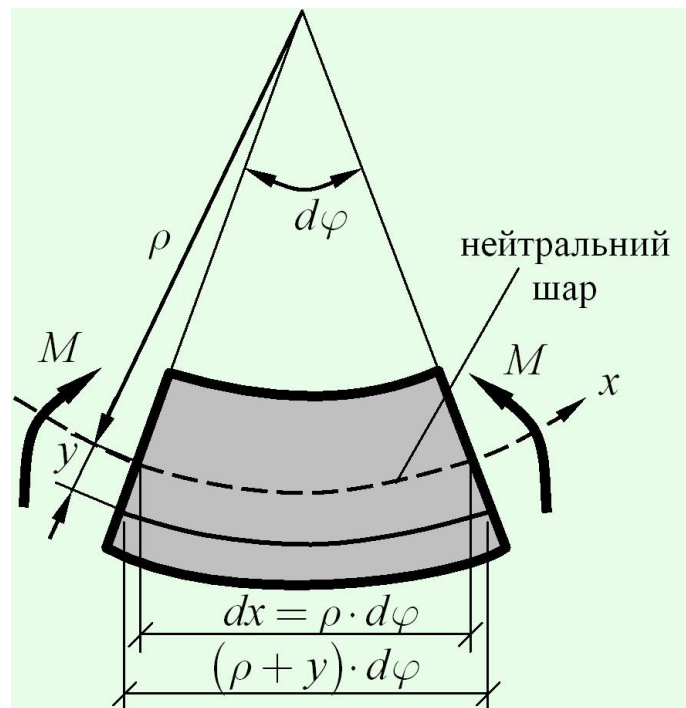


Рисунок 2.7 – Деформація штифту при навантаженні

Розрахунок міцності на вигин розраховуються за формулою Нав'є 2.2

$$\sigma = \frac{M}{J} \cdot y, \quad (2.2)$$

де  $M$  – навантаження в Н,  $J$  – осьовий момент опору перерізу щодо осі вигину

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{32}, \quad (2.3)$$

підставимо значення до формул

$$J = \frac{3.14 \cdot 0.01^4}{32} = 9.82 \cdot 10^{-8},$$

$$\sigma = \frac{0,0049}{9,82 \cdot 10^{-8}} = 0,499 \text{ МПа} < |\sigma|.$$

При допустимому навантаженні в 10,3 МПа для АБС-пластику, умова міцності виконується.

Для надійної фіксації, рекомендовано використовувати 3 або 4 хвостовика з мінімальним діаметром в 1 см в місці його переходу в корпус з метою збільшення запасу міцності.

Для відстикування інструменту, в корпусі використовується електромагніт постійного струму. Для вибору електромагніту, який задовольнятиме вимогам, проведемо аналіз деяких типів (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики електромагнітів

Найменування	Діаметр, мм	Висота, мм	Напруга живлення, В	Зусилля на відрив, Н
BR13/27	13	27	6 / 12	3 / 10
H1505	15	5	6 / 12 / 24	25
H1625	16	25	6 / 12 / 24	6
H1632	16	32	6 / 12 / 24	10
H2015	20	15	6 / 12 / 24	20
H2030	20	30	6 / 12 / 24	60
CL-P 20/15	20	15	12	25
CL-P 20/15	20	15	5	25

Проаналізувавши представлені типи електромагнітів, обираємо CL-P 20/15, Даний тип електромагніту задовольняє вимогам за габаритними параметрами, має достатню силу відштовхування, що рівна зусиллі на відрив за модулем, та обернена за напрямком.

Визначимо залежність утримуючої сили магніту в залежності від його діаметру і товщини. Розраховані дані занесено до табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Розраховані значення утримуючої сили магнітного диску

Утримуюча сила, Н			
Діаметр, мм	Товщина, мм		
	2,0	3,0	5,0
5	6,74	10,12	16,87
10	13,5	20,24	33,74
15	20,24	30,37	50,62
20	26,99	40,49	67,49
25	33,74	50,62	84,36
30	40,49	60,74	101,23

Згідно отриманих значень, побудовано графік залежності утримуючої сили від значень діаметру та товщини, що зображено на рис. 2.8.

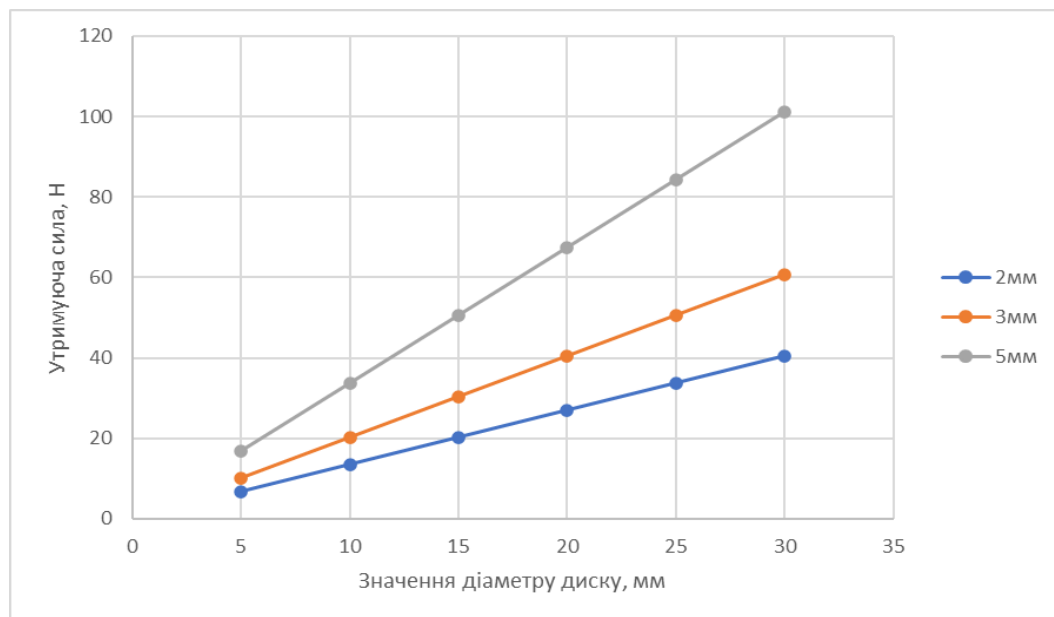


Рисунок 2.8 – Графік залежності утримуючої сили від параметрів діаметру та товщини

З графіків видно, що утримуючу силу у 80-100 Н забезпечує магніт завтовшки 5 мм діаметром 25-30 мм. В табл. 2.6 подано характеристики деяких типів магнітів.

Таблиця 2.6 – Характеристики магнітів

Найменування	Діаметр, мм	Висота, мм	Зусилля на відрив, кг
НМ-20/2	20	2	3,05
НМ-20/3	20	3	4,56
НМ-20/5	20	5	6,24
НМ-25/2	25	2	4,5
НМ-25/5	25	5	10,56

Обираємо магніт з розрахованими габаритними розмірами та зусиллям на відрив 10,56 кг НМ-25/5.

Для переміщення штифту необхідно обрати сервопривід, що буде задовольняти вимогам конструкції. Розглянемо їх в табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Характеристики сервоприводів

Найменування	Ширина, мм	Довжина, мм	Висота, мм	Робоча напруга живлення, В	Кут повороту, град°	Крутний момент, кг/см
SG – 90 1,3кг	11	22	26	3,5-5	180	1,3
SG – 90 2кг	13	30	36	3,5-5	180	2
Digital DS65HB	11	21	20	4,8 (6)	180	1,2 (1,4)
Dynam	11	24	24	4,8	180	1,6

Проаналізувавши сервоприводи в табл. 2.7, обрали сервопривід SG – 90 1,3кг, який задовольняє всі вимогам – габарити – 22x26x11 мм, робоча напруга – 5В, та кут повороту 180°.

## 2.4 Розробка конструкції пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора промислового робота

Повна конструкція пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора представляє з себе уніфікований хвостовик конусної форми (ідентичний хвостовик з отвором під клиновидний штифт) та основна базова поверхня, що містить необхідні конусні отвори (зворотної форми) та інші елементи комунікації (сигнальні та живильні ланки, необхідні магістралі для пневмо- гідро- чи вакуумного інструменту). В корпусі необхідно передбачити місце під механізм виштовхування клиновидного штифту (пружина + штифт) та механізм його переміщення в положення відстикування. Електромагніт для виштовхування інструмента, сервопривід для переміщення стопорного штифту, їх кріплення. До валу сервоприводу буде закріплено циліндричну поверхню(диск) з чотирма отворами. З кожного отвору до відповідного стопорного штифту буде йти співвідносний штифт, що переміщатиме клин. Живлення від маніпулятора передається за допомогою проводів всередині штифта до плати управління.

Основа інструменту складає з себе прямокутну поверхню, з чотирма конусами, з поперечним глухим отвором в кожному, відповідно під стопорний штифт базової поверхні маніпулятора та комунікаційні отвори для контактної групи. На поверхні додатково розміщено шип циліндричної форми для коректної орієнтації маніпулятора. На основі інструменту встановлено циліндричний магніт НМ-25/5 та контактну групу на 7 контактів.

Базова поверхня маніпулятора представляє з себе прямокутний корпус, з чотирма отворами на дні під відповідний конусний хвостовик інструменту. Даний отвір має конусний вигляд з додатковим перпендикулярним отвором під стопорний штифт. Стопорний штифт в свою чергу знаходиться в додатковому утримуючому корпусі, який знаходиться з боку отвору під штифт. Корпус призначений для утримання штифту в необхідному напрямку . В основному корпусі передбачено місце для утримання та закріплення сервоприводу і двох

електромагнітів, та отвори під контактну групу маніпулятора. Відповідно до шипу в інструменті передбачено паз. В корпус встановлюється сервопривід SG-90 1,3кг та два електромагніти CL-P 20/15, чотири металевих стопорних штифти з пружиною, циліндрична поверхня з отворами під додатковий штифт, чотири допоміжних штифти з АБС-пластику для передачі зусилля з диску на металевий штифт та його переміщення в необхідному напрямку.

Проаналізувавши вимоги до конструкції, можемо створити ескіз, врахувавши всі поставлені задачі до пристрою швидкої заміни інструменту маніпулятора.

На рис. 2.9 зображено ескіз корпусу пристрою для швидкої заміни інструмента маніпулятора з вказаними розмірами елементів для кріплення сервоприводу, електромагніту та стопорного штифту.

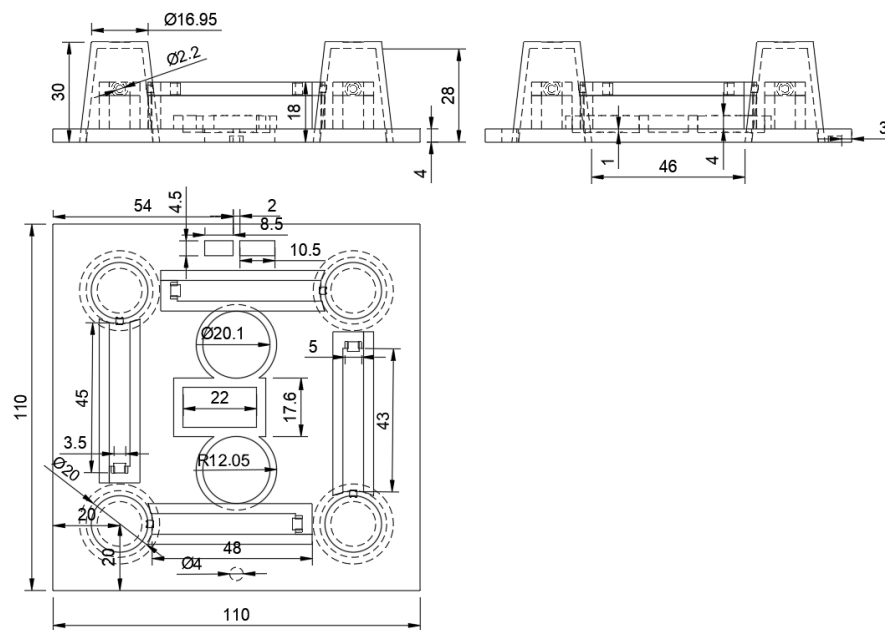


Рисунок 2.9 – Ескіз корпусу пристрою для швидкої заміни інструмента маніпулятора

Розроблений корпус пристрою для швидкої заміни інструмента маніпулятора можна спостерігати у тривимірному вигляді на рис. 2.10.

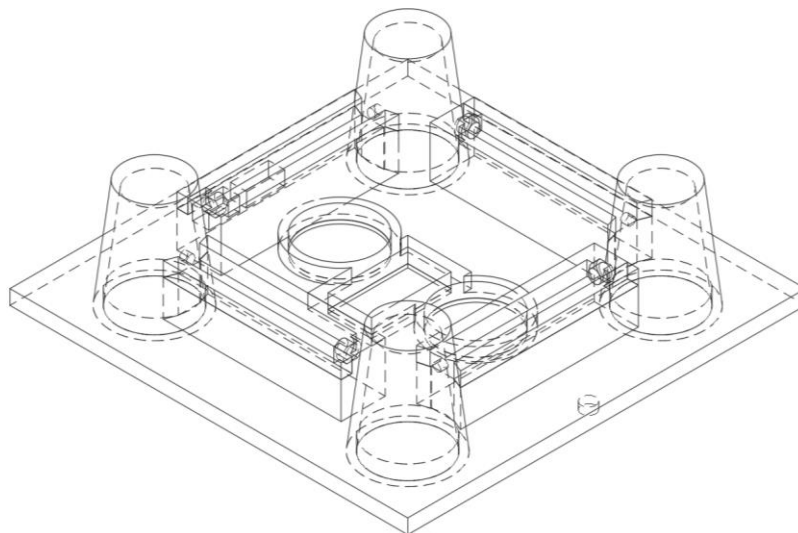


Рисунок 2.10 – Корпус пристрою для швидкої заміни інструмента маніпулятора  
в тривимірному вигляді

На рис. 2.11 показано розроблений ескіз основи інструмента маніпулятора з вказаними розмірами хвостовика інструменту та необхідними отворами для кріплення магніту та контактної групи

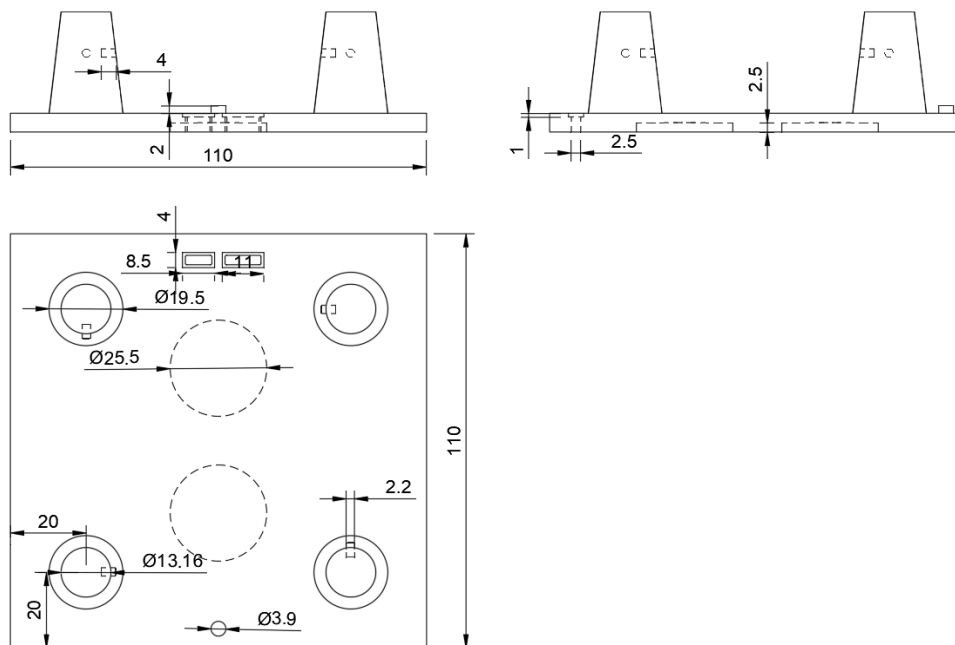


Рисунок – 2.11 – Ескіз основи інструмента маніпулятора

Розроблений ескіз основи інструмента маніпулятора можна спостерігати у тривимірному вигляді на рис. 2.12.

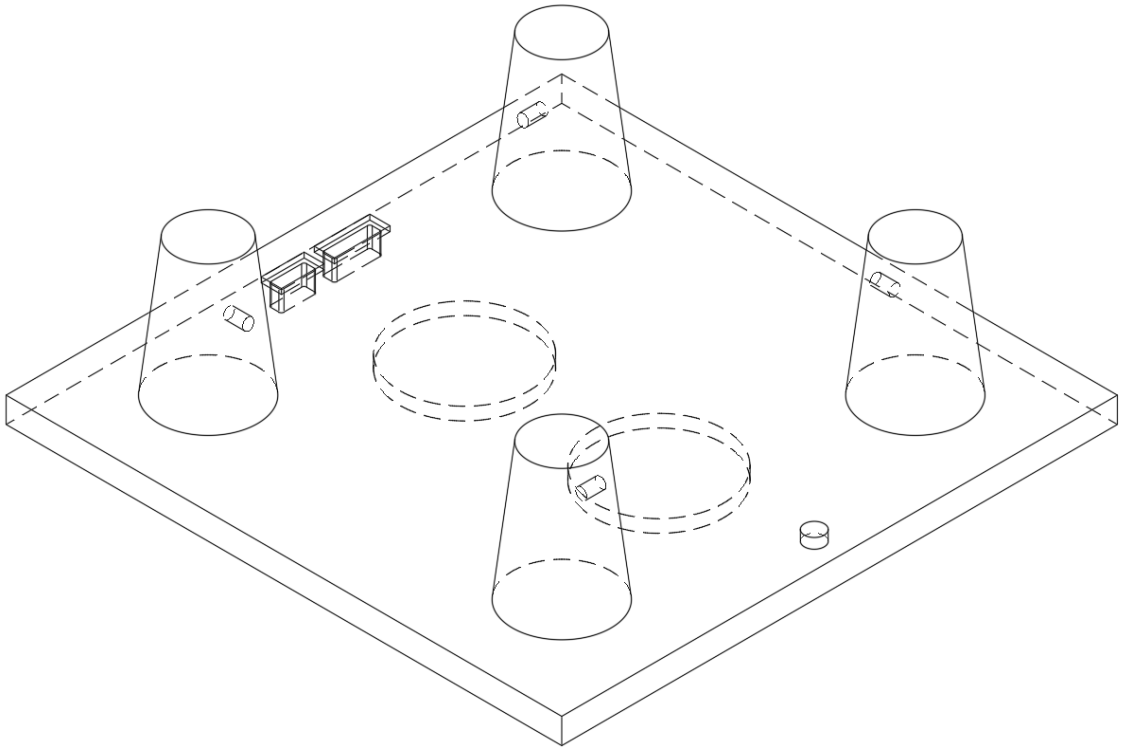


Рисунок 2.12 – Основа інструмента маніпулятора у тривимірному вигляді

На рис. 2.13 зображено ескіз диску для передачі зусилля з сервоприводу на додатковий штифт та його утримання.

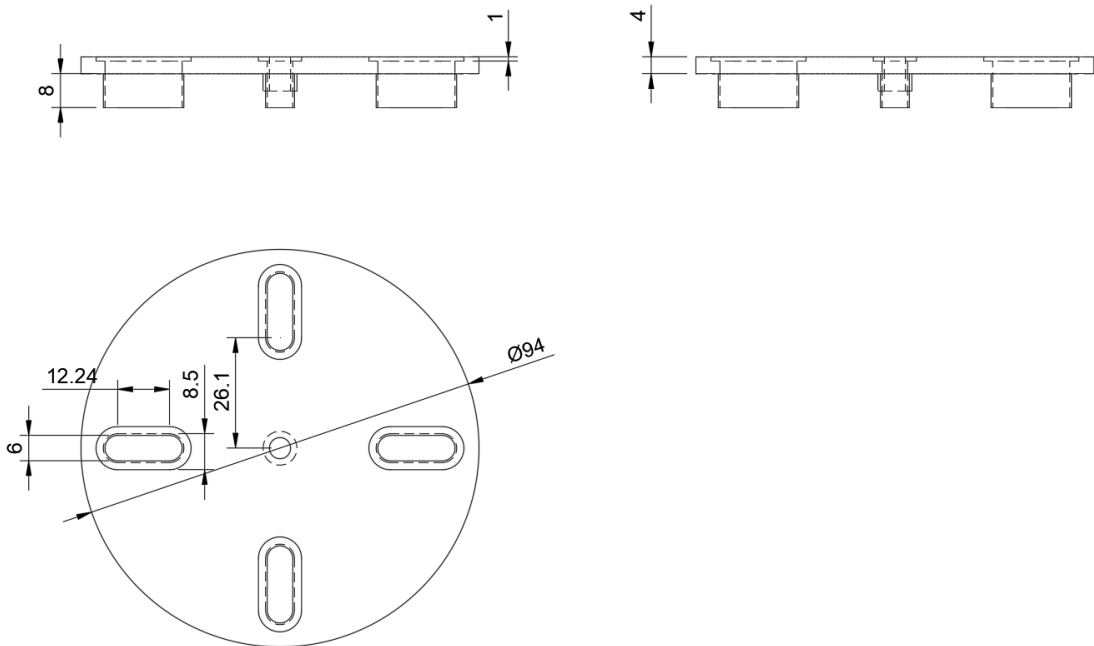


Рисунок 2.13 – Ескіз диску для утримання штифту

Розроблений ескіз диску для утримання штифту у тривимірному вигляді можна спостерігати на рис. 2.14.

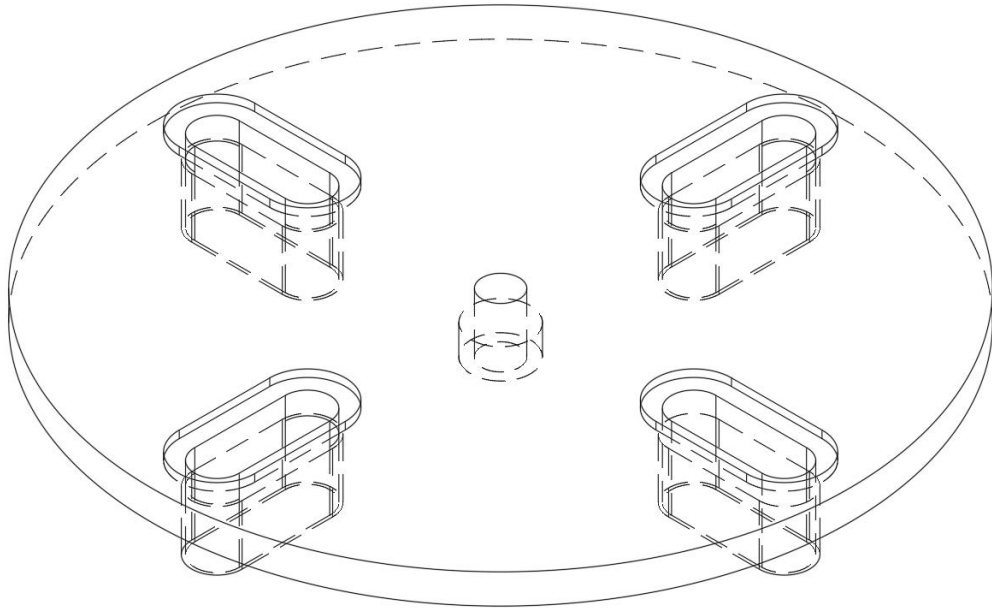


Рисунок 2.14 – Диск для утримання штифту у тривимірному просторі

На рис. 2.15 представлено ескіз допоміжного штифту, з додатковим видом у тривимірному просторі, для передачі зусилля з допоміжного диску на стопорний штифт.

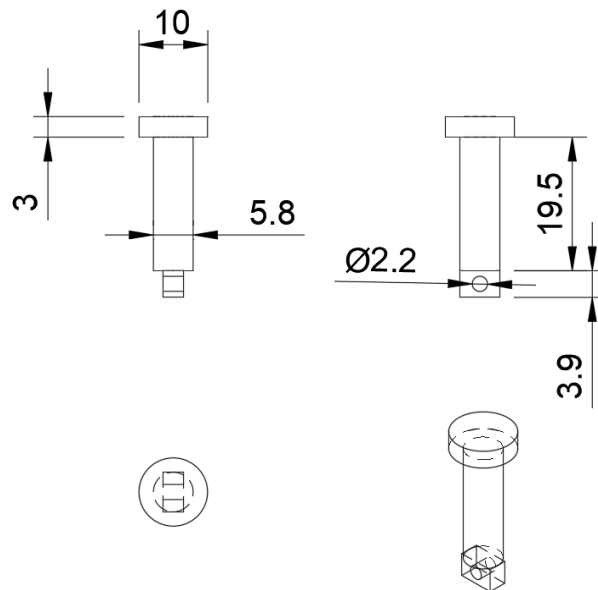


Рисунок 2.15 – Ескіз та тривимірний вигляд допоміжного штифту

Для органів керування створили схему з'єднання елементів, яка зображена на рис. 2.16.

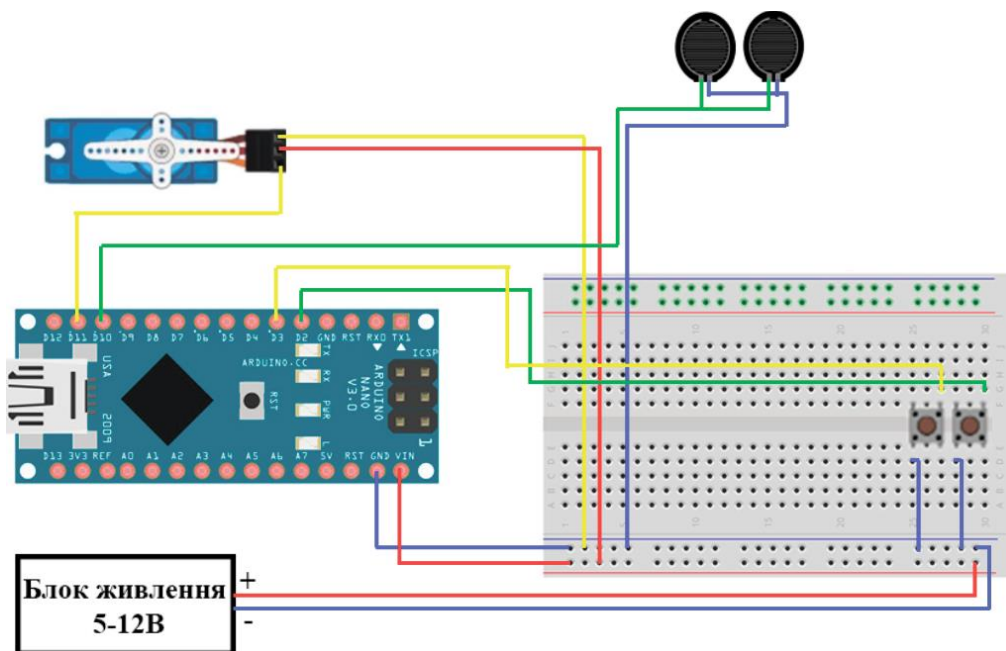


Рисунок 2.16 – Схема з'єднання елементів

## 2.5 Висновки до 2 розділу

У другому розділі проаналізували основні типи хвостовиків інструментів і базових поверхонь для встановлення інструменту. Враховуючи недоліки та переваги, запропоновано альтернативне рішення, а саме використання хвостовика конусної форми, для зменшення точності позиціонування маніпулятора та інструменту, застосування уніфікованої базової поверхні інструменту, і використання електромагніту з звичайним магнітом для швидкого стикування та відстикування. Розраховано максимальне навантаження на злам – 62,42 МПа та міцності на вигин – 0,499 МПа. На основі розрахунків розроблено ескіз основної поверхні інструменту маніпулятора, базової поверхні, допоміжного диску та штифту. Розроблено схему з'єднання елементів.

## 3 МОДЕЛЮВАННЯ ВУЗЛУ СТИКУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ З МАНІПУЛЯТОРОМ

### 3.1 Вибір програмного середовища для моделювання

В якості програми для створення 3D-моделі візьмемо – систему Fusion 360 (Autodesk Fusion 360). Це програмний комплекс САПР для автоматизації робіт промислового підприємства на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва [12]. Забезпечує розробку виробів будь-якого ступеня складності і призначення. Працює в середовищі MacOS та Windows. Розроблено компанією Autodesk, Inc. Дана програма задовольняє всі потреби, що виникають при моделюванні того чи іншого об'єкту [13].

### 3.2 Розробка 3D-моделі хвостовика інструменту

Згідно до відповідного ескізу, створили модель хвостовика інструменту:

– накреслили ескіз основної поверхні інструменту, зробили необхідні отвори та шип для орієнтування інструменту (показано на рис. 3.1, 3.2), та зробили відповідні глухі отвори для встановлення магніту з зворотної сторони, які зображено на рис. 3.3;

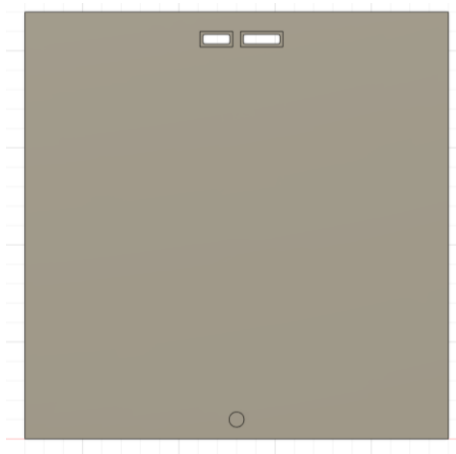


Рисунок 3.1 – Основна поверхня інструменту



Рисунок 3.2 – Основна поверхня інструменту у тривимірному просторі

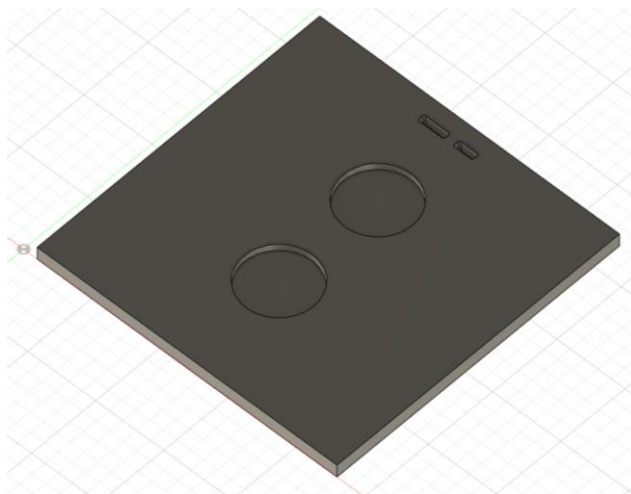


Рисунок 3.3 – Глухі отвори під магніт з зворотної сторони інструменту

– створили конус з заданими параметрами діаметру та висоти, на певній висоті зробили глухий отвір під стопорний штифт, рис. 3.4. За допомогою кругового масиву розмножили готовий хвостовик по поверхні інструменту, рис. 3.5;

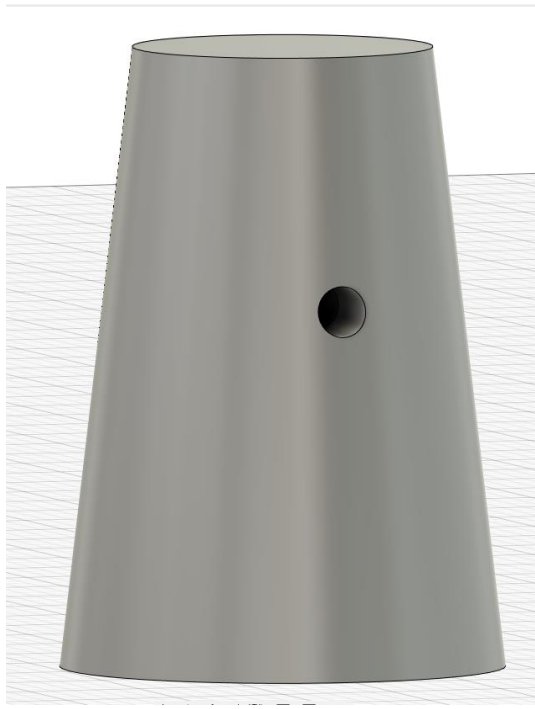


Рисунок 3.4 – Хвостовик інструменту з глухим отвором

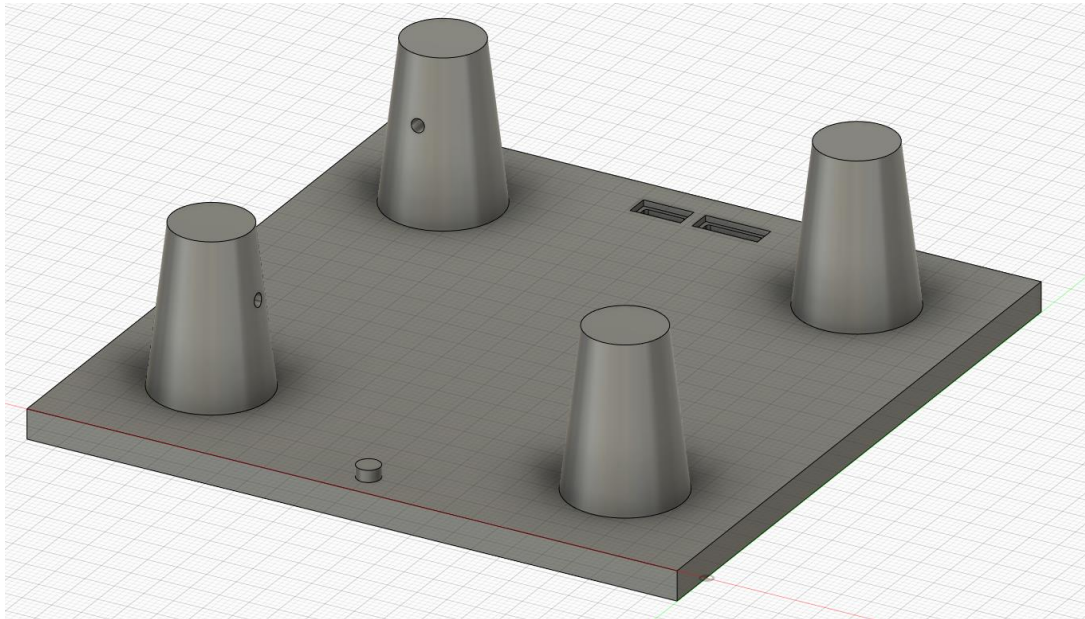


Рисунок 3.5 – Основна поверхня з хвостовиком

### 3.3 Розробка 3D-моделі пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора

Згідно до відповідного ескізу, створили модель корпусу пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора:

– накреслили ескіз нижньої поверхні корпусу, встановили товщину, зробили необхідні отвори, наскрізні, для конуса хвостовика та глухі – пази для встановлення в них відповідних елементів – сервопривід та електромагніти, що представлено на рис. 3.6, 3.7 та паз для орієнтувального шипу з зворотної сторони;

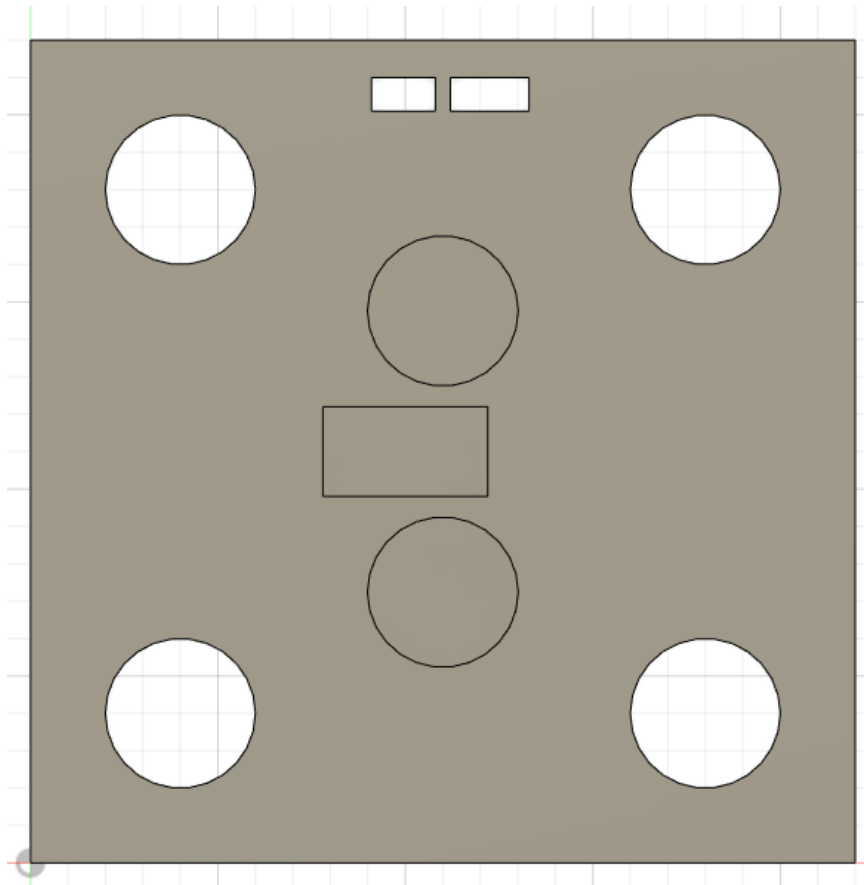


Рисунок 3.6 – Нижня поверхня корпусу

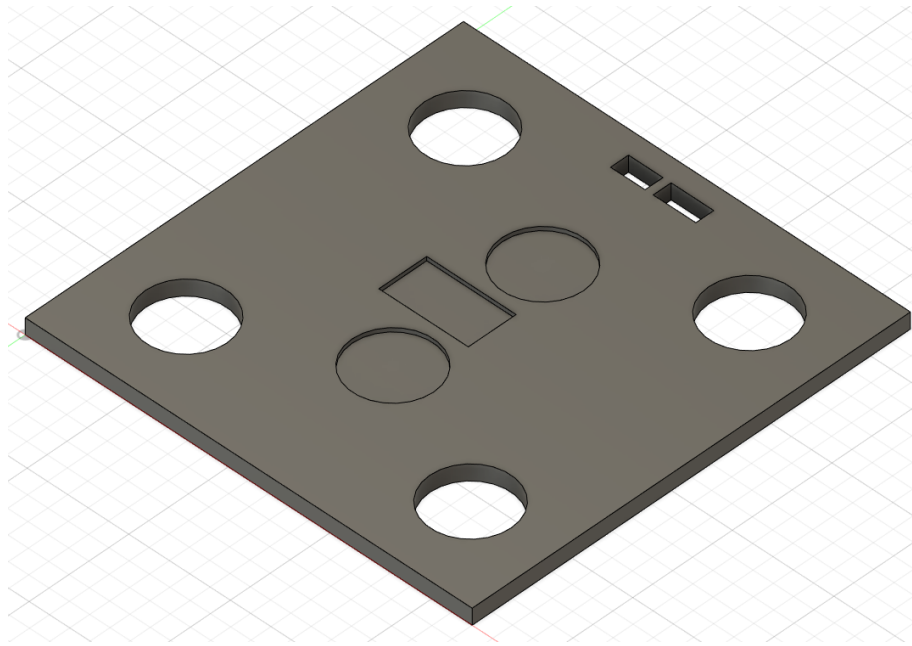


Рисунок 3.7 – Нижня поверхня корпусу в тривимірному вигляді

– створили додатковий корпус для кріплення сервоприводу та електромагніту, що зображено на рис. 3.8;

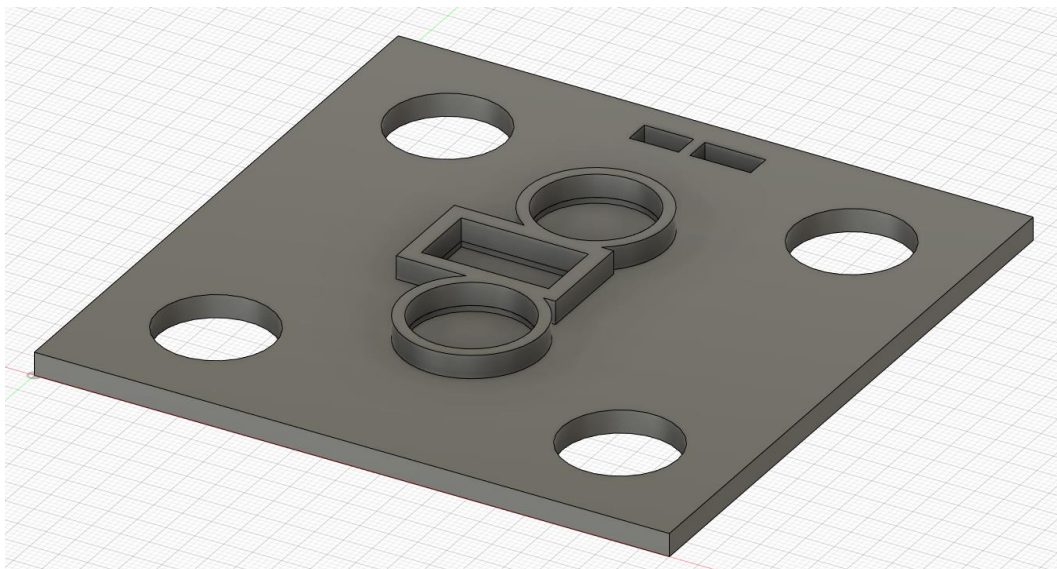


Рисунок 3.8 – Нижня поверхня корпусу з додатковим корпусом для кріплення сервоприводу та електромагніту

– на рис. 3.9 зображено створений незаповнений конус під хвостовик інструменту, з заданою товщиною стінки та відповідним отвором для стопорного штифту;



Рисунок 3.9 – Незаповнений конус під хвостовик з отвором

– створили корпус під стопорний штифт з додатковим кріпленням пружини з протилежної сторони, який показано на рис. 3.10;

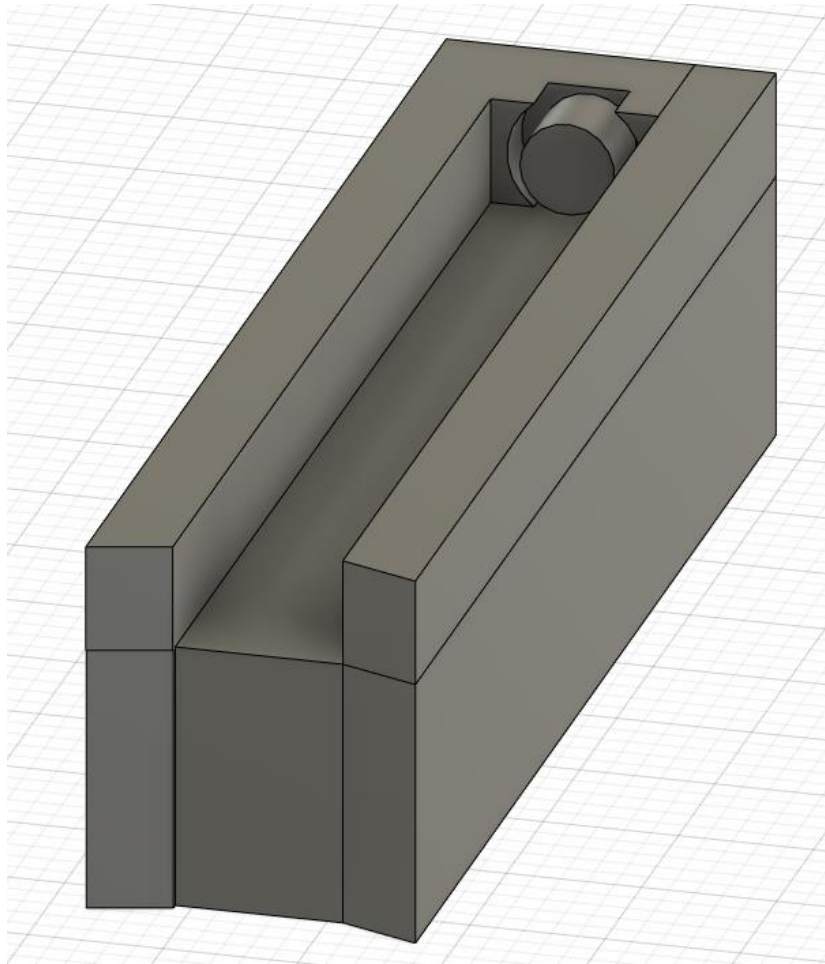


Рисунок 3.10 – Додатковий корпус для направлення та утримання стопорного штифту у правильному положенні

– за допомогою кругового масиву розмножили необхідні елементи базової поверхні – конус та кріплення і відтворили їх на рис. 3.11;

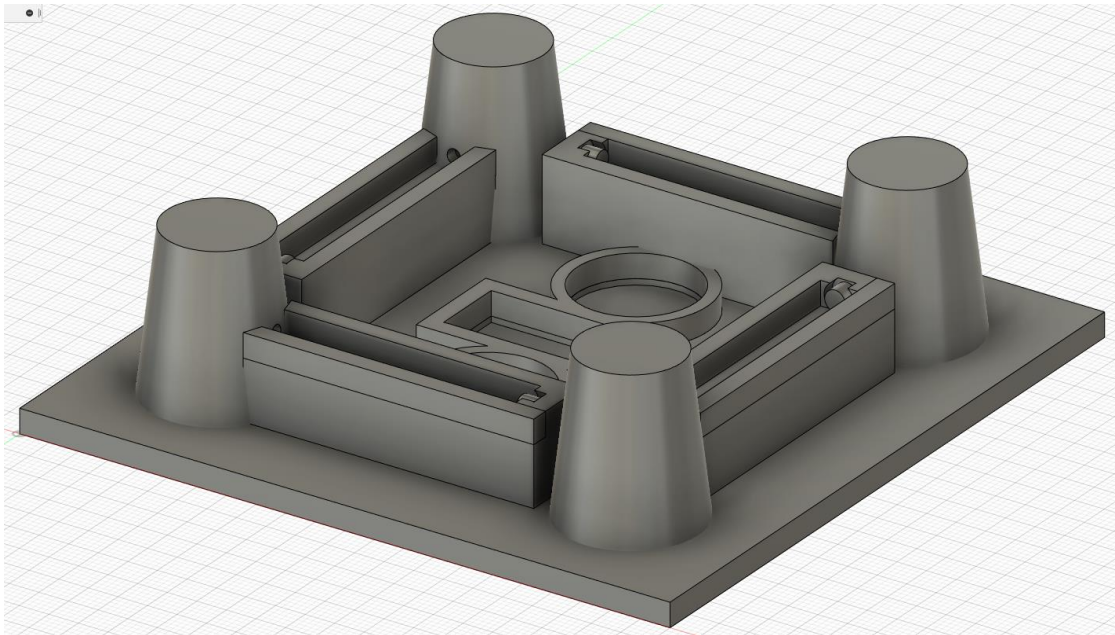


Рисунок 3.11 – Базова поверхня з конусами та додатковими корпусами під стопорний штифт

- додали стіни корпусу, які показані на рис. 3.12;

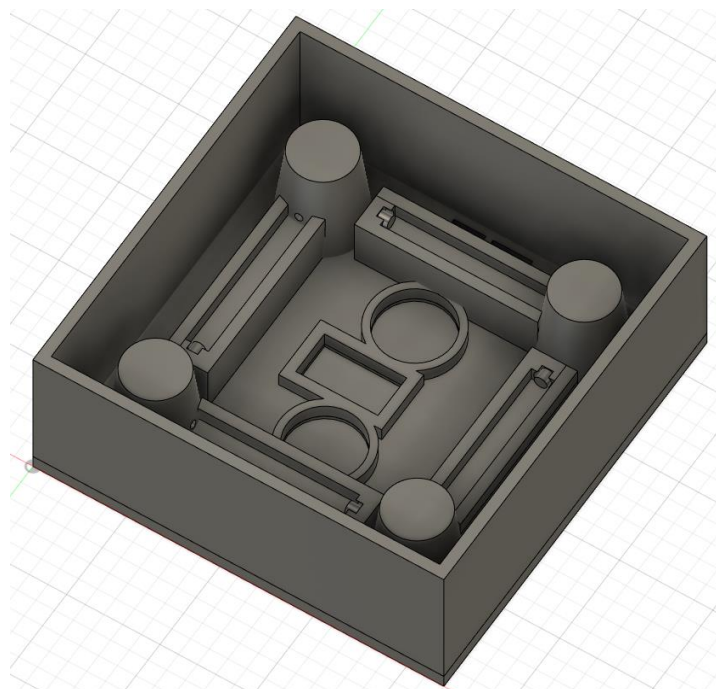


Рисунок 3.12 – Готовий корпус пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора

Розробили диск для передачі зусилля сервоприводу на допоміжний штифт, який рухає стопорний штифт та сам допоміжний штифт:

– створили циліндричну поверхню з вирізами згідно макету – під кріплення до сервоприводу та під додатковий штифт передачі зусилля з диску на стопорний штифт, рис. 3.13;

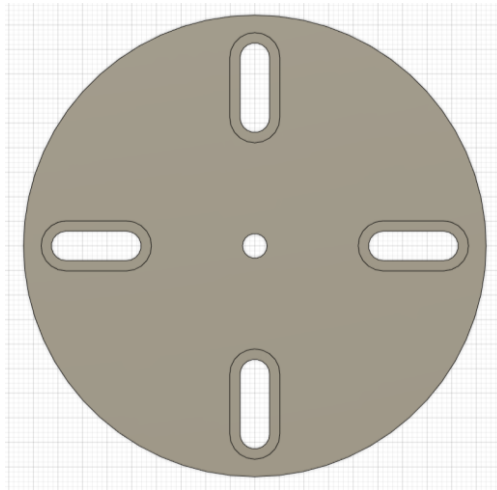


Рисунок 3.13 – Диск для передачі зусилля сервоприводу на стопорний штифт

– з зворотнього боку диску збільшено місце кріплення з сервоприводом та з метою запобігання прогину, додано додаткові елементи корпусу навколо отворів, що зображено на рис. 3.14;

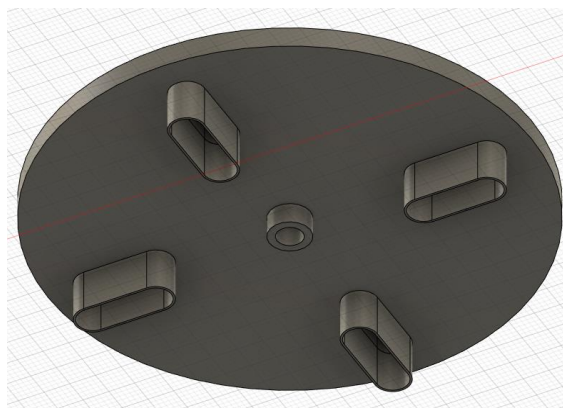


Рисунок 3.14 – Зворотня сторона диску для передачі зусилля

– розробили допоміжний штифт, згідно необхідних розмірів стопорного штифту та отворів у диску, що зображено на рис. 3.15.

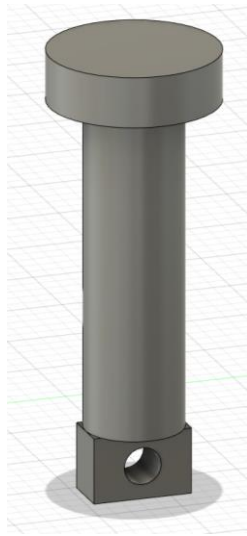


Рисунок 3.15 – Допоміжний штифт для передачі зусилля з диску на стопорний штифт

#### 3.4 Висновки до 3 розділу

Згідно до теоретичного обґрунтування конструкцій пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора, аналізу промислових рішень заміни інструменту та розробленого ескізу в попередньому розділі, змодельовали уніфіковану поверхню маніпулятора, основну базову поверхню для встановлення інструменту, допоміжний диск та штифт для перетворення крутного моменту в прямолінійний а також передачі зусилля з сервоприводу на стопорний штифт.

## 4 ВИГОТОВЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ШВИДКОЇ ЗАМІНИ ІНСТРУМЕНТУ МАНІПУЛЯТОРА

4.1 Вибір матеріалу і обладнання для виготовлення експериментального зразка пристрою

Матеріалом для прототипу моделі було обрано АБС-пластик через його основні переваги: порівняно низька ціна; відносна легкість друку; механічна міцність; легкість обробки; довговічність; ударостійкість [14].

В якості обладнання для виготовлення прототипу обрали 3Д принтер Prusa i3, через порівняно низьку вартість комплектуючих і простоту відтворення [16]. Включає в себе такі характеристики:

- максимальний розмір друку: 210 x 210 x 200мм;
- товщина шару: 0,06 – 0,3 мм;
- таксимальна рекомендована швидкість друку: 120 мм / с;
- підключення: SD карта або USB;
- кількість екструдерів – 1;
- діаметр сопла 0,4 мм (можна змінювати на інші діаметри);
- температура екструдера: 0-260 ° С;
- температура платформи: 0-120 ° С;
- друк матеріал: ABS, PLA, Elastan, CoPet, Plastan і ін.;
- діаметр нитки 1,75mm.

Обрані параметри друку:

- швидкість друку 80 мм / с;
- температура екструдера - 245 ° С;
- температура платформи для 1го слоя – 105 ° С;
- температура під час друку – 100 ° С;
- висота слою – 0,2 мм.

#### 4.2 Аналіз масо-габаритних характеристик отриманого зразка

Отримані деталі мали вагу:

- основна базова поверхня – 68 г;
- поверхня інструменту маніпулятора – 23 г;
- допоміжний диск – 12 г;
- допоміжний штифт -4 г;

Через властивість розігрітого пластику до усадки, ширина, довжина та висота поверхні інструменту та базової поверхні встановлення інструменту зменшилися на 0,1мм згідно ескізу, що не вплинуло на функціональні властивості. Через неякісний обдув моделі, основна поверхня інструменту мала випуклу форму, що вимагало додаткової механічної постоброби. За цією ж причиною був пошкоджений корпус – розшарування декількох слоїв пластику та відрив кутів корпусу від поверхні. Також через усадку пластику додаткової постоброби потребували всі отвори для проходження в них відповідного штифту [17].

#### 4.3 Порівняння отриманих експериментальних результатів з теоретичними розрахунками

Через невірно обрані параметри для друку, ймовірно через недостатньо високу температуру столу, нерівномірне остигання та незахищеність корпусу 3Д принтеру від зовнішніх впливів (протяги вітру та інші) – модель відірвалася від столу під час друку, що призвело до пошкоджень корпусу. Через високу швидкість друку погіршилася якість друку, а саме неоднорідність слоїв та додаткові артефакти у вигляді наростів пластику, в непотрібних місцях, що призвело до необхідності збільшеної механічної постоброби. Роздруковані деталі після механічної постоброби можна спостерігати на рис. 4.1.

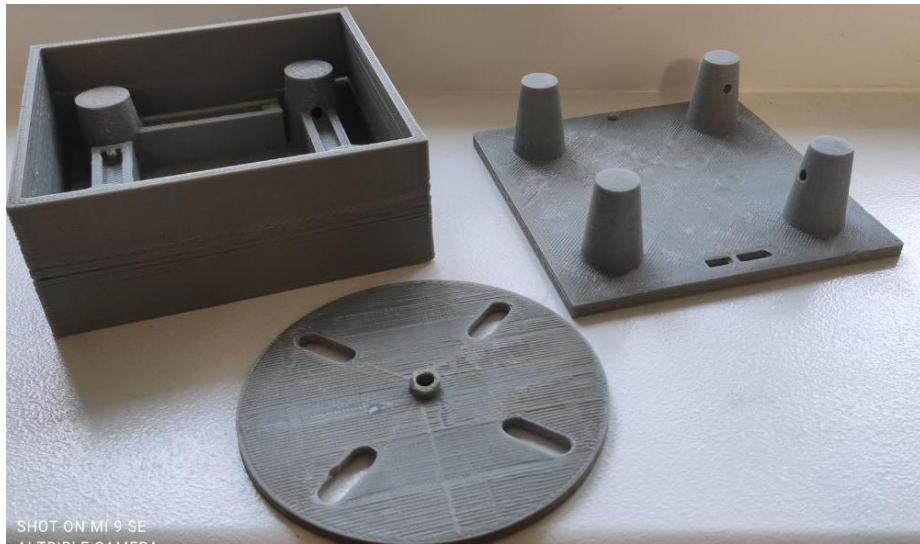
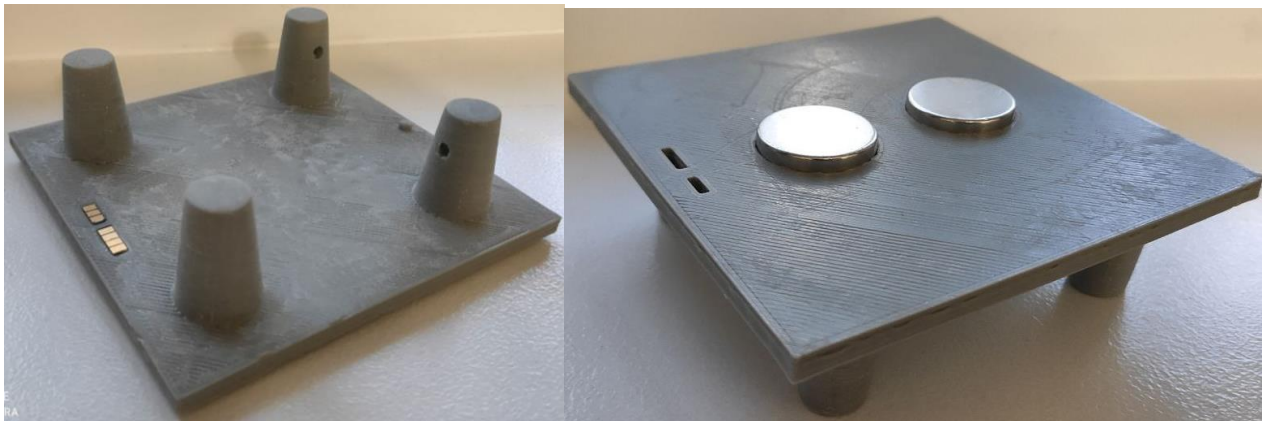


Рисунок 4.1 – Роздруковані деталі

Зібрану основу інструменту маніпулятора можна спостерігати на рис. 4.2.



а)

б)

Рисунок 4.2 – Основа інструменту маніпулятора вигляд: а) зверху; б) знизу

Базову поверхню для встановлення інструменту з основними компонентами можна спостерігати на рис. 4.3.

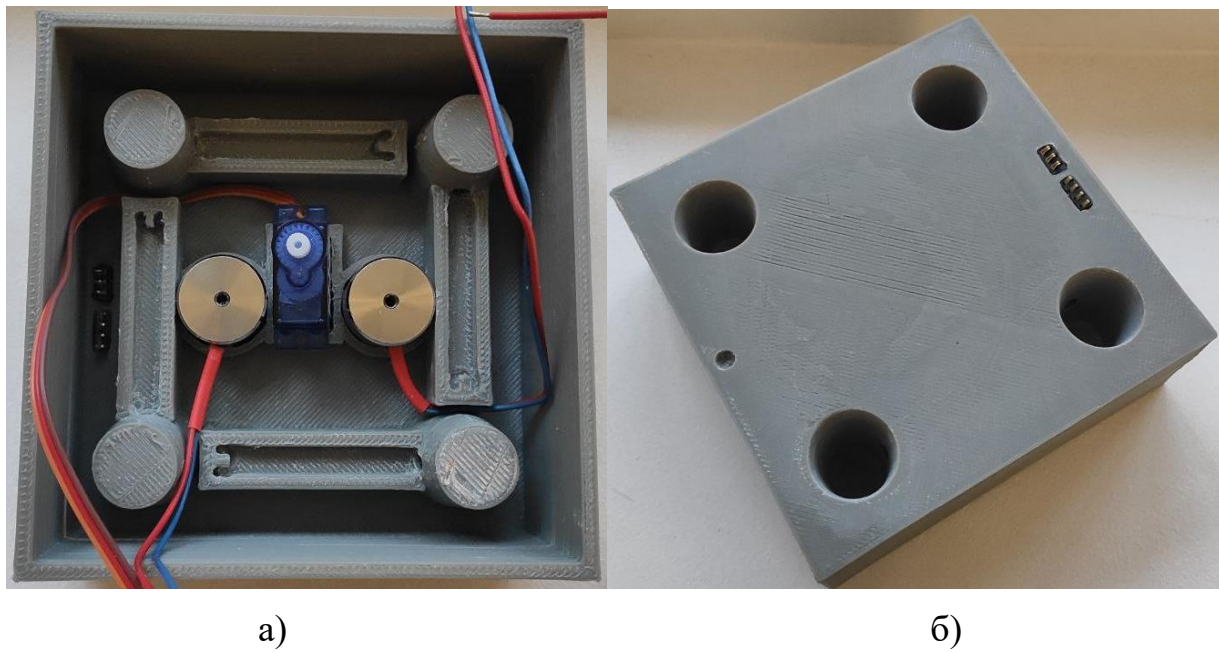


Рисунок 4.3 – Базова поверхня для встановлення інструменту вигляд: а) зверху;  
б) знизу

Допоміжний штифт для передачі зусилля з диску на стопорний штифт можна спостерігати на рис. 4.4.



Рисунок 4.4 – Зібраний стопорний та допоміжний штифт

Наступним кроком – підключили елементи керування згідно схеми (рис. 2.13).

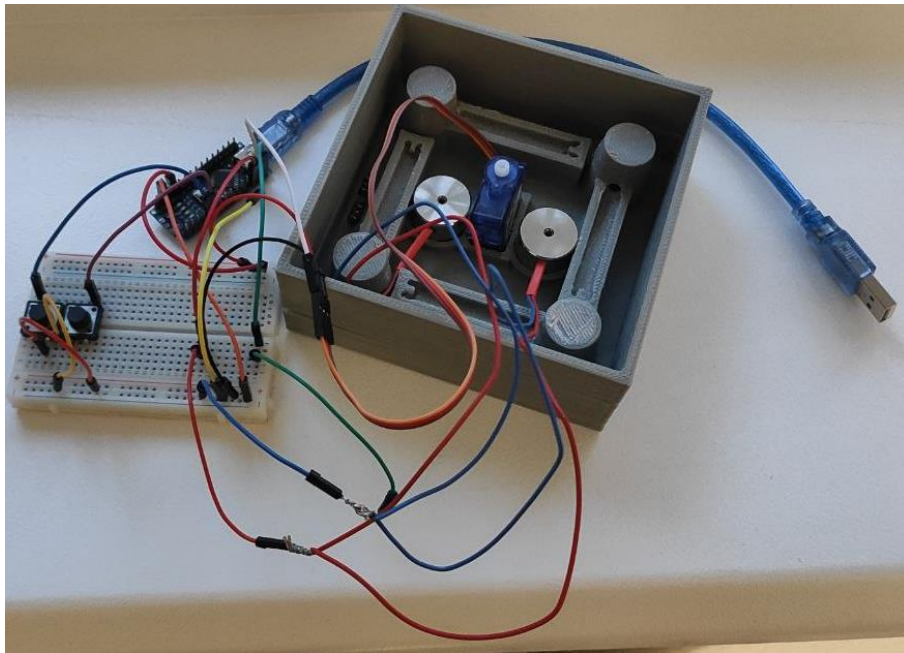


Рисунок 4.5 – Підключені елементи керування згідно схеми

Зібрали диск з штифтом, рис. 4.6.

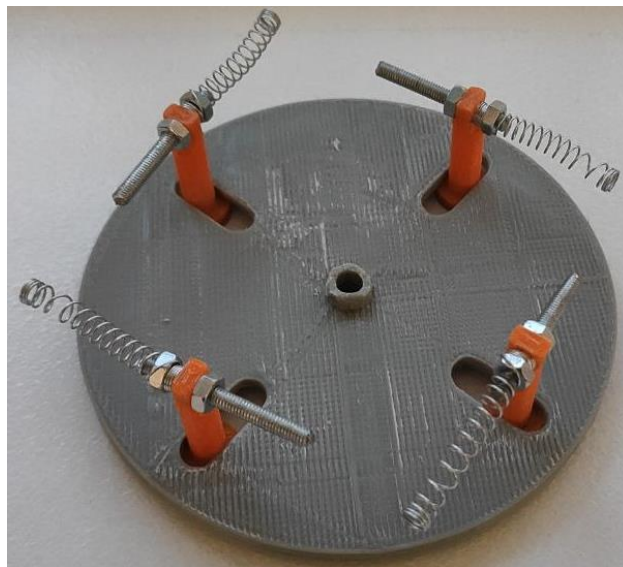


Рисунок 4.6 – Зібраний диск з штифтом

Повністю зібрали корпус з елементами керування, рис. 4.7.

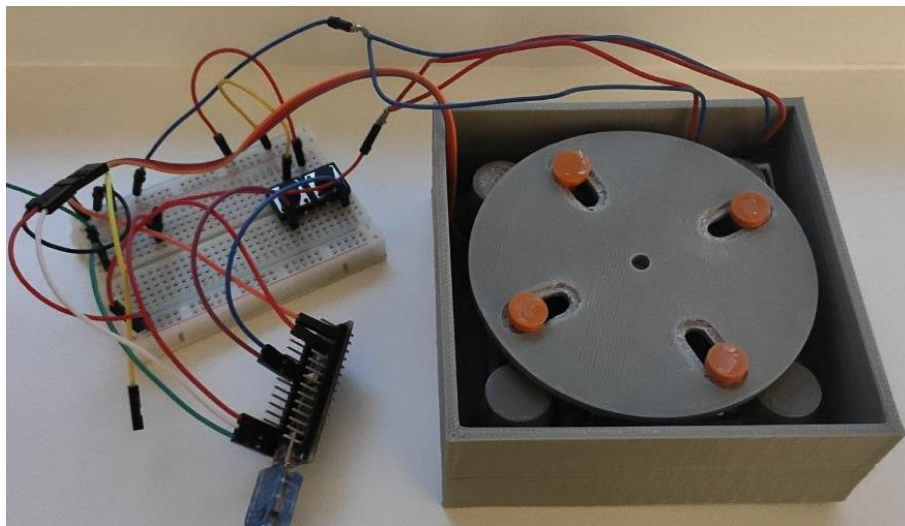


Рисунок 4.7 – Зібрана модель пристрою для швидкої заміни інструменту маніпулятора

Розробили програмний код управління сервоприводом та електромагнітом для плати Ардуіно, додаток А.

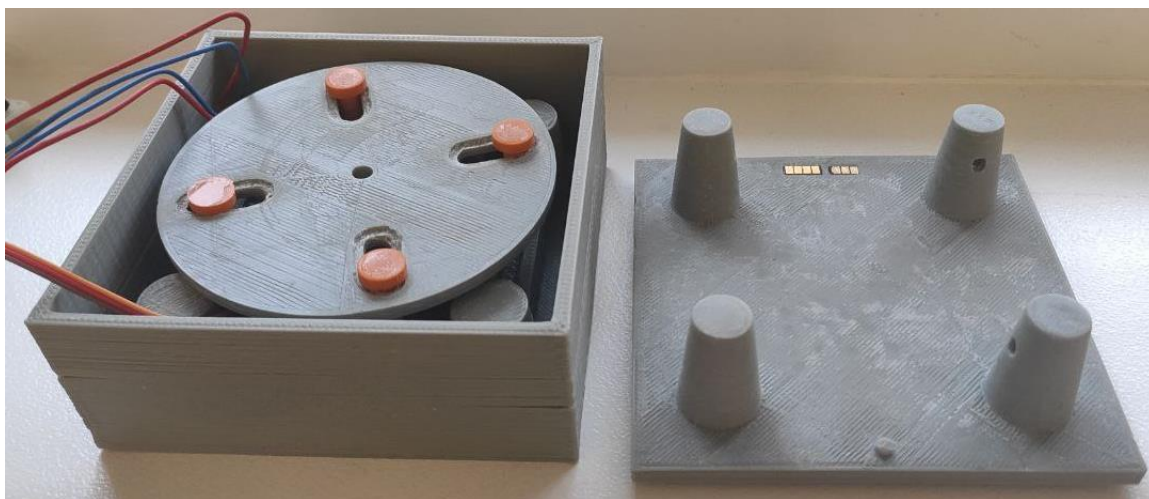


Рисунок 4.8 – Відстикована основна базова поверхня та інструмент

Дотримуючись алгоритму встановлення інструменту – стикували базову поверхню та інструмент, що відобразили на рис. 4.8.

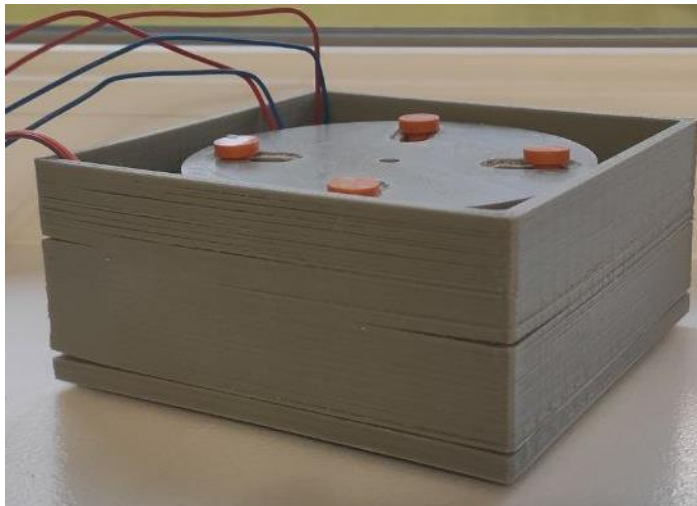


Рисунок 4.8 – Стикована базова поверхня та інструмент

#### 4.4 Висновки до 4 розділу

Згідно до розробленої моделі в попередньому розділі, роздрукували макет на 3Д принтері. Через невірно обрані параметри друку та неврахування властивостей усадки пластику, макет потребував збільшеної механічної постобробки, відхилення від розрахункових значень становлять приблизно 0,1 – 0,3мм. Встановили відповідні елементи, та під'єднали згідно схеми. Створили програмний код керування сервоприводом та електромагнітом Провели стикування та відстикування інструменту та базової поверхні згідно алгоритму.

## ВИСНОВКИ

В даній роботі розглянуто різні види хвостовика та розроблено тип хвостовика для під'єднання інструменту до руки маніпулятора. Визначено конструктивні особливості місць кріплення змінних інструментів. Проаналізовано типи інструментів, що використовуються промисловими роботами та будову кріплень інструменту до маніпулятора промислового робота.

Запропоновано використовувати хвостовик конусної форми для кріплення інструменту до маніпулятора, який є надійним та відносно дешевим ніж аналоги. Після проведення аналізу базових поверхонь для встановлення інструменту маніпулятора, запропоновано використовувати уніфіковану базову поверхню.

Наведено алгоритм стикування та відстикування інструменту. Виконано необхідні розрахунки максимального навантаження на злам – 62,42 МПа, міцності на вигин – 0,499 МПа. Проаналізовано магніти та електромагніти та обрано необхідні. Розроблено ескіз базової поверхні для встановлення інструменту, основи інструменту, допоміжного диску та допоміжного штифту. Розроблена схема підключення елементів. Розроблено 3D-модель згідно відповідного ескізу. Надруковано модель, зібрано та під'єднано згідно схеми елементи керування та передачі зусилля. Розроблено програмний код для керування сервоприводом та електромагнітом. Проведено успішне стикування та відстикування згідно алгоритму.

Розроблена та зібрана модель задовольняє висунутим вимогам до міцності та надійності. Може використовуватись як альтернатива до існуючих рішень для автоматичної заміни інструменту маніпулятора зі зменшеними вимогами до точності орієнтації.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. О. Чуб, О. Сичова. Дослідження пристроїв для швидкої заміни інструменту маніпулятора промислового робота // Виробництво & Мехатронні Системи 2021: матеріали V-ої Міжнародної конференції, Харків, 21-22 жовтня 2021 р. – Харків: [електронний друк], 2021. – С. 138-140.
2. Методичні вказівки до Розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка освітньо-професійна програма Інтелектуальні технології мікросистемної (професійна або наукова) радіоелектронної техніки / Упоряд. І.Ш. Невлюдов, С.П Новоселов, О.В. Сичова. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 40 с.
3. ДСТУ 3008-2015. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. – Введ. 2016-01-01. – К.: Держстандарт України, 2015. – 29 с.
- 4 Невлюдов, І.Ш. Методичні вказівки з виконання випускної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання напряму підготовки 6.050902 “Радіоелектронні апарати” / І. Ш. Невлюдов, С. П. Новоселов, Г. В. Пономарьова – Харків: ХНУРЕ, 2010. – 39 с.
- 5 К.А. Украженко, Ю.В. Янчевский, А.А. Кулебякин, А.Ю. Торопов ЗАХВАТНЫЕ УСТРОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ Ярославль 2007. – 65 с.
- 6 Ю.Г. Козырев Захватные устройства и инструменты промышленных роботов Москва 2010. – 255 с.
- 7 Г.А. Спыну Промышленные роботы конструирование и применение 2е издание Киев «Вища школа» 1991. – 82 с.
- 8 Герман-Галкин, С.Г. Проектирование мехатронных систем / С.Г. Герман-Галкин. - СПб.: Корона - Век, 2013. – 368 с. Многооперационное

устройство с автоматической сменой инструмента. Круковец Л.В., Козырев Ю.Г., Годович Г.И., Зыбенков В.Н., Величук Л.А. - Оpubл. в Б.И, 1981, № 19.

9 Промышленные роботы манипуляторы [Электронный ресурс] : статья о видах конструкций промышленных роботов манипуляторов / Электрон. журн. – Режим доступа: <http://www.rob24.ru/promyshlennye-roboty.html>.

10 Иванов А. А. Основы робототехники. [Текст] / А. А. Иванов - НГТУ, 2011. - 201 с.

11 Предко М. Пристрої керування роботами. Схемотехніка та програмування. / М. Предко – М.: ДМК, 2004. - 202 с.

12 Autodesk Fusion 360 For Beginners : Part Modeling, Assemblies, and Drawings - Tutorial Books / 2019 – 346 с.

13 Слоун Клайн Л. Fusion 360. 3D-моделирование для мейкеров / Л. Слоун Клайн, 2020 – 288 с.

14 Афтанділянц Є.Г. Матеріалознавство / Є.Г. Афтанділянц, О.В. Зазимко, К.Г Лопатько, 2012 – 356с.

15 Холмогоров В. 3D-печать с нуля / В. Холмогоров, Д. Горьков – 2020 – 256с.

16 Thomas S. Woodson, 3D Printing for Sustainable Industrial Transformation / Thomas S. Woodson, 2015 – с. 571–576.

17 William Oropallo, Ten challenges in 3D printing [Текст] / William Oropallo, Les A. Piegl, 2015 – P. 135–148