

**Міністерство освіти і науки України**

**Луцький національний технічний університет**

(повне найменування вищого навчального закладу)

**Факультет транспорту та механічної інженерії**

(повне найменування факультету)

**Кафедра прикладної механіки та мехатроніки**

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»  
УДОСКОНАЛЕННЯ КОМБІНОВАНИХ  
ЗАХОПЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ТА ОСОБЛИВОСТІ  
ЇХ ПРОЕКТУВАННЯ**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи ІМм-21  
Боярчук Володимир Вікторович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник:  
д.т.н., професор  
Повстяной Олександр Юрійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.  
Гарант освітньої програми:  
к.т.н., доцент  
Четвержук Тарас Іванович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2024 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспорту та механічної інженерії

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Освітня програма: Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Р.Редько  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Боярчуку Володимиру Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Удосконалення комбінованих захоплюючих пристроїв та особливості їх проектування*

Керівник роботи: *Повстяной Олександр Юрійович, д.т.н., професор*, затверджені наказом закладу вищої освіти від «30» грудня 2023 р. № 452/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: 1.12.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: *технічні характеристики комбінованих затискних пристроїв*

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

*Анотація. Зміст. Вступ. 1 Аналіз сучасного стану проблеми. 2 Математичне моделювання затискних пристроїв. 3 Аналіз пристроїв автоматичної заміни захватів та модулів захоплювачів. 4 Експериментально-дослідна частина Висновки. Список використаних джерел*

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

*Тема, мета, завдання – 1 лист (ф.А.1), графіки експериментальних залежностей – 1 лист (ф.А1), загальний вигляд стискувального пристрою – 1 лист (ф.А1)*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

02.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Обґрунтування теми, огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	<i>15.09.24</i>	
2.	<i>Загальні відомості. Характеристика об'єкта дослідження.</i>	<i>01.10.24</i>	
3.	<i>Питання математичного моделювання затискувальних пристроїв</i>	<i>15.10.24</i>	
4.	<i>Розрахунок магнітної провідності потоків розсіювання</i>	<i>25.10.24</i>	
5.	<i>Безконтактні струменеві захоплювачі деталей з наскрізним циліндричним отвором</i>	<i>01.11.24</i>	
6.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	<i>20.11.24</i>	
7.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	<i>25.11.24</i>	
8.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи магістра до захисту</i>	<i>01.12.24</i>	

Здобувач вищої освіти

\_\_\_\_\_ (підпис)

Боярчук В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Повстяной О.Ю.

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Боярчук В.В. Удосконалення комбінованих захоплюючих пристроїв та особливості їх проектування. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2024.

Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел.

Метою кваліфікаційної роботи є удосконалення комбінованих захоплюючих пристроїв промислового робота з аналізом його роботи. Для досягнення мети в роботі поставлені і виконані такі задачі:

- проведено аналіз наявної в літературних джерелах інформації;
- проведені комплексні дослідження відомих схем, конструкцій і елементів захоплюючих пристроїв;
- показані результати їх вдосконалення, дослідження та експлуатації;
- виконано оцінку впливу характеристик механізмів структури конструктивних елементів на техніко-економічні показники захоплюючих пристроїв, у яких вони застосовуються;
- розроблено рекомендації щодо впровадження удосконалених захоплюючих пристроїв, які ефективно працюють у певних типах технологічного обладнання.

Об'єктом досліджень є сумарні фактори конструктивного та кінематичного характеру та математичні моделі захоплюючих пристроїв з можливістю застосування на технологічному обладнанні.

Предметом досліджень є механізми захоплюючих пристроїв, що працюють в певному технологічному обладнанні для певних цілей.

Ключові слова: технологічне обладнання, захоплюючий пристрій, магнітні потоки, струменеві захоплювачі, промисловий робот.

## ABSTRACT

Boyarchuk V.V. Improvement of combined gripping devices and features of their design. Manuscript.

Master's qualification work OP "Applied Mechanics" specialty 131 Applied Mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2024.

Master's qualification work consists of an introduction, 4 sections, conclusions, list of sources used.

The purpose of the qualification work is to improve combined gripping devices of an industrial robot with an analysis of its operation. To achieve the goal, the following tasks were set and accomplished in the work:

- an analysis of the information available in literary sources was carried out;
- comprehensive studies of known schemes, designs and elements of gripping devices were carried out;
- the results of their improvement, research and operation were shown;
- an assessment of the influence of the characteristics of the mechanisms of the structure of structural elements on the technical and economic indicators of gripping devices in which they are used was carried out;
- recommendations have been developed for the implementation of advanced gripping devices that work effectively in certain types of technological equipment.

The object of research is the total factors of a constructive and kinematic nature and mathematical models of gripping devices with the possibility of application in technological equipment.

The subject of research is the mechanisms of gripping devices that work in certain technological equipment for certain purposes.

Keywords: technological equipment, gripping device, magnetic fluxes, jet grippers, industrial robot.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ.....	9
1.1 Огляд існуючих технічних рішень .....	9
1.2 Можливості розширення функціональних характеристик.....	17
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАХОПЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ.....	26
2.1 Математична модель безконтактних магнітно-струменевих захоплювачів.....	26
2.1.1.1 Основні вимоги до проектування і експлуатації магнітно- струменевих захоплювачів.....	26
2.1.1.2 Огляд магнітних потоків і заміщення магнітної системи еквівалентною електричною схемою.....	28
2.2 Розрахунок магнітної провідності потоків розсіювання.....	30
2.2.1 Розрахунок магнітної провідності робочих повітряних зазорів із врахуванням “випинання” магнітного поля.....	30
2.2.2 Розрахунок магніторушійної сили котушки.....	33
2.3 Результати досліджень магнітно-струменевих захоплювачів.....	38
3 АНАЛІЗ ПРИСТРОЇВ АВТОМАТИЧНОЇ ЗАМІНИ ЗАХВАТІВ ТА МОДУЛІВ ЗАХОПЛЮВАЧІВ.....	40
3.1 Безконтактні струменеві захоплювачі деталей з наскрізним циліндричним отвором.....	40
3.2 Безконтактні струменеві захоплювачі деталей з внутрішнім глухим отвором.....	47
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	51
4.1 Особливості проектування комбінованих захоплюючих пристроїв.....	51
4.1.1 Технічні вимоги до струменевих захоплювачів.....	51
4.1.2 Технічні характеристики струменевих захоплювачів.....	53

4.2 Проектування стикувального пристрою руки промислового робота....	58
4.3 Проектування магнітно-струменевого захвата.....	65
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68
Додатки.....	70

## ВСТУП

Актуальність вдосконалення технологічних операцій на сучасному виробництві обумовлюється високим рівнем якості продукції, що випускається, підвищенням її конкурентоздатності на вітчизняному та світовому ринку, рядом інших важливих факторів.

Надзвичайно важливими в даній галузі є розробки і дослідження сучасних автоматичних пристроїв завантаження, розвантаження робочих машин штучними об'єктами до і після обробки у вигляді самостійних механізмів. Власне, досвід розробок і експлуатації таких технічних пристроїв дозволяє сьогодні створювати конструкції, які відрізняються простотою, надійністю, універсальністю, довговічністю, роботоздатністю і економічністю.

Ще одна безумовна актуальність – це розширення об'єму виробництва, покращення асортименту та якості продукції, зменшення рівня браку за рахунок нового сучасного технічного оснащення підприємства. Безумовно, основними засобами автоматизації технологічних процесів є пристрої завантаження і транспортування виробів.

Захоплюючі пристрої – це один із основних конструктивних елементів пристроїв завантаження (маніпуляторів, промислових роботів, живильників). Вони призначені для захоплення й утримування у процесі маніпулювання заготовок і деталей.

*Метою кваліфікаційної роботи є удосконалення комбінованих захоплюючих пристроїв промислового робота з аналізом його роботи.*

Для досягнення мети в кваліфікаційній роботі поставлені такі *задачі*:

- провести аналіз наявної в літературних джерелах інформації;
- здійснити комплексні дослідження відомих схем, конструкцій і елементів захоплюючих пристроїв;
- отримати результати їх вдосконалення, дослідження та експлуатації;
- виконати оцінку впливу характеристик механізмів структури конструктивних елементів на техніко-економічні показники захоплюючих пристроїв, у яких вони застосовуються;

— розробити рекомендації щодо впровадження удосконалених захоплюючих пристроїв, які ефективно працюють у певних типах технологічного обладнання.

*Об'єкт дослідження* – сумарні фактори конструктивного та кінематичного характеру та математичні моделі захоплюючих пристроїв з можливістю застосування на технологічному обладнанні.

*Предмет дослідження* - механізми захоплюючих пристроїв, що працюють в певному технологічному обладнанні для нових цілей.

Особистий внесок магістранта. Основні результати та положення, рекомендації отримані автором самостійно з відповідним консультуванням наукового керівника.

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ

## 1.1 Огляд існуючих технічних рішень

Захоплюючі пристрої поділяються на:

- механічні;
- пневматичні;
- магнітні;
- адгезійні;
- електростатичні.

При механічному принципі немає інших сил взаємодії окрім контактних, які виникають, коли робочий елемент тисне на об'єкт.

Пневматичні захоплювачі, в свою чергу, розділяються на вакуумні, камерні, струменеві. Вони застосовуються для легких об'єктів маніпулювання.

Магнітні захоплювачі можна розділити на магнітні (з постійними магнітами) і електромагнітні, застосовуються для маніпулювання феромагнітними об'єктами.

Адгезійні та електростатичні захоплювачі використовуються для маніпулювання об'єктами невеликої маси, що виготовлені з немагнітних матеріалів, для захоплення невеликих неметалевих об'єктів.

Характерною ознакою технічних виробів є висока чутливість до механічного контакту. Через низьку міцність матеріалу, з якого вони виготовлені (скло, кераміка, прес-порошки тощо), або особливості їх конструкції (мала товщина стінок, тонкошарові покриття) тому і виникає завдання виключення ушкоджень. Це може бути вирішене застосуванням механічних захоплювачів з пружними затискними елементами.

Камерні захоплюючі пристрої з еластичними камерами застосовують для переносу крихких виробів невеликої маси, неправильної форми або зі значними відхиленнями форми і розмірів. Ці захоплюючі пристрої забезпечують необхідну жорсткість і рівномірний розподіл зусиль затиску на поверхні об'єкта. Робота заснована на деформації еластичної камери від тиску повітря або рідини. Їх

застосовують для утримання деталей як за зовнішню, так і за внутрішню поверхню.

Основними недоліком усіх камерних захоплювачів є низька довговічність, низькі силові характеристики, неможливість захоплення забруднених (маслом, стружкою) та нагрітих деталей також.

Робочим елементом вакуумних захоплювачів є присоска конічної форми з гуми або пластмаси. По трубці з порожнини присоски відсмоктується повітря, в ній виникає розрідження й об'єкт притягується до присоски. Вакуумні захоплюючі пристрої придатні для захоплення як сферичних так і плоских об'єктів.

За допомогою вакуумного насоса забезпечується створення вакууму. Тут розрідження створюється за рахунок енергії стиснутого повітря. Воно може бути створено одним ежектором для декількох присосок одночасно, або для кожної присоски може бути окремий ежектор. Потрібне для підняття деталі розрідження створюється притисканням до неї захоплювача, що приводить до видалення повітря з простору.

Тиск усередині камери істотно залежить від повітря, яке є по контуру присоски. Різниця тисків складає декілька десятих атмосферного тиску. Коли плоска деталь має витягнуту форму та отвори і прорізи, необхідно шукати суцільні площадки між отворами, по можливості ближче до центру мас. Для розширення можливостей використовують – або змінюють форму присоски в плані, або виконують вакуумний захоплюючий пристрій у вигляді декількох присосок. Кріплення присосок до рами тому робляться шарнірними. Це робиться для того, щоб перекося не позначалися на надійності контакту присоски з об'єктом. Якщо захоплюється тонкий лист, що сильно прогинається під власною вагою, то шарнірне закріплення дає можливість пристосовуватися до змін форми цього листа.

Вакуумні захоплювачі використовуються для захоплення об'єктів за криволінійні поверхні.

Загальним недоліком вакуумних захоплювачів є низька надійність закріплення замаслених об'єктів після їх механічної обробки. Тому доводиться

обмежувати швидкість маніпулювання об'єктом, а це, в свою чергу, негативно відбивається на продуктивності виконання технологічних операцій.

Для забезпечення герметичності камери вакуумування краї присоски роблять широкими. При обслуговуванні пресів завантаження заготовки здійснюється роботом із вакуумним захоплювачем, а після вирубки отворів і гнуття її можна захопити механічним захоплювачем.

Електромагнітні захоплювачі представляють собою корпус, який виконаний з низько вуглецевої сталі. Усередині нього розміщені котушки, які захищені від ушкоджень листом із марганцевистої сталі. Найпростішим є кільцевий електромагніт з одною обмоткою. Для збільшення несучої здатності електромагніти виконують багатополюсними. Магнітні захоплюючі пристрої роботів із плоскою поверхнею робочого елемента при захопленні об'єктів за площину мають велику несучу здатність. Спеціальні електромагнітні захоплюючі пристрої високої несучої здатності можна отримати тоді, коли форма їх робочої поверхні не плоска.

При захопленні тонкостінних об'єктів електромагніти встановлюють на одній рамі, а при можливості великих деформацій об'єкта закріплення робиться не жорстким.

Важливою перевагою електромагнітних захоплюючих пристроїв є можливість дистанційного захоплення. Для живлення електромагнітів використовується постійний струм. Але, щоб електромагнітне поле проникало тільки на малу глибину, ще використовується живлення змінним струмом. При цьому відбувається індукційний нагрів, що може бути корисним при відділенні замасленої заготовки від стосу.

Недоліком електромагнітних захоплювачів є можлива дезорієнтація об'єктів під час включення і відключення живлення котушки.

Як і у випадку вакуумних захоплювачів, замаслювання або зволоження поверхні деталі може привести до зісковзування її з магніту при транспортуванні. При використанні магнітних захоплювачів варто взяти до уваги ще такі моменти. Якщо робот застосовується для операцій металообробки, то до магніту може прилипати стружка, його потрібно періодично очищати.

Необхідно врахувати можливість намагнічування деталі в процесі її захоплення і транспортування магнітним захоплювачем.

Електромагнітний захват складається з корпусу 1, що є П-подібним в поздовжньому сиченні стаканом, і вкручуваного в нього осердя 2 з упором 3 на кінці, каркаса 4 з немагнітного матеріалу, що вільно переміщається уздовж осердя 2 і має виточку під упор 3.

На каркасі 4 намотана обмотка збудження 5 і обмотка розмагнічування 6 відповідно для захоплення і скидання феромагнітної деталі 7.

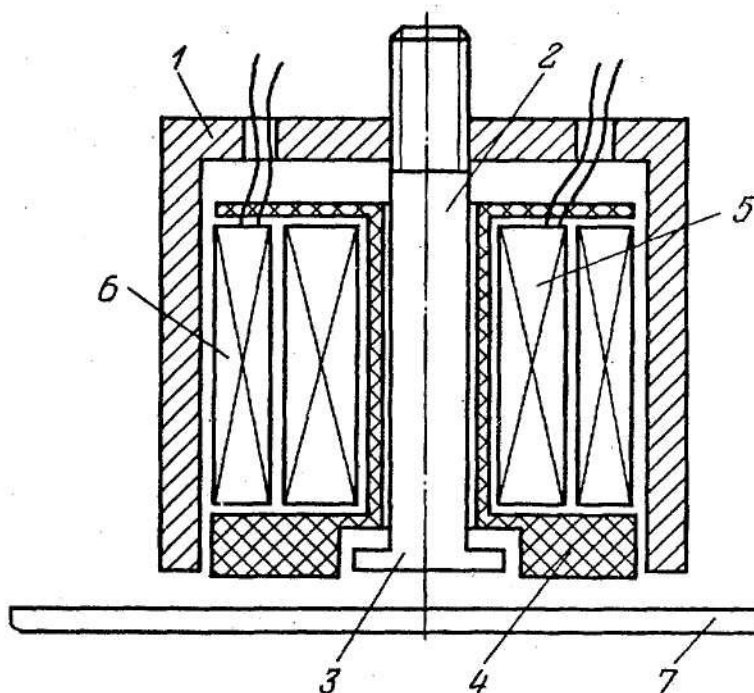


Рисунок 1.1 – Електромагнітний захват

Захоплення деталі відбувається при подачі постійної напруги на обмотку 5. Магнітний потік, пройшовши по корпусу 1 і осерді 2, замкнеться через деталь 7, і вона буде відповідним чином закріплена. Під дією магнітного поля каркас 4 з обмотками 5 і 6 переміщається вгору до упору в корпус 1, що забезпечує усунення дії каркаса 4 на деталь 7.

Для відділення деталі 7 від захвата знімають постійну напругу з обмотки 5 і одночасно подають імпульс напруги. Магнітний потік, який створюваний цією обмоткою, відповідно компенсує залишкову магнітну індукцію феромагнітної деталі 7 та створює силу, яка з силою тяжіння катушки переміщає її вниз і

впливає на деталь 7 торцем каркаса 4, створюючи додатково повітряний зазор між електромагнітом і деталлю 7.

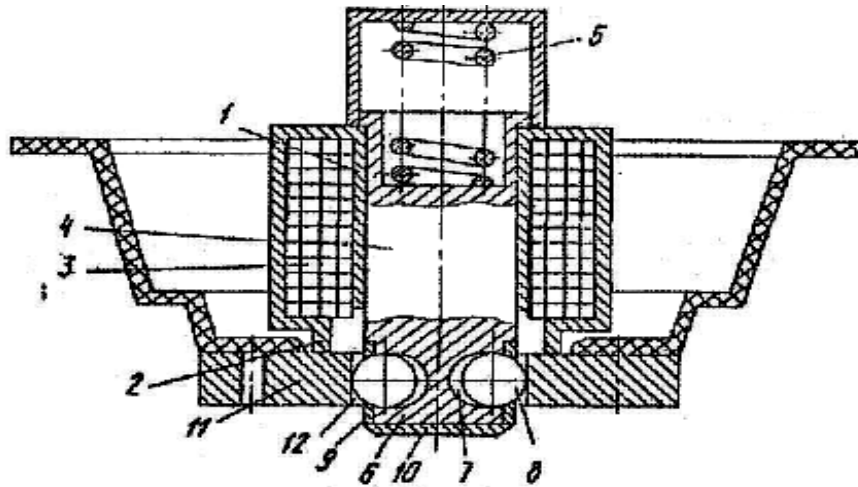


Рисунок 1.2 – Електромагнітний захват в положенні захвату деталі

Для захвату деталі 11 з отвором 12 захват опускається і при цьому осердя 4 входить в отвір 12 із зазором. Включається катушка 3, а кульки 8 під дією магнітного поля переміщуються в зазорі до контакту з поверхнею. У результаті

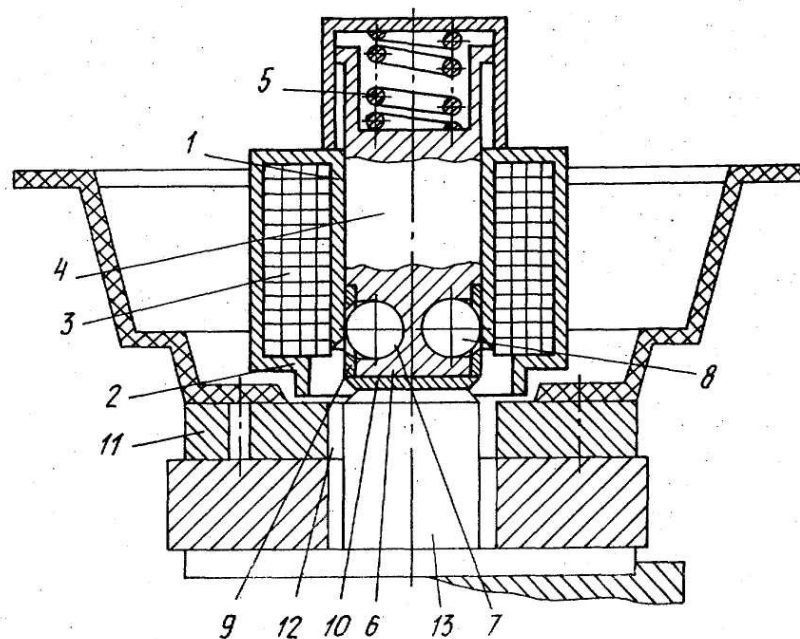


Рисунок 1.3 - Електромагнітний захват в положенні встановлення деталі на основу

того, що кульки 8 заповнюють простір зазора, магнітний потік значно зростає і відбуваються надійне захоплення деталі 11.

Після цього деталь 11 переноситься на позицію установки її на основу 13 і захват опускається. При цьому осердя 4 від взаємодії з основою 13 втоплюється, а кульки 8 виходять з отвору 12 деталі 11. Магнітний потік відповідно слабшає, і після відключення катушки 3 захват повністю відпускає деталь 11, вона залишається на основі 13, а захват підіймається.

Електромагнітний захват (рис.1.4), містить обмотку, яка встановлена на корпусі, і осердя, яке розміщене в корпусі всередині обмотки. Він відрізняється тим, що для розширення технологічних можливостей шляхом здійснення з'єднання захоплюваних деталей, на торці осердя відповідно виконаний паз для формування головки кріпильного елемента. При цьому осердя вільно встановлене в корпусі і підпружинене до нього.

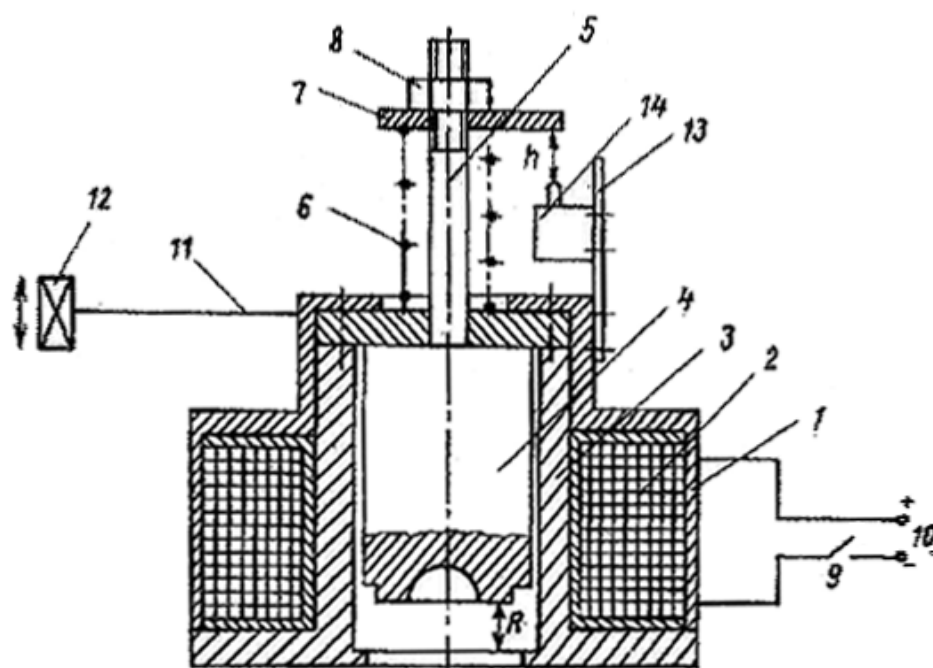


Рисунок 1.4 – Електромагнітний захват

Цей захват містить корпус 1, обмотку 2 катушки на каркасі 3, осердя 4, один торець якого жорстко зв'язаний зі штоком 5 і підпружинений відносно корпусу 1 пружиною 6 за допомогою шайби 7 і регулювального гвинта 8. На другому торці осердя 4 виконаний паз для формування кріпильного елемента.

Обмотка 2 через управляючий контакт 9 підключена до джерела постійного струму 10. Корпус 1 розміщений на кінцевій ланці 11 робота, яка зв'язана з приводом 12. На корпусі 1 за допомогою тримача 13 закріплений датчик кінцевого положення 14. Деталь для збірки містить пластмасовий вкладиш 15 з кріпильним елементом, виконаним у вигляді циліндричного виступу 16, що входить в круглий паз металевої обойми 17. Пластмасовий вкладиш 15 розташований на опорній площині 18.

У початковому положенні контакт 9 розімкнений, осердя 4 знаходиться в верхньому положенні.

За допомогою приводу 12 рука робота 11 переміщає електромагніт до місця знаходження металевої обойми 17. При цьому контакт 9 замикається і з джерела 10 на обмотку 2 подається струм. При цьому осердя 4 втягується в порожнину каркаса 3 до нижнього упора, а його торець розташовується на рівні нижнього торця корпусу 1. При цьому осердя 4 намагнічується і нагрівається. При зіткненні намагніченого осердя 4 і обойми 17 відбувається процес захоплення. Він переміщається і встановлюється на пластмасовий вкладиш 15, що знаходиться в заданому місці опорної площини 18. При цьому приводом 12 електромагніт переміщається на певну відстань до упора. Виступ 16 вкладиша 15 впирається в сердечник 4 і зміщує його на необхідну відстань.

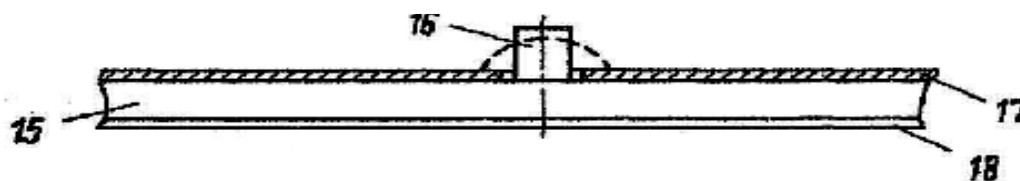


Рисунок 1.5 – Деталі в зборці

При з'єднанні з виступом 16 осердя 4 розігріває його і деформує його відповідно до формоутворювальної поверхні торця. При цьому осердя 4 зміщується на відстань до початкового стану. Шайба 7 тисне на контактний датчик 14, який спрацьовує. Відповідний сигнал з його виходу сигналізує про завершення розвальцьовування кріпильного елемента. Контакт 9 розмикає ланцюг живлення обмотки 2, осердя 4 розмагнічується і відпускає обойму 17.

Пружиною 6 осердя 4 переміщається в початкове положення. Далі цикл повторюється.

За допомогою гвинта 8 підбирається оптимальний режим нагріву і формування тиском кріпильного елемента 16 вкладиша 15.

Відомий електромагнітний захват, містить корпус з проточкою на робочій поверхні, відповідну катушку живлення, яка розміщена в проточці корпусу, і систему управління переміщенням захвата.

На рис.1.6 зображено захват та його загальний вигляд, на рис.1.7 – вигляд зверху.

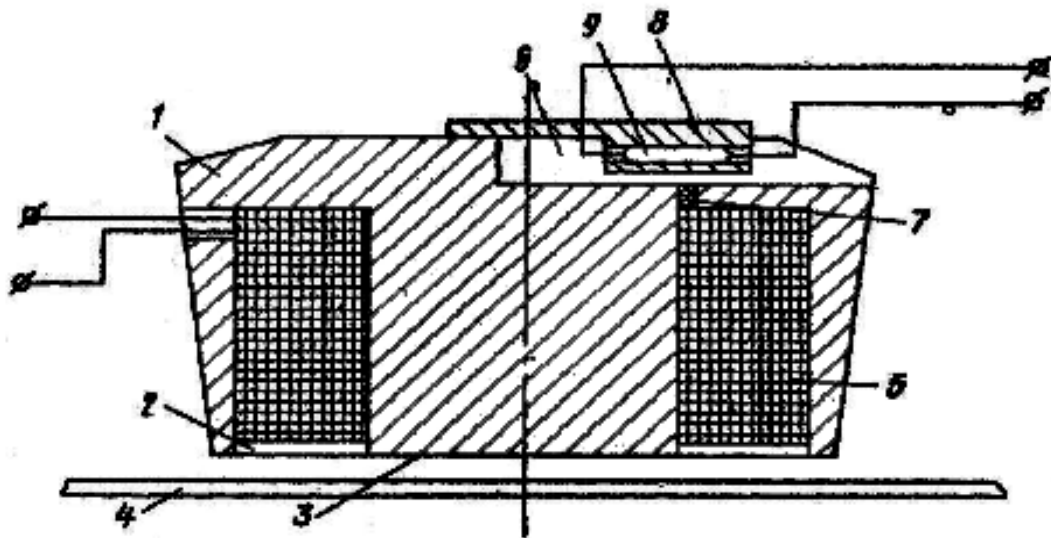


Рисунок 1.6 – Електромагнітний захват, загальний вигляд

Недоліком цього захвата є необхідність введення додаткового контролю кількості подаваних заготовок, що обумовлена розсіянням магнітного поля і неможливістю встановлення його порогового значення для забезпечення контролю.

Найближчим до винаходу є електромагнітний захват для плоских заготовок. Він містить корпус з проточкою на робочій поверхні, катушку живлення, розміщену в проточці корпусу та систему управління переміщенням корпусу.

Недолік пристрою – можливість захоплення декількох злиплих заготовок і подача їх в робочу зону технологічного устаткування, що обумовлене відсутністю пристрою для контролю кількості заготовок.

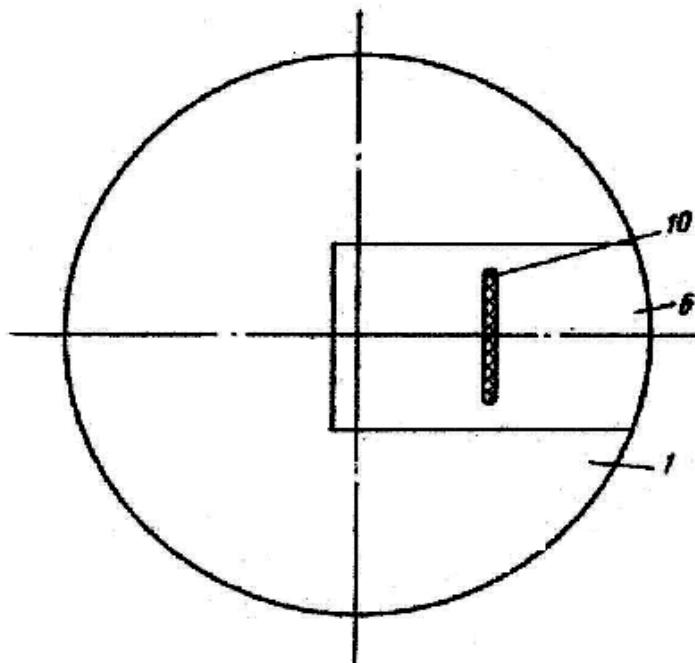


Рисунок 1.7 - Електромагнітний захват, вигляд зверху

## 1.2 Можливості розширення функціональних фарахтеристик

Можливості розширення функціональних фарахтеристик досягається тим, що для плоских заготовок, що містить корпус з проточкою на робочій поверхні, катушку живлення, розміщену в проточці корпусу, систему управління переміщенням корпусу виконаний паз, а вже між пазом і катушкою живлення виконаний інший наскрізний проріз. Цей захват оснащений пластиною з немагнітного матеріалу, вона встановлена в пазі корпусу, і встановлена з можливістю переміщення вздовж осі захвату герметизованим магнітокерваним контактом. Захват містить наповнювач з немагнітного матеріалу, що розміщений в прорізі.

Електромагнітний захват для плоских заготовок містить корпус 1 з проточкою 2 на робочій поверхні 3, що призначена для утримання заготовки 4.

В проточці 2 розміщена катушка живлення 5. Захват зв'язаний з системою (не показана) управління переміщенням його корпусу 1.

У корпусі 1 над катушкою 5 виконаний паз 6, а між пазом 6 і катушкою 5 - наскрізний проріз 7. В пазі 6 корпусу 1 розміщена пластина 8 з немагнітного матеріалу, на якій з можливістю переміщення вздовж осі захвату встановлений герметизований магнітокерований контакт 9, підключений до системи управління переміщенням корпусу 1 захвата. В прорізі 7 розміщений наповнювач 10 з немагнітного матеріалу.

При подачі постійної напруги на катушку 5 магнітні сили, що розвиваються, притягають заготовку 4 до робочої поверхні 3 корпуса 1 і замикаються через неї. Частина магнітного потоку проходить через проріз 7, який є підвищеним магнітним опором. Над прорізом 7 виникає розсіяне магнітне поле, яке вловлюється герметизованим магнітокерованим контактом 9.

У разі захоплення двох і більше заготовок загальний магнітний опір ланцюга змінюється, а магнітний потік відповідно збільшується.

Аналогічно збільшується деформація магнітного потоку над прорізом 7. Переміщаючи контакт 9 відносно корпусу 1, встановлюють необхідну відстань між контактом 9 і прорізом 7. Цим забезпечують необхідну величину сигналу, що відключає переміщення захвату через систему управління.

Це дозволяє розширити функціональні можливості відповідного захоплення і забезпечити нормальну експлуатацію технологічного устаткування.

Магнітно-вакуумний захват містить електромагніт 1 і вакуумну камеру, яка складається з корпусу 2 і закріпленої на ньому гумовою присоски 3.

Корпус 2 вакуумної камери встановлений на бічній поверхні електромагніту 1 та надає можливість вертикального переміщення відносно останнього.

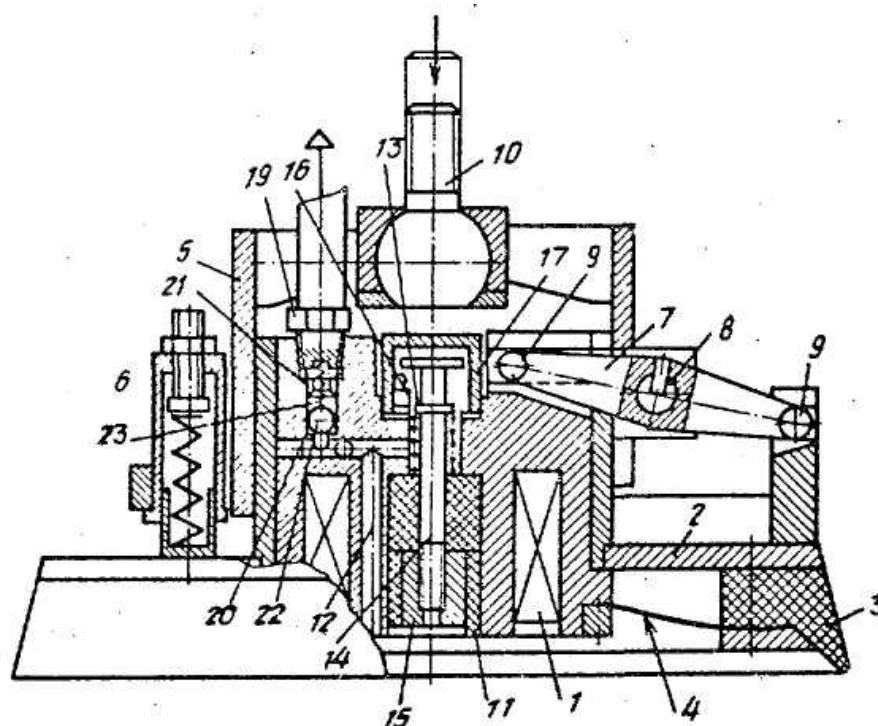


Рисунок 1.8 – Загальний вигляд захвата

До електромагніту 1 і присоски 3 кріпиться діафрагма 4, яка герметизує стик спряжуваних поверхонь електромагніту і корпусу 2ю

На бічній поверхні електромагніту 1 встановлений стакан 5 з можливістю вертикального переміщення відносно останнього. Стакан 5 підпружинений пружинами 6 відносно корпусу 2 вакуумної камери. В стакані 5 встановлені коромисла 7, мають можливість обертання у вертикальних площинах на осях 8, жорстко сполучених з коромислами. Коромисла 7 сполучені кінематично з електромагнітом 1 і корпусом 2 вакуумної камери. На кінцях важелів коромисел 7 виконані циліндричні виступи 9, а в корпусах – пази для розміщення важелів коромисел і горизонтальні пази для розміщення виступів коромисел.

У стакані 5 виконана кулькова опора з пальцем 10, за допомогою нього захват з'єднується з вантажонесучим пристроєм.

В електромагніті 1 встановлений давач 11 контролю магнітних властивостей матеріалу деталі, що містить втулку 12, в якій встановлено стержень 14 із

закріпленим на ньому постійним магнітом 15, і мікроперемикач 16, встановлений в електромагніті 1 з можливістю взаємодії зі стержнем 14. Втулка 12 виконана з немагнітного матеріалу. Мікроперемикач 16 сполучений з системою включення електромагніту 1. Давач 11 герметично закритий ковпачком 17. В електромагніті 1 розміщені сполучені між собою повітрепровідні канали 18. В одному з них встановлений підвідний штуцер 19 і зворотний клапан, що містить нижнє сідло 20, верхнє сідло 21, кульку 22 і пружину 23, встановлену між кулькою 22 і штуцером 19. В іншому каналі 18 (див.фіг. 3) встановлений давач контролю форми поверхні деталі, що містить корпус 24 із встановленими в ньому діафрагмою 25 і підпружиненим пружиною 26 штоком 27. На корпусі 24 встановлено з можливістю взаємодії з штоком 27 мікроперемикач 28, сполучений з системою включення подачі вакууму.

На стакані 5 встановлений давач контролю наявності деталі, який виконаний у вигляді потенціометра 29.

Захват встановлюється на захоплювану відповідну деталь. Корпус 2 вакуумної камери переміщається вгору і через коромисла 7 переміщає стакан 5 і опускає електромагніт 1 поки він не торкнеться деталі.

Поворот коромисла 7 викликає поворот двигуна потенціометра 29, який міняє подану на нього напругу, даючи сигнал в систему управління, що корпус 2 вакуумної камери і електромагніт 1 лежать на деталі.

При опусканні електромагніту 1 об'єм вакуумної камери зменшується. Якщо поверхня деталі утворює з вакуумною присоскою 3 герметичну систему, то повітря під тиском віджимає діафрагму. Шток 27 натискає на мікроперемикач 28, який сполучений з ланцюгом управління вакуумної системи. Якщо деталь має отвір, то підвищеного тиску в камері не утворюється. Давач контролю форми поверхні не спрацює і в систему управління не поступає сигналу про те, що деталь можна захопити вакуумною присоскою.

Після установки на деталь електромагніту 1 магніт 15 притягнеться до деталі і стержень 14 натисне на мікроперемикач 16, який дає в систему управління сигнал про те, що деталь можна захопити електромагнітом 1. У випадку, якщо деталь немагнітна, то постійний магніт 15 нерухомий, мікроперемикач 16 не спрацьовує. За наявності в системі управління сигналу від давача контролю форми поверхні немагнітна деталь буде захоплена вакуумною присоскою 3.

Якщо в систему управління поступили обидва сигнали, то можна вибрати будь-який захват. І перевага надається електромагнітному, як більш економічному. Якщо в систему управління поступив сигнал тільки від давача контролю форми поверхні, то система управління включає вакуум. Під дією вакууму кулька 22 відкриває отвір, що сполучає порожнину присоски 3 з вакуумною системою.

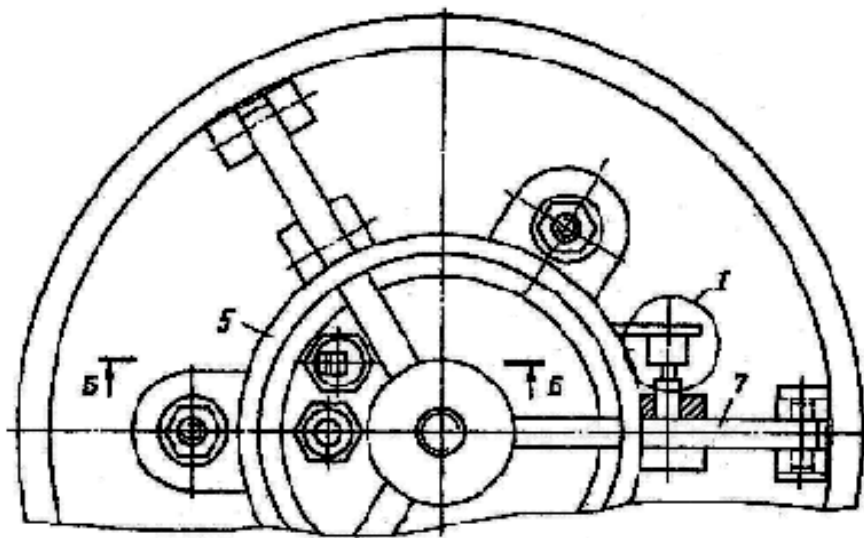


Рисунок 1.9 – Вигляд А (рис.1.8)

Захоплена вакуумною присоскою 3 або електромагнітом 1 деталь піднімається вантажозахватним пристроєм і транспортується.

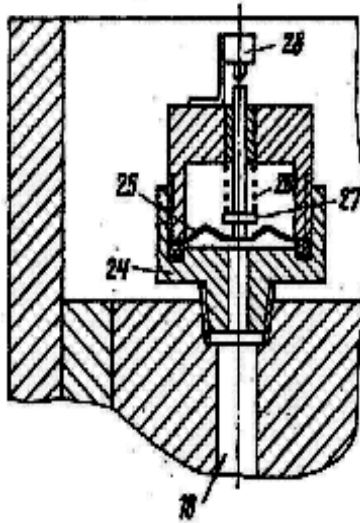


Рисунок 1.10 – Розріз Б-Б (рис.1.9)

Якщо деталь феромагнітна, то електромагніт 1 підіймається, коромисла 7 повертаються в первинне положення. Двигун 30 потенціометра 29 займає початкове положення, а постійний магніт 15 під дією магнітного поля електромагніту 1 вже не зможе повернутися в початкове положення.

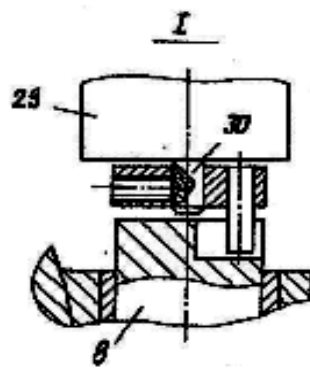


Рисунок 1.11 – Розріз I (рис.1.9)

У системі управління є сигнали, що деталь феромагнітна з суцільною плоскою поверхнею, але не захопилася електромагнітом. Захват знову опускається на деталь, потім включається додатково вакуумна система і деталь захоплюється і електромагнітом 1, і вакуумною присоскою 3. Тут зв'язок електромагніту 1 і корпусу 2 вакуумної камери через коромисла, що встановлені

на стакані 5, забезпечує можливість одночасної роботи електромагніту 1 і вакуумної присоски 3.

Привід захвату пневмоциліндра 1, на штоку якого закріплений корпус 2. Він оснащений вакуумною присоскою 3, робоча порожнина 4 якої каналом 5 сполучена з ежектором, Вхід 6 ежектора сполучений через пневмоклапан 7 і електропневмоклапан 8 з джерелом 9 стислого повітря. Пневмоклапан 7 знаходиться в стані "Відкрито", а при її наявності - в стані "Закрито" за рахунок постійного магніту 11. Корпус 2 оснащений також магнітом 12, який призначений для захоплення феромагнітних деталей. Тут захват забезпечений електропневмоклапаном 13, який сполучений з джерелом 9 стислого повітря і з порожнинами 14 і 15 (рис.1.12).

Коли на електропневмоклапани 8 і 13 не подані сигнали управління, тоді за рахунок цього поршнева порожнина 14 циліндра 1 сполучена з атмосферою, а штокова порожнина 15 - з джерелом 9 стислого повітря.

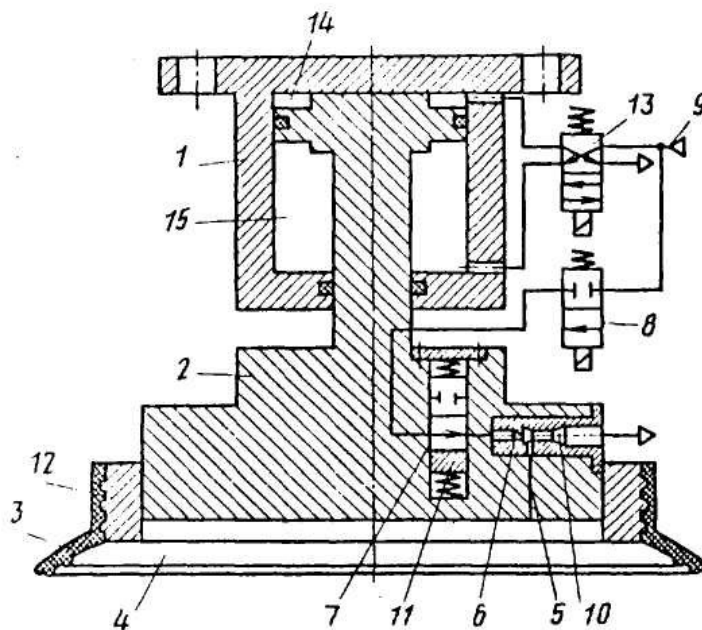


Рисунок 1.12 – Магнітно-вакуумний захват

При подачі сигналу на електропневмоклапан 13 порожнина 14 з'єднується з джерелом 9 стислого повітря, а штокова порожнина 15 - з атмосферою. Якщо деталь виконана з немагнітного матеріалу, то магніт 11 зберігає своє початкове положення.

При подачі команди на електропневмоклапан 8 джерело 9 стислого повітря з'єднується через клапани 7 і 8 з входом ежектора, а в каналі 5 і порожнині 4 з'єднується за рахунок ежекції вакуум. Сила притискає деталь до присоски 3 або притискає захват до поверхні.

Якщо деталь виконана з матеріалу, що намагнічується, то магніт 11 просувається у напрямі до поверхні деталі, а пневмоклапан 7 переходить в своє інше стійке положення "Закрито". При цьому не витрачається стисле повітря, а утримання деталі проводиться магнітом 12.

При необхідності від'єднання захвату від поверхні деталі послідовно знімають сигнали управління з електропневмоклапанів 8 і 13. При ненамагнічуваній деталі порожнина 4 з'єднується з атмосферою, а потім проходить переміщення присоски 3. Порожнина 4 постійно сполучена з атмосферою, а циліндр 1 повинен створити для відриву магніта 12 зусилля. При цьому деталь повинна бути жорстко закріплена.

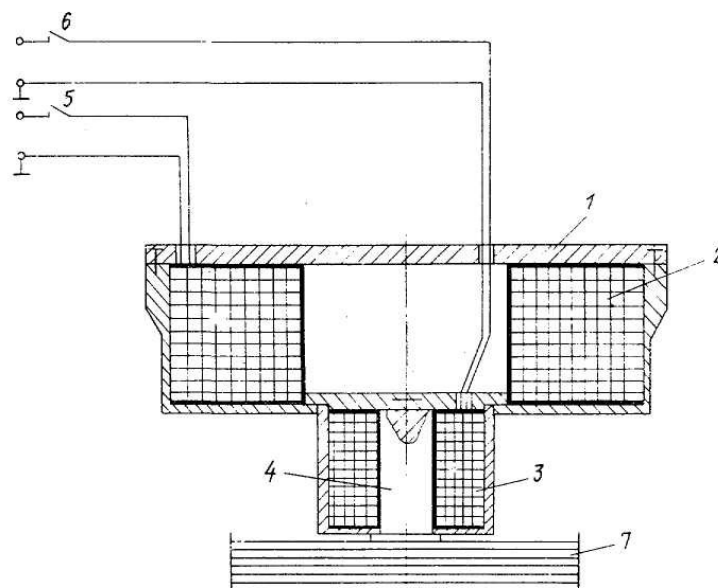


Рисунок 1.13 - Захват при захопленні об'єкту маніпулювання, загальний вигляд

Захват містить в корпусі 1 циліндричну обмотку 2, додаткову обмотку 3, осердя 4, яке розташоване в корпусі 1 (рис.1.13).

Обмотки 2 і 3 через контакти 5 і 6 вимикачів з'єднані з джерелом електричної енергії.

У початковому положенні контакти 5 і 6 розімкнені, осердя 4 з обмоткою 3 знаходиться в нижньому положенні на поверхні заготовки 7. При підключень обмотки 3 за допомогою контакту 6 заготовка 7 примагнічується до осердя 4. Потім замикається контакт 5 і осердя 4 з обмоткою 3 втягується в обмотку 2, піднімаючи заготовку 7. Далі відбувається посилення зовнішнього магнітного поля за рахунок підсумовування магнітних потоків, на які при перенесенні впливає інерційна сила (рис.1.14).

Після перенесення заготовки 7 спочатку розмикається контакт 5 і осердя 4 із заготовкою 7 опускається до упора. Потім відбувається розмикання контакту 6 і заготівка 7 звільняється від захвата.

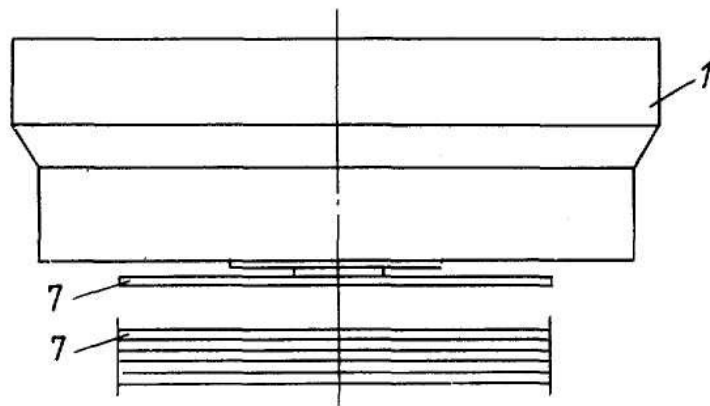


Рисунок 1.14 – Захват при маніпулюванні об'єктом

## 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАХОПЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

### 2.1 Математична модель безконтактних магнітно-струменевих захоплювачів

2.1.1 Основні вимоги до проектування і експлуатації магнітно-струменевих захоплювачів. Сила притягування захоплювачем заготовки:

$$Q = Q_{em} + Q_{cm}, \quad (2.1)$$

де  $Q_{em}$ ,  $Q_{cm}$  – сили викликані електромагнітом і присмоктуючою дією кільцевого повітря.

Надійне утримування заготовки в процесі маніпулювання забезпечується при умові:

$$Q_{em} \geq kQ_n, \quad (2.2)$$

де  $Q_n$  –вантажопідіймальність, яка враховує масу, положення осі заготовки в процесі маніпулювання;

$k = 1,6 \dots 2,2$  – коефіцієнт запасу.

Для забезпечення в процесі експлуатації без ударного захоплення заготовок з відстані, необхідно, щоб виконувалась наступна умова:

$$Q_{n\max} > Q_{em\max} + m_z(a_{\max} - g), \quad (2.3)$$

де  $Q_{n\max}$  – максимальна несуча здатність повітряної подушки ( $h_1 < 0,05$  мм);

$Q_{em\max}$  – максимальна електромагнітна сила;

$m_z$  – маса заготовки;

$a_{\max} = 8 \dots 15$  м/с<sup>2</sup> – прискорення демпфування удару захопленої заготовки;

$g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>.

Для забезпечення безударного захоплення заготовок потрібно, щоб момент часу вмикання котушки електромагніта здійснювався із затримкою  $0,2 \dots 0,5$ с відносно вмикання живлення захоплювача.

Максимальна несуча здатність повітряної подушки визначається:

$$Q_{n\max} = \pi r_0^2 (P_\kappa - P_a) + 2\pi \int_{r_0}^{R_1} \left( \sqrt{P_\kappa^2 - \frac{P_\kappa^2 - P_a^2}{\ln(R_1/r_0)} \ln(R_1/r)} - P_a \right) r dr, \quad (2.4)$$

де  $P_\kappa, P_a$  – абсолютний тиск живлення захоплювача і атмосферний;

$r_0$  – радіус конічної вставки;

$R_1$  – зовнішній радіус осердя електромагніта

Аналітичний метод розрахунку електромагнітної системи використовується для визначення магніторушійної сили (МРС) котушки, яка забезпечить підведення необхідного магнітного потоку до робочих зазорів. Вихідними даними при аналітичному методі розрахунку МРС  $F_0$  є:

- конструкція і геометричні розміри магнітної системи захоплювача, включаючи деталь;
- зусилля притягування  $Q_{em}$ , яке повинен забезпечити захоплювач (2.2);
- експериментальні криві намагнічування матеріалів сталюого осердя  $B_{cm}=f(H_{cm})$  і деталі  $B_d=f(H_d)$ , де  $B, H$  – відповідно магнітна індукція і напруженість магнітного поля; величина робочого зазору  $h_1$ .

2.1.2 Огляд магнітних потоків і заміщення магнітної системи еквівалентною електричною схемою. На рис. 2.1, *a* зображено осердя і схему магнітних потоків системи «захоплювач-деталь». Магнітні потоки проходять як по сталевому магнітному проволу, так і по повітрю, що оточує магнітну систему. В сумі ці частини потоків складають повний магнітний потік  $\Phi_0$ .

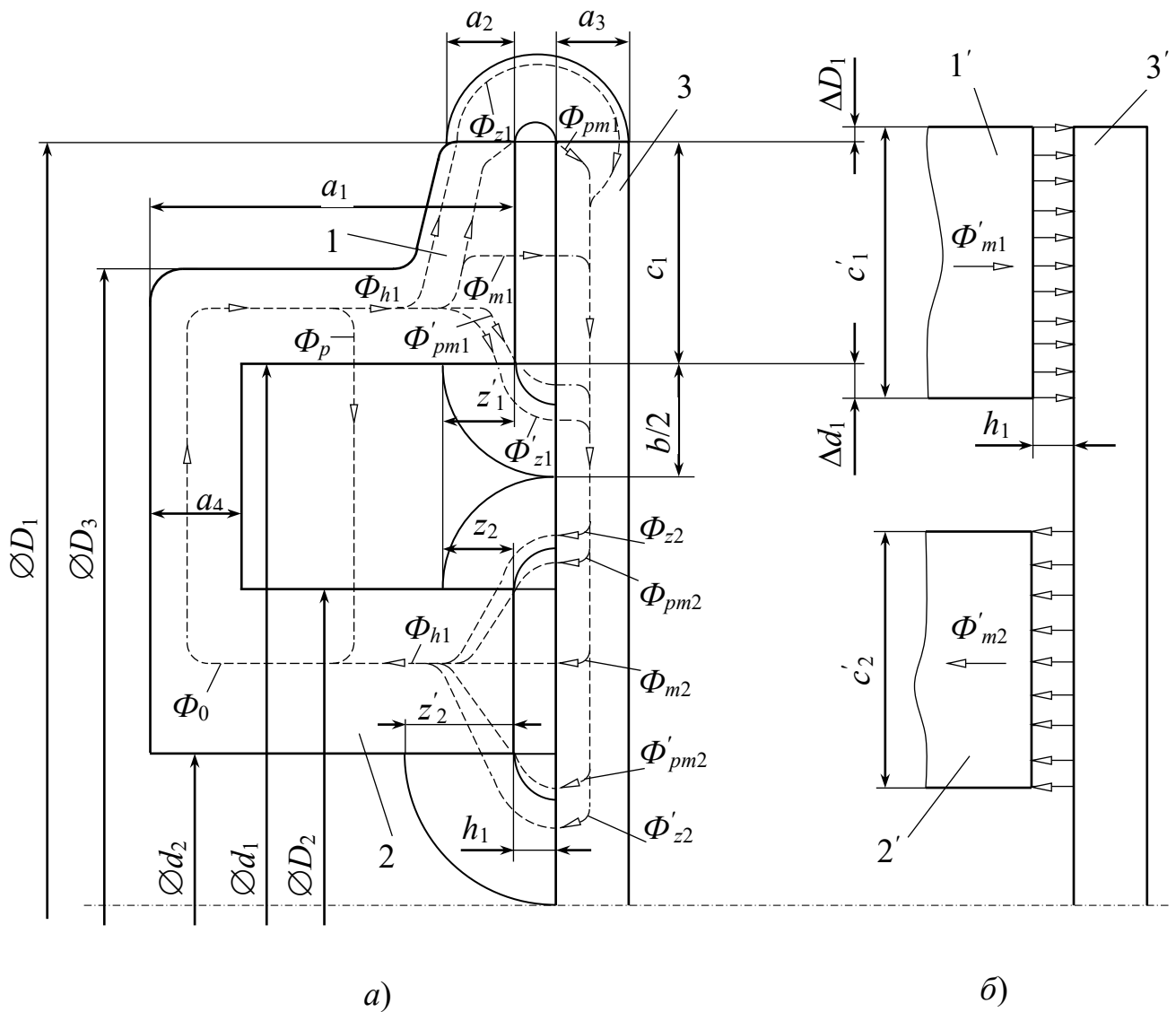


Рисунок 2.1 – Схема магнітних потоків системи захоплювач-деталь (*a*) і розрахункові розміри полюсів (*б*)

Більша частина магнітного потоку проходить по магнітному проволу і досягає робочих зазорів  $h_1$ . Цей потік  $\Phi_{h1}$  виконує роботу на притягування деталі і проходить від полюса 1 через робочі зазори  $h_1$ , деталь і до полюса 2.

Менша частина магнітного потоку проходить по інших повітряних шляхах. Ці потоки не беруть участі у корисній роботі і є потоками розсіювання  $\Phi_p$ . Потоки розсіювання пронизують внутрішній простір між проводом і деталлю, а також їх можна виявити між зовнішніми циліндричними поверхнями полюсів. Причому потоки між зовнішніми поверхнями полюсів у подальших розрахунках не враховуються.

Слід враховувати і потоки “випинання” ( $\Phi_{z1}$ ,  $\Phi'_{z1}$ ,  $\Phi_{z2}$ ,  $\Phi'_{z2}$ ,  $\Phi_{pm1}$ ,  $\Phi'_{pm1}$ ,  $\Phi_{pm2}$ ,  $\Phi'_{pm2}$ ) зазорів  $h_1$ , які при великих значеннях цих зазорів стають співрозмірними з основними робочими потоками  $\Phi_{m1}$  і  $\Phi_{m2}$ . Картина магнітного поля “випинання” зазору  $h_1$  у зоні зовнішнього ребра полюса 1 залежить від діаметра деталі.

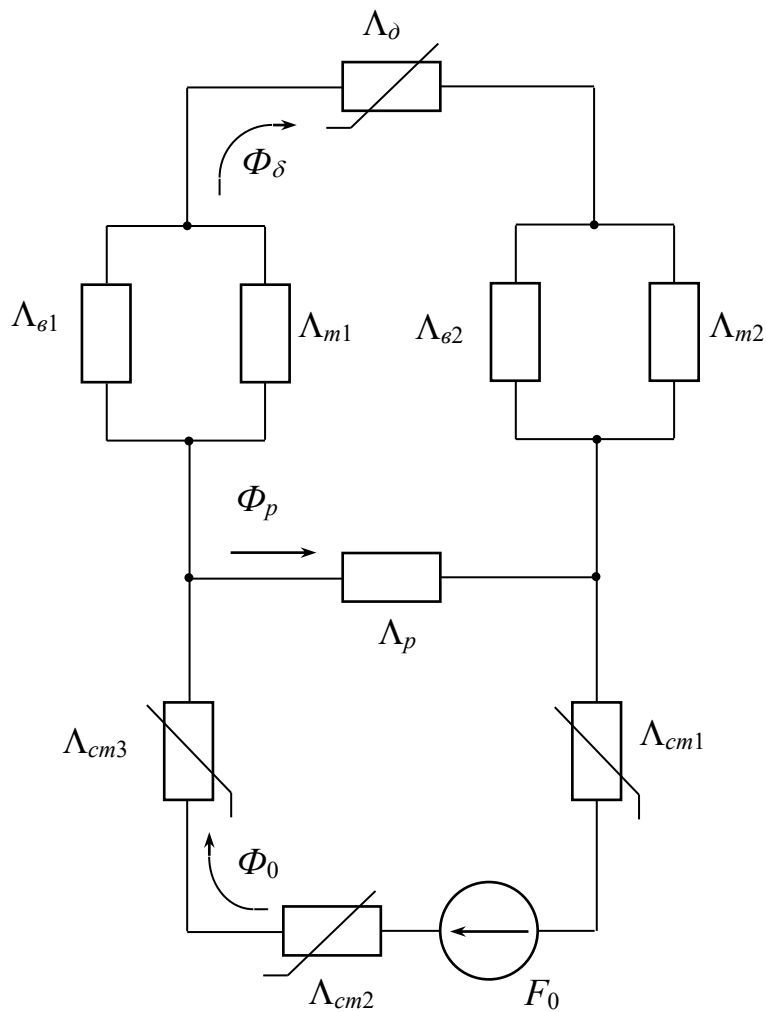


Рисунок 2.2 - Еквівалентна електрична схема заміщення електромагнітної системи захоплювача

Всі шляхи проходження магнітного потоку можна представити як магнітні провідності з'єднані по відповідній схемі. Еквівалентна електрична схема заміщення електромагнітної системи захоплювача показана на рис.2.2.

Позначення магнітних провідностей на цій схемі:

- $\Lambda_{cm1}, \Lambda_{cm2}, \Lambda_{cm3}$  – провідності сталевих ділянок осердя;
- $\Lambda_{\delta}$  – провідність ділянки деталі по якій проходить магнітний потік;
- $\Lambda_p$  – провідність потоку розсіювання;
- $\Lambda_{m1}, \Lambda_{m2}$  – провідності робочих повітряних зазорів у зоні торців полюсів;
- $\Lambda_{\epsilon1}, \Lambda_{\epsilon2}$  – провідності потоків “випинання”.

## 2.2 Розрахунок магнітної провідності потоків розсіювання

Магнітна провідність повітряних шляхів пропорційна геометричним розмірам ділянок. Для приведеної на рис. 2.1, а електромагнітної системи захоплювача провідність простору розташованого між полюсами можна підрахувати за формулою:

$$\Lambda_p = \mu_0 \frac{\pi(d_1 + D_2)(a_1 - a_4)}{d_1 - D_2}, \quad (2.5)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м – магнітна проникність повітря.

Дана формула справедлива у припущенні, що поле розсіювання плоско паралельне (у площинах, перпендикулярних осі обмотки, картини магнітного поля однакові).

2.2.1 Розрахунок магнітної провідності робочих повітряних зазорів із врахуванням “випинання” магнітного поля. Магнітне поле, що оточує магнітом провід захоплювача володіє осьовою симетрією, тому його можна розбити на

частини, кожна з яких є об'ємною фігурою, які отримані обертанням простої плоскої фігури навколо осі захоплювача.

Прості фігури в перерізі захоплювача площиною, що проходить через вісь симетрії, показані на рис. 2.1, *a*. Повний потік  $\Phi_{h1}$  через полюс 1 розбитий на потоки фігур:  $\Phi_{z1}$  половини кільця із зовнішнім радіусом  $(a_2 + a_3 + h_1)/2$  і внутрішнім  $h_1/2$ ;  $\Phi_{pm1}$  половини круга діаметром  $h_1$ ;  $\Phi_{m1}$  прямокутника зі сторонами  $c_1=(D_1-d_1)/2$  і  $h_1$ ;  $\Phi'_{z1}$  чверті кільця з зовнішнім радіусом  $h_1 + z'_1$  і внутрішнім  $h_1$ . Повний потік  $\Phi_{h2}$  через полюс розбитий на потоки фігур:  $\Phi_{z2}$  чверті кільця з зовнішнім радіусом  $z_2+h_1$  і внутрішнім  $h_1$ ;  $\Phi_{pm2}$  і  $\Phi'_{pm2}$  четвертей круга радіусом  $h_1$ ;  $\Phi_{m2}$  прямокутника зі сторонами  $h_1$  і  $c_2=(D_2-d_2)/2$  і  $\Phi'_{z2}$  чверті кільця з зовнішнім радіусом  $h_1 + z'_2$  і внутрішнім  $h_1$ . Якщо позначити магнітні провідності, що відповідають усім цим потокам, буквами  $\Lambda$  з тими ж індексами, з якими позначені потоки, то для провідностей повітряних зазорів  $h_1$  у зоні полюсів 1 і 2 одержимо вирази (див. рис. 2.1 *a* і рис. 2.2.)

$$\begin{cases} \Lambda_1 = \Lambda_{m1} + \Lambda_{e1} = \Lambda_{m1} + \Lambda_{z1} + \Lambda_{pm1} + \Lambda'_{pm1} + \Lambda'_{z1}; \\ \Lambda_2 = \Lambda_{m2} + \Lambda_{e2} = \Lambda_{m2} + \Lambda_{z2} + \Lambda_{pm2} + \Lambda'_{pm2} + \Lambda'_{z2}. \end{cases} \quad (2.6)$$

Магнітні провідності між торцями циліндричних полюсів 1 і 2 і торцем заготовки 3 визначаються як:

$$\begin{cases} \Lambda_{m1} = \mu_0 S_1 / h_1 = \mu_0 \pi (D_1^2 - d_1^2) / (4h_1); \\ \Lambda_{m2} = \mu_0 S_2 / h_1 = \mu_0 \pi (D_2^2 - d_2^2) / (4h_1), \end{cases} \quad (2.7)$$

де  $D_1, d_1, D_2, d_2$  – діаметри циліндричних поверхонь полюсів 1 і 2 (рис. 2.1);

$S_1, S_2$  – площі торців полюсів 1 і 2.

Магнітні провідності між “ребрами” і торцевою поверхнею заготовки:

$$\Lambda_{pm2} = \mu_0 \pi D_2 \lambda_{pm2}; \quad \Lambda'_{pm1} = \mu_0 \pi d_1 \lambda'_{pm1}; \quad \Lambda'_{pm2} = \mu_0 \pi d_2 \lambda'_{pm2}, \quad (2.8)$$

де  $\lambda'_{pm1} = \lambda_{pm2} = \lambda'_{pm2} = 0,52$  – питомі магнітні провідності.

Магнітні провідності шляхів потоків  $\Phi'_{z1}$ ,  $\Phi_{z2}$  і  $\Phi'_{z2}$  “випинання” зазорів  $h_1$

$$\Lambda'_{z1} = \mu_0 \pi d_1 \lambda'_{z1}; \quad \Lambda_{z2} = \mu_0 \pi D_2 \lambda_{z2}; \quad \Lambda'_{z2} = \mu_0 \pi d_2 \lambda'_{z2} \quad (2.9)$$

Питомі провідності  $\lambda_z$  знайдемо:

$$\lambda_z = [2 \ln(1 + z/h_1)]/\pi \quad \text{при } h_1 < 3z;$$

$$\lambda_z = 4z/[\pi h_1 (2 + z/h_1)] \quad \text{при } h_1 \geq 3z.$$

Відповідні координати  $z$  полів “випинання”

$$z'_1 = z_2 = (d_1 - D_2)/4 - h_1;$$

$$z'_2 = a_1 \quad \text{при } a_1 < d_2 \quad \text{і} \quad z'_2 = d_2 \quad \text{при } a_1 > d_2.$$

Провідності  $\Lambda_{pm1}$  і  $\Lambda_{z1}$  розраховують так:

$$\Lambda_{pm1} = \mu_0 \pi D_1 \lambda_{pm1}, \quad \Lambda_{z1} = \mu_0 \pi D_1 \lambda_{z1} \quad (2.10)$$

Картина магнітного у зоні зовнішньої циліндричної поверхні буде змінюватися в залежності від діаметра заготовки  $D$ . Для визначення питомих провідностей  $\lambda_{pm1}$  і  $\lambda_{z1}$  розглянемо два наступні випадки:

$$\begin{aligned} \text{при } D = D_1 & \begin{cases} \lambda_{pm1} = 0,26; \\ \lambda_{z1} = [a_2 \ln(1 + 2a_3/h_1) + a_3 \ln(1 + 2a_2/h_1)]/[\pi(a_2 + a_3)] \end{cases} \\ \text{при } D > D_1 & \begin{cases} \lambda_{pm1} = 0,52; \quad \lambda_{z1} = 4z_1/[\pi h_1 (2 + z_1/h_1)] \quad \text{при } h_1 \geq 3z_1 \\ \text{і } \lambda_{z1} = [2/\pi \ln(1 + z_1/h_1)] \quad \text{при } h_1 < 3z_1; \\ z_1 = D - D_1 \quad \text{при } D - D_1 < a_2 \quad \text{і} \quad z_1 = a_2 \quad \text{при } D - D_1 > a_2. \end{cases} \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.2.2 Розрахунок магніторушійної сили котушки. Магнітне поле (рис. 2.1, *a*) у зоні зазорів  $h_1$  можна замінити однорідними полями між розрахунковими полюсами 1' і 2' і заготовкою 3' (рис. 2.1, *б*). Так для розрахункового полюса 1' ширина  $c'_1 = c_1 + \Delta D_1 + \Delta d_1$ ,

де  $c_1$  – ширина вихідного полюса;

$\Delta D_1$  – додаткова ширина, обумовлена наявністю потоків “випинання”  $\Phi_{z1}$  і  $\Phi_{pm1}$ ;

$\Delta d_1$  – додаткова ширина обумовлена наявністю потоків “випинання”  $\Phi'_{pm1}$  і  $\Phi'_{z1}$  (рис. 2.1, *a*).

При заміні полюса 1 допускається, що довжина зазору  $h_1$  та індукція  $B_{m1}$  ділянки однорідного поля зазору  $h_1$  вихідної системи (рис. 2.1, *a*) рівні величинам розрахункової системи (рис. 2.1, *б*). Сумарний потік  $\Phi'_{m1}$  розрахункового полюса дорівнює повному потоку  $\Phi_{h1}$ .

При дотриманні аналогічних умов замінимо розрахунковим і полюс 2. Тоді магнітні провідності зазорів:

$$\Lambda_1 = \mu_0 S_{1p} / h_1; \quad \Lambda_2 = \mu_0 S_{2p} / h_1 \quad (2.12)$$

Можна записати:

$$\begin{cases} S_{1p} = \pi h_1 \left[ D_1 (\lambda_{pm1} + \lambda_{z1}) + (D_1^2 - d_1^2) / (4h_1) + d_1 (\lambda'_{pm1} + \lambda'_{z1}) \right]; \\ S_{2p} = \pi h_1 \left[ D_2 (\lambda_{pm2} + \lambda_{z2}) + (D_2^2 - d_2^2) / (4h_1) + d_1 (\lambda'_{pm2} + \lambda'_{z2}) \right]. \end{cases} \quad (2.13)$$

Описані вище умови заміни реальної системи дають змогу передбачити, що в обох системах створюються однакові електромагнітні сили. Тому можна визначити по розрахунковій МС без потоків “випинання” (рис. 2.1, *б*). Справедливість цього припущення було перевірено при порівнянні сил для

полюсів, розрахункові розміри яких визначались з урахуванням “випинання” (аналогічно тому, як це зроблено при виводі (2.8)), – з експериментальними силами.

Електромагнітні сили магнітної системи (рис. 2.1, б) при  $\Phi_{m1} = \Phi'_{m1} = \Phi_{h1}$ ;  $S_1 = S_{1p}$  і  $\Phi_{m2} = \Phi'_{m2} = \Phi_{h1}$ ,  $S = S_{2p}$  такі:

$$Q_{em1} = \Phi_{h1}^2 / (2\mu_0 S_{1p}); \quad Q_{em2} = \Phi_{h1}^2 / (2\mu_0 S_{2p})$$

Результуюча електромагнітна сила:

$$Q_{em} = Q_{em1} + Q_{em2} = \Phi_{h1}^2 (S_{1p} + S_{2p}) / (2\mu_0 S_{1p} S_{2p}) \quad (2.14)$$

Виразимо магнітний потік  $\Phi_{h1}$  через магнітну напругу  $U_{mh1}$  та їх сумарну магнітну провідність:

$$\Lambda_{h1} = \Lambda_1 \Lambda_2 / (\Lambda_1 + \Lambda_2),$$

у котру  $\Lambda_1$  і  $\Lambda_2$  підставимо з (2.13). Далі отримаємо:

$$\Phi_{h1} = U_{mh1} \Lambda_{h1} = U_{mh1} \mu_0 S_{1p} S_{2p} / (h_1 (S_{2p} + S_{1p})) \quad (2.15)$$

Потім отримаємо загальні значення електромагнітної сили:

$$Q_{em} = \frac{U_{mh1}^2 \mu_0 S_{1p} S_{2p}}{2h_1^2 (S_{2p} + S_{1p})} \quad (2.16)$$

Далі можна визначити падіння магнітної напруги на відрізках робочих зазорів:

$$U_{mh1} = \sqrt{\frac{2Q_{em} h_1^2 (S_{2p} + S_{1p})}{\mu_0 S_{1p} S_{2p}}} \quad (2.17)$$

Визначивши падіння магнітної напруги на відрізках робочих зазорів, можна знайти потік:

$$\Phi_{h1} = U_{mh1} \Lambda_{h1}$$

Припускаючи, що потік  $\Phi_{h1}$  повністю проходить через деталь, можна визначити індукцію в деталі:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{h1}}{S_{cp.\delta}},$$

де  $S_{cp.\delta} = \pi \frac{D_1 + d_1 + D_2 + d_2}{4} a_3$  – середня площа кільцевого перерізу деталі.

За кривими намагнічування  $B_{\delta} = f(H_{\delta})$  знаходять  $H_{\delta}$  і визначають падіння магнітної напруги на відрізу деталі:

$$U_{m\delta} = H_{\delta} l_{cp.\delta}.$$

де  $l_{cp.\delta} = (D_1 + d_1 - D_2 - d_2)/2$  – середня довжина магнітної силової лінії по деталі.

Падіння магнітної напруги на відрізу розсіювання рівне сумі падіння магнітних напруг на відрізках деталі і робочих зазорів, а саме:

$$U_{mp} = U_{mh1} + U_{m\delta}$$

Падіння магнітної напруги  $U_{мст}$  на відріжку сталі сильно залежать від повного потоку  $\Phi_0$ .

Для визначення  $\Phi_0 = \Phi_{h1} + \Phi_p$  необхідно знати потоки розсіювання, котрі можна підрахувати:

$$\Phi_p = U_{mp} \Lambda_p$$

Окремі ділянки осердя доцільно проектувати з однаковою площею поперечного перерізу  $S_{cm} = \pi(D_2^2 - d_2^2)/4$ , тобто розміри  $D_3 = \sqrt{D_2^2 - d_2^2 + d_1^2}$ ,

$$a_4 = \frac{D_2^2 - d_2^2}{2(D_2 + d_1)}, \quad a_2 = \frac{D_2^2 - d_2^2}{4D_1}$$

Розраховують індукцію в сталевому осерді:

$$B_{cm} = \frac{\Phi_0}{S_{cm}},$$

і за кривою намагнічування  $B_{cm} = f(H_{cm})$  знаходять  $H_{cm}$ .

Падіння магнітної напруги на відріжку осердя визначається так само, як і на відріжку деталі:

$$U_{мст} = H_{cm} l_{cp.cm},$$

де  $l_{cp.cm} = 2a_1 - a_4 + (D_1 + d_1 - D_2 - d_2)/2$  – середня довжина магнітної силової лінії по сталі.

У результаті визначається повна МРС електромагнітної котушки:

$$F_0 = U_{мст} + U_{mh1} + U_{мд}$$

Можна підрахувати необхідне значення струму і напруги живлення обмотки:

$$I = F_0 / \omega,$$

$$U = IR = I \frac{2\rho\omega(d_1 + D_2)}{d_{op}^2} = F_0 \frac{2\rho(d_1 + D_2)}{d_{op}^2}, \quad (2.18)$$

де  $\omega$  – кількість витків котушки;

$\rho = 1,75 \cdot 10^{-8}$  Ом·м – питомий опір міді;

$d_{op}$  – діаметр жили мідного дроту.

### 2.3 Результати досліджень магнітно-струменевих захоплювачів

На рис. 2.3 представлено графіки залежності електромагнітної сили від

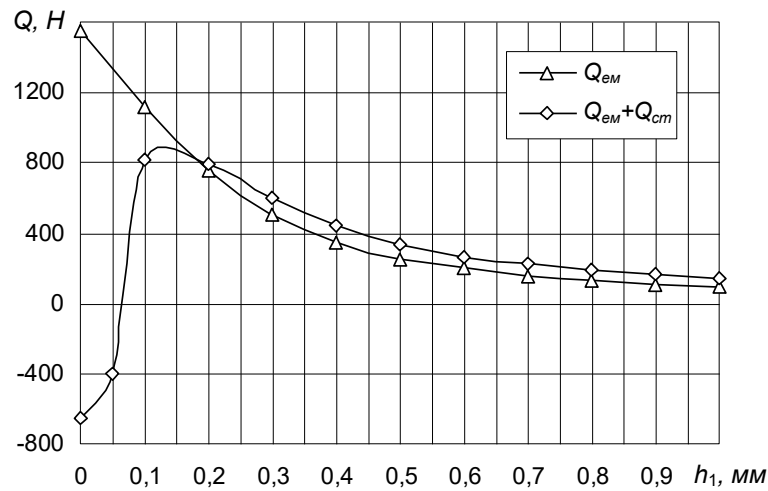


Рисунок 2.4 – Графіки залежності електромагнітної і результуючої сил від робочого зазору  $h_1$

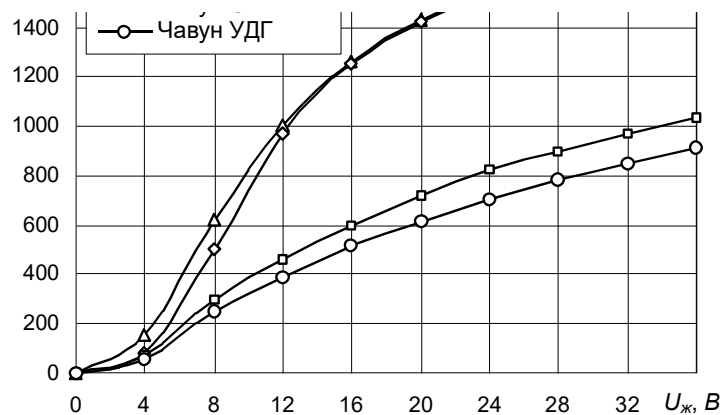


Рисунок 2.3 – Графіки залежності електромагнітної сили від напруги живлення котушки для різних матеріалів заготовки

напруги живлення котушки для різних матеріалів заготовки, а на рис. 2.4 графіки залежності електромагнітної і результуючої сил від робочого зазору  $h_1$ .

Розрахунки проводились для захоплювача з осердям із сталі Ст.3 і конструктивними параметрами:

$$r_0=25 \text{ мм};$$

$$d_1=56 \text{ мм};$$

$$D_1=110 \text{ мм};$$

$$d_2=52 \text{ мм};$$

$$D_2=68 \text{ мм};$$

$$a_1=30 \text{ мм};$$

$$a_2=5 \text{ мм};$$

$$a_3=5 \text{ мм};$$

$$a_4=8 \text{ мм};$$

$$h_0=0,1 \text{ мм};$$

$$d_{op}=0,3 \text{ мм};$$

$$\omega=1350.$$

Аналіз рис.2.3 показує, що електромагнітна сила залежить від матеріалу деталі.

З рис. 2.4 видно, що при відстані  $h_1=1$  мм електромагнітна сила зменшується в 17 раз відносно максимальної. Таким чином, поєднання магнітного захоплювача із струменевим не тільки забезпечує безконтактне утримання деталей, але і дозволяє їх захоплення з відстані більше 1 мм. Максимальна вантажопідіймальність магнітно-струменевого захоплювача проявляється при зазорах  $h_1 = 0,1 \dots 0,16$  мм.

### 3 АНАЛІЗ ПРИСТРОЇВ АВТОМАТИЧНОЇ ЗАМІНИ ЗАХВАТІВ ТА МОДУЛІВ ЗАХОПЛЮВАЧІВ

#### 3.1 Безконтактні струменеві захоплювачі деталей з наскрізним циліндричним отвором

Особливістю струменевого захоплювача заготовок з наскрізним циліндричним отвором (рис.3.1) є те, що в процесі його налагодження перед пуском в експлуатацію, за допомогою спеціальних пристроїв встановлюється таке значення тиску  $P_{к1}$  яке забезпечило б те ж саме значення вакууму. При цьому можна запобігти перетіканню повітря. Це дозволить знизити зальну витрату повітря до тієї, яка потрібна.

Для визначення абсолютного тиску  $P_{к1}$  в камері захоплювача складемо рівняння імпульсів сил для вихідних перерізів кільцевої конічної щілини та кільцевого зазору, що утворений циліндричними поверхнями захоплювача та об'єкта.

Припускаючи, що розподіл швидкостей в цих перерізах рівномірний, рівняння імпульсів сил:



Рисунок 3.1 - Схема безконтактного струменевого захоплювача об'єктів з наскрізними отворами

$$G_{у1} (V_{у1} - V_3) = S_3 (P_a - P_{m2}) + F_{mp1}, \quad (3.1)$$

де  $S_3 = 2\pi r_3 h_3$  – площа поперечного перерізу кільцевого зазору деталі і захоплювача;

$h_3 = r_{ом} - r_3$  – кільцевий зазор між циліндричними поверхнями захоплювача і заготовки;

$r_{ом}, r_3$  – радіуси отвору у заготовці і захоплювача;

$G_{у1} = V_{у1} \rho_{у1} h_{у1}$  – масові витрати повітря через щілину;

$V_{у1}, V_3$  – швидкості потоку повітря на виході із кільцевої конічної щілини та кільцевого зазору;

$F_{mp1}$  – сила тертя потоку до внутрішньої поверхні захоплювача і бічної поверхні заготовки.

Сила тертя потоку повітря до бічної поверхні об'єкту маніпулювання і внутрішньої поверхні захоплювача визначається:

$$F_{mp} = 2\tau_{cp1} S_{бз}, \quad (3.2)$$

де  $S_{бз} = 2\pi r_3 l_3$  – площа активної бічної поверхні об'єкта;

$l_3$  – довжина активного зазору захоплювач-деталь;

$\tau_{cp1} = \frac{\rho_a V_3^2}{8} \lambda_{cp1}$  – середнє напруження тертя, що діє на циліндричні поверхні

захоплювача та заготовки;

$\lambda_{cp1}$  – середнє значення коефіцієнта тертя повітря до активних поверхонь захоплювача і заготовки.

Виражаючи з рівняння нерозривності потоку його швидкість у вихідному січенні кільцевого зазору

$$V_3 = V_{у1} \frac{S_{у1} \rho_{у1}}{S_3 \rho_a},$$

отримаємо:

$$F_{mp1} = \frac{V_{u1}^2 \rho_{u1}^2 S_{u1}^2}{2 \rho_a S_3^2} \pi l_3 \lambda_{cp1} r_3 \quad (3.3)$$

де  $S_{u1} = 2\pi r_3 h_{u1}$  – площа поперечного перерізу кільцевої конічної щілини;

$\rho_{u1}$  – густина потоку повітря на виході.

Підставляючи в рівняння (3.1) формулу (3.3) і згрупувавши члени отримаємо:

$$V_{u1}^2 \rho_{u1} \left[ S_{u1} - \frac{\rho_{u1}}{\rho_a} \left( \frac{S_{u1}^2}{S_3} + \frac{\pi S_{u1}^2 l_3}{2 S_3^2} \lambda_{cp1} r_3 \right) \right] = (P_a - P_{m2}) S_3 \quad (3.4)$$

Використовуючи рівняння адиабати  $\frac{P}{\rho^k} = \text{const}$ , буде:

$$V_{u1} = \varphi_{u1} \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \left( \frac{P_{\kappa}}{\rho_{\kappa}} - \frac{P_{u1}}{\rho_{u1}} \right)}$$

і підставивши їх в (3.4) та прийнявши відношення  $\rho_{u1}/\rho_a \approx 1$ , отримаємо формулу для визначення  $P_{\kappa1}$

$$P_{\kappa1} = \left[ \left( (P_a - P_{m2}) \frac{(k-1)h_3}{2\varphi_{u1}^2 k h_{u1} \left( 1 - \frac{h_{u1}}{h_3} \left( 1 + \frac{l_3 \lambda_{cp1}}{4h_3} \right) \right)} + P_{m2} \right) P_{m2}^{-\frac{1}{k}} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (3.5)$$

де  $\varphi_{u1}$  – коефіцієнт швидкості враховуючий втрати питомої енергії потоку в щілині ;

$h_{u1}$  – висота кільцевої конічної щілини;

$h_3 = r_{om} - r_3$  – кільцевий зазор між циліндричними поверхнями захоплювача і заготовки;

$r_{om}, r_3$  – радіуси отвору у заготовці і захоплювача;

$\lambda_{cp1}$  – значення коефіцієнта в'язкого тертя потоку в кільцевому зазорі

Силу притягання  $F$  струменевим захоплювачем циліндричної заготовки з наскрізним отвором можна порахувати як:

$$F = \pi (P_a - P_{m2}) (r_6^2 - r_{om}^2) + 2\pi \int_{r_6}^{r_k} P_r r dr, \quad (3.6)$$

де  $P_r$  – розподіл тиску

Для визначення характеру розподілу тиску  $P_r$  в зазорі  $h_{pk}$  складемо рівняння Бернуллі для радіусів  $r$  і  $r_k$

$$\frac{P_r}{\rho_a} + \frac{V_r^2}{2} = \frac{P_a}{\rho_a} + \frac{V_k^2}{2} + E_{r-rk} \quad (3.7)$$

де  $V_r, V_k$  – швидкості потоку повітря на радіусах  $r$  і  $r_k$ ;

$E_{r-rk}$  – втрати питомої енергії потоку на проміжку від  $r$  до  $r_k$ .

Елементарні втрати питомої енергії потоку  $dE$  на елементарному відрізку  $dr$  знайдемо:

$$dE = \lambda_{cp2} \frac{dr}{D_2} \frac{V_r^2}{2}, \quad D_2 = 2h_{pk} \quad (3.8)$$

Враховуючи, що

$$V_r = V_{ц2} \frac{r_6 h_{ц2} \rho_{ц2}}{r h_{pk} \rho_a}; \quad V_k = V_{ц2} \frac{r_6 h_{ц2} \rho_{ц2}}{r_k h_{pk} \rho_a}, \quad (3.9)$$

проінтегрувавши рівняння, знайдемо:

$$E_{r-r_k} = \lambda_{cp2} \frac{r_6^2 h_{ц2}^2 \rho_{ц2}^2}{4h_{pk}^3 \rho_a^2} V_{ц2}^2 \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_k} \right) \quad (3.10)$$

Підставивши результат, після перетворень отримаємо:

$$P_r = P_a + \frac{\rho_{ц2}^2 r_6^2 h_{ц2}^2}{2\rho_a h_{pk}^2} V_{ц2}^2 \left[ \frac{1}{r_k^2} - \frac{1}{r^2} + \frac{\lambda_{cp2}}{2h_{pk}} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_k} \right) \right] \quad (3.11)$$

$P_{m2}$  залежить від абсолютного тиску  $P_{к1}$  в камері захоплювача. Для визначення абсолютного тиску  $P_{m2}$  на торці захоплювача проведемо газодинамічний аналіз процесу витікання потоку та складемо рівняння імпульсів сил в проекціях на вісь  $x$  для виділеного елемента  $d\varphi$  радіального зазору  $h_{pk}$  на проміжку часу:

$$\begin{aligned} dG_{ц2} V_{ц2} \cos \varphi + P_{m2} h_{pk} r_6 d\varphi \cos \varphi + 2h_{pk} \int_{r_6}^{r_k} P_r dr \sin \frac{d\varphi}{2} \cos \varphi = \\ = dG_{ц2} V_k \cos \varphi + P_a h_{pk} r_k d\varphi \cos \varphi + dF_{mp2} \end{aligned} \quad (3.12)$$

де  $dG_{ц2} = V_{ц2} \rho_{ц2} h_{ц2} r_6 d\varphi$  – масові витрати повітря через щілину;

$dF_{mp2}$  – елементарна сила в'язкого тертя потоку повітря до торцевих поверхонь захоплювача і об'єкта. Диференціал від сили тертя  $d^2 F_{mp2}$  на елементарній площадці:

$$d^2 F_{mp2} = 2dS \tau_{cp2} \cos \varphi = 2\tau_{cp2} r dr \cos \varphi d\varphi \quad (3.13)$$

Враховуючи, що напруження тертя на радіусі  $r$ :

$$\tau_{cp2} = \frac{\rho_a V_r^2}{8} \lambda_{cp2}, \quad (3.14)$$

проінтегрувавши, отримаємо:

$$dF_{mp2} = \frac{\lambda_{cp2}}{4} \frac{V_{uy2}^2 \rho_{uy2}^2 r_{\epsilon}^2 h_{uy2}^2}{\rho_a h_{pk}^2} \cos \varphi d\varphi \int_{r_{нд}}^{r_k} \frac{dr}{r} = \frac{\lambda_{cp2}}{2} \frac{V_{uy2}^2 \rho_{uy2}^2 r_{\epsilon}^2 h_{uy2}^2}{\rho_a h_{pk}^2} \ln \frac{r_k}{r_{нд}} \cos \varphi d\varphi. \quad (3.15)$$

Проінтегрувавши, отримаємо

$$P_r = P_a + \frac{\rho_{uy2}^2 r_{\epsilon}^2 h_{uy2}^2}{2\rho_a h_{pk}^2} V_{uy2}^2 \left[ \frac{1}{r_k^2} - \frac{1}{r^2} + \frac{\lambda_{cp2}}{2h_{pk}} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_k} \right) \right] \quad (3.16)$$

в межах від  $r_{нд}$  до  $r_k$  знайдемо:

$$\int_{r_{\epsilon}}^{r_k} P_r dr = P_a (r_k - r_{\epsilon}) + \frac{V_{uy2}^2 \rho_{uy2}^2 r_{\epsilon}^2 h_{uy2}^2}{2\rho_a h_{pk}^2} \left[ \frac{r_k - r_{\epsilon}}{r_k^2} + \frac{1}{r_k} - \frac{1}{r_{\epsilon}} + \frac{\lambda_{cp2}}{2h_{pk}} \left( \ln \frac{r_k}{r_{\epsilon}} - \frac{r_k - r_{\epsilon}}{r_k} \right) \right] \quad (3.17)$$

Підставивши, отримаємо рівняння:

$$V_{uy2}^2 \rho_{uy2} \left[ r_{\epsilon} h_{uy2} - \frac{\rho_{uy2} r_{\epsilon}^2 h_{uy2}^2}{2\rho_a h_{pk}} \left( \frac{r_{\epsilon}^2 + r_k^2}{r_k^2 r_{\epsilon}} + \frac{\lambda_{cp2}}{2h_{pk}} \frac{r_k - r_{\epsilon}}{r_k} \right) \right] = (P_a - P_{m2}) r_{\epsilon} h_{pk} \quad (3.18)$$

після перетворень отримаємо:

$$\frac{2k\varphi_{uy2}^2}{k-1} \left( P_{k2}^{\frac{k-1}{k}} P_{m2}^{\frac{1}{k}} - P_{m2} \right) \left[ r_{\epsilon} h_{uy2} - \frac{\rho_{uy2} r_{\epsilon}^2 h_{uy2}^2}{2\rho_a r_k h_{pk}} \left( \frac{r_{\epsilon}}{r_k} + \frac{r_k}{r_{\epsilon}} + \frac{\lambda_{cp2} (r_k - r_{\epsilon})}{2h_{pk}} \right) \right] = \quad (3.19)$$

$$= (P_a - P_{m2}) r_{\epsilon} h_{pk}$$

Далі отримаємо рівняння для визначення  $P_{m2}$

$$P_{\kappa 2} = \left[ \left( \frac{(P_a - P_{m2}) h_{pk} (k-1)}{2k \varphi_{\text{ц}2}^2 h_{\text{ц}2} \left[ 1 - \frac{h_{\text{ц}2}}{2h_{pk}} \left( 1 + \frac{r_{\text{в}}^2}{r_{\text{к}}^2} + \frac{\lambda_{\text{сп}2} (r_{\text{в}} - r_{\text{в}}^2 / r_{\text{к}})}{2h_{pk}} \right) \right]} + P_{m2} \right)^{\frac{1}{k}} P_{m2}^{\frac{k-1}{k}} \right]^{\frac{k}{k-1}}, \quad (3.20)$$

де  $P_{\kappa 2}$  – тиск у камері захоплювача;

$r_{\text{в}}, r_{\text{к}}$  – радіуси конічної вставки і корпуса захоплювача;

$h_{\text{ц}2}$  – висота кільцевої конічної щілини;

$h_{pk}$  – радіальний зазор між торцевими поверхнями корпуса захоплювача і заготовки;

$\lambda_{\text{сп}2}$  – значення коефіцієнта в'язкого тертя потоку

Максимальна сила притягування захоплювачем заготовки спостерігається при оптимальному значенні радіального зазору. При цьому зазорі для заданого  $P_{\kappa 2}$ , значення вакууму буде максимальним. Взявши від  $A(h_{pk})$  похідну по  $h_{pk}$ , і розв'язавши отримане рівняння знайдемо значення зазору:

$$h_{pk} = \frac{h_{\text{ц}2} (r_{\text{в}}^2 + r_{\text{к}}^2)}{2r_{\text{к}}^2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{3\lambda_{\text{сп}2} (r_{\text{к}} - r_{\text{в}}) r_{\text{к}}^3 r_{\text{в}}}{h_{\text{ц}2} (r_{\text{в}}^2 + r_{\text{к}}^2)^2}} \right) \quad (3.21)$$

Враховуючи функцію розподілу тиску та використовуючи рівняння адиабати, рівняння стану ідеального газу після перетворень буде рівною:

$$F = \pi (P_a - P_{m2}) (r_{\text{в}}^2 - r_{\text{ом}}^2) - \frac{\pi \varphi_{\text{ц}2}^2 k \left( P_{\kappa 2}^{\frac{2k-2}{k}} P_{m2}^{\frac{2}{k}} - P_{\kappa 2}^{\frac{k-1}{k}} P_{m2}^{\frac{k+1}{k}} \right) r_{\text{в}}^2 h_{\text{ц}2}^2}{(k-1) \rho_a R T_a r_{\text{к}}^2 h_{pk}^2} \times \left[ r_{\text{к}}^2 - r_{\text{в}}^2 - 2r_{\text{к}}^2 \ln \frac{r_{\text{к}}}{r_{\text{в}}} + \frac{\lambda_{\text{сп}2}}{4h_{pk}} r_{\text{к}} (r_{\text{к}} - r_{\text{в}})^2 \right], \quad (3.22)$$

де  $\varphi_{\text{ц}2}$  – коефіцієнт швидкості враховуючий втрати питомої енергії потоку

### 3.2 Безконтактні струменеві захоплювачі деталей з внутрішнім глухим отвором

Для розрахунку силових характеристик струменевого захоплювача показано на рис. 2.6 користуються формулою

$$F = F_1 + F_2 + F_3, \quad (3.23)$$

де  $F_1 = \pi(P_a - P_{m1})r_{om}^2$  – сила викликана розрідженням  $P_a - P_{m1}$  у заготовці;

$F_2$  – сила викликана розрідженням на торці заготовки в зоні  $r_{om} < r < r_6$ ;

$F_3$  – сила викликана розрідженням на поверхні заготовки в зоні торця корпуса захоплювача.

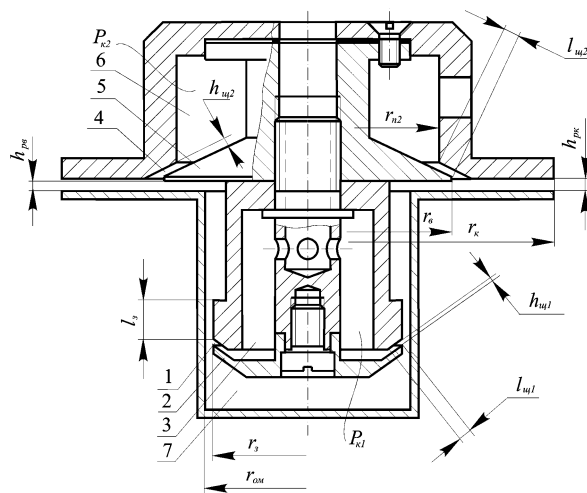


Рисунок 3.2 – Схема безконтактного струменевого захоплювача об'єктів з глухим отвором

Складові  $F_2$  і  $F_3$ :

$$F_2 = \pi(r_6^2 - r_{om}^2)(P_a - P_{m2}) + \frac{G_{uy1}^2 RT_a}{8\pi P_{m2} h_{pe}^2 r_6^2} \times \left( 2r_6^2 \ln \frac{r_6}{r_{om}} + r_{om}^2 - r_6^2 - \frac{\lambda_{cp2}}{2h_{pe}} (r_6 (r_6 - r_{om})^2) \right), \quad (3.24)$$

$$F_3 = \frac{(G_{uy1} + G_{uy2})^2}{8\pi \rho_a h_{pk}^2 r_\kappa^2} \left( 2r_\kappa^2 \ln \frac{r_\kappa}{r_6} + r_6^2 - r_\kappa^2 - \frac{\lambda_{cp2}}{2h_{pk}} (r_\kappa (r_\kappa - r_6)^2) \right), \quad (3.25)$$

де  $G_{uy1}$ ,  $G_{uy2}$  – масова витрата стиснутого повітря, яка витікає з щілин 1 і 4 відповідно;

$\lambda_{cp2}$  – коефіцієнт в'язкого тертя потоку до торців вставки і заготовки.

Абсолютні тиски  $P_{m2}$  і  $P_{m1}$  визначають з рівнянь:

$$G_{uy2} V_{uy2} + \frac{G_{uy1}^2 RT_a}{2\pi P_{m2} r_6 h_{pe}} + \frac{(G_{uy1} + G_{uy2})^2}{4\pi \rho_a h_{pk} r_\kappa} \times \left[ \frac{r_6}{r_\kappa} + \frac{r_\kappa}{r_6} + \frac{\lambda_{cp2}}{2h_{pk}} (r_\kappa - r_6) \right] - 2\pi h_{pk} r_6 (P_a - P_{m2}) = 0, \quad (3.26)$$

$$P_{\kappa 1} = \left[ \left( (P_{m2} - P_{m1}) \frac{(k-1)h_3}{2\varphi_{uy1}^2 k h_{uy1} \left( 1 - \frac{h_{uy1}}{h_3} \left( 1 + \frac{l_3 \lambda_{cp1}}{4h_3} \right) \right)} + P_{m1} \right) P_{m1}^{\frac{-1}{k}} \right]^{\frac{k}{k-1}}, \quad (3.27)$$

підрховуючи масові витрати повітря  $G_{uy1}$  і  $G_{uy2}$ , а також швидкість потоку  $V_{uy2}$  на виході з щілини по формулах:

$$V_{uy} = \varphi_{uy} \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \left( \frac{P_{\kappa}}{\rho_{\kappa}} - \frac{P_m}{\rho_{uy}} \right)}$$

$$G_{uy} = \mu_{uy} S_{uy} P_{\kappa} \sqrt{\frac{2}{RT_{\kappa}} \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_m}{P_{\kappa}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_m}{P_{\kappa}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

$$G_{uy} = \mu_{uy} S_{uy} P_{\kappa} \sqrt{\frac{2}{RT_{\kappa}} \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}$$

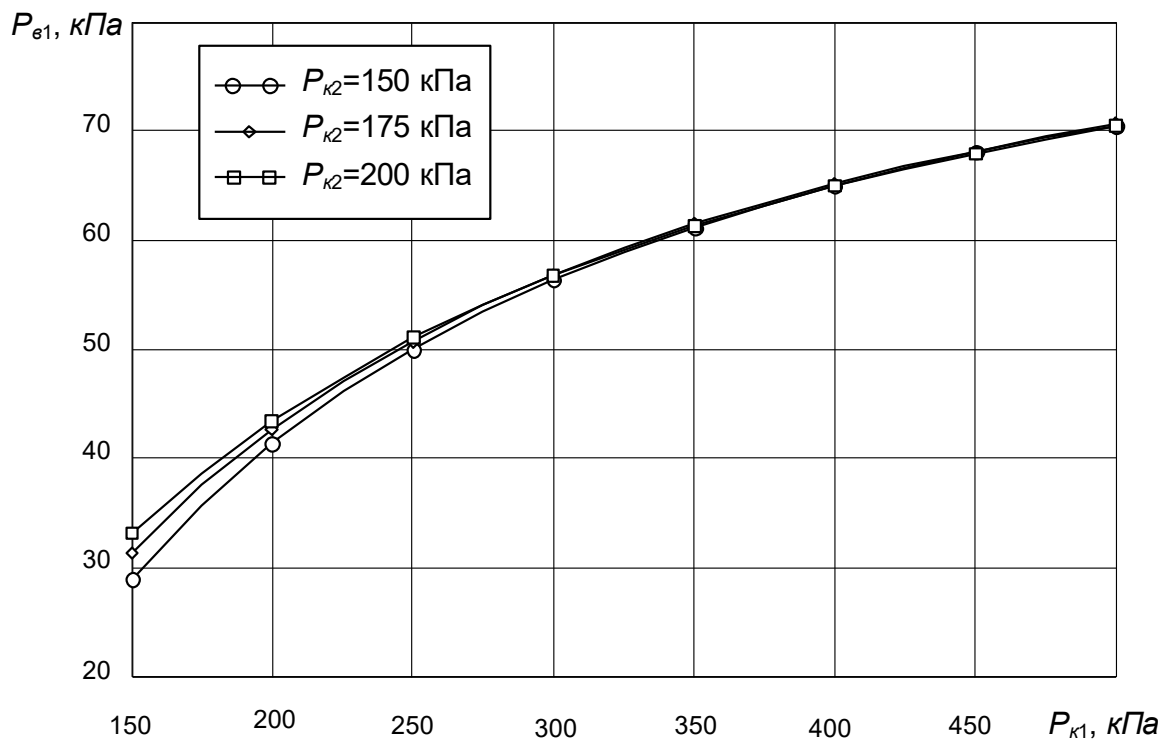


Рисунок 3.3 – Залежність величини вакууму на торці конічної вставки від абсолютного тиску живлення

Результати розрахунку величини вакууму  $P_{e1}$  на торці конічної вставки представлені на рис.3.3, а графіки залежності складових  $F_1$ ,  $F_2$  і результуючої присмоктуючої сили  $F$  показані на рис.3.4.

Приведені графіки відповідають таким параметрам:  $h_{u1} = 0,08$  мм;  $h_{u2} = 0,12$  мм;  $h_{pв} = h_{pк} = 0,35$  мм;  $r_3 = 20$  мм;  $r_{ом} = 20,3$  мм;  $r_е = 30$  мм;  $r_к = 40$  мм;  $l_3 = 10$  мм;  $\mu_{u1} = \varphi_{u1} = 0,92$ ;  $\mu_{u2} = \varphi_{u2} = 0,9$ ;  $\lambda_{cp1} = \lambda_{cp2} = \lambda_{cp3} = 0,04$ .

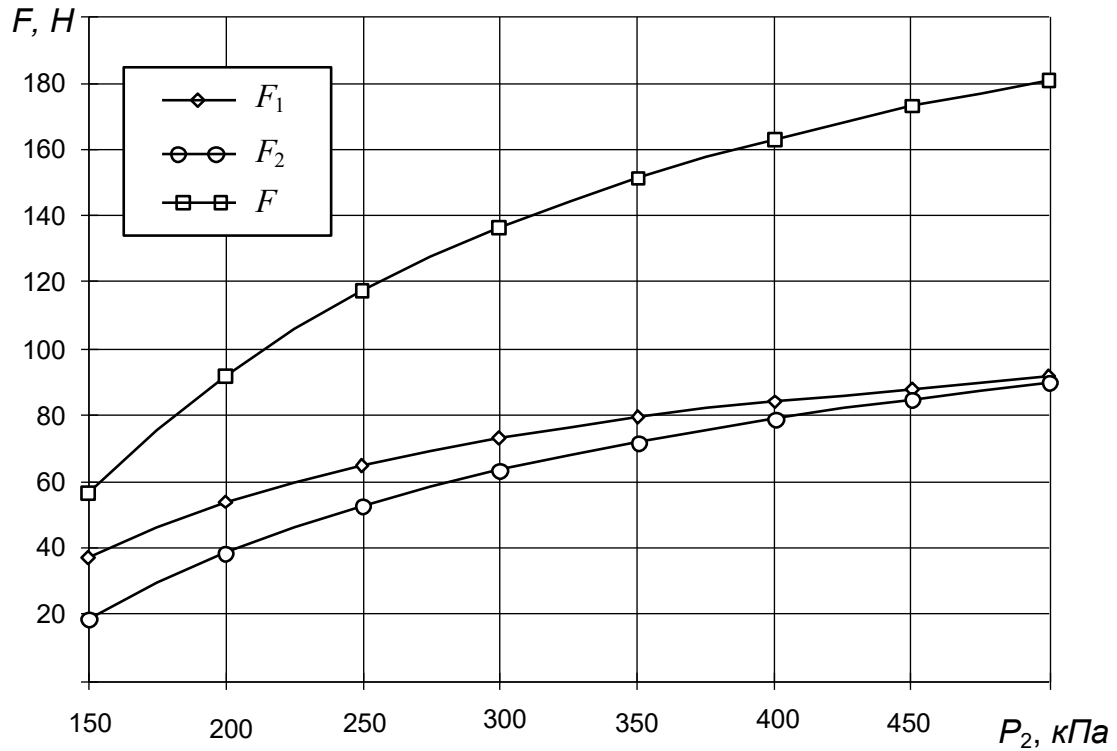


Рисунок 3.4 – Графік залежності складових  $F_1$ ,  $F_2$  і результуючої присмоктуючої сили  $F$

## 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

### 4.1 Особливості проектування комбінованих захоплюючих пристроїв

4.1.1 Технічні вимоги до струменевих захоплювачів. Струменеві захоплювачі (СЗ) відрізняються по складності та призначенню, проте існують певні вимоги, які відносяться практично до всіх їх типів.

СЗ повинен бути легким, тому що його маса суттєво впливає на функціонування робота. Значення граничного навантаження включає в себе масу захоплювача. Величина навантаження впливає на швидкість виконання робочих рухів ПР – чим менше навантаження, тим з більшою швидкістю може переміщуватись робот. Для дотримання цієї вимоги СЗ слід виготовляти з легких матеріалів і робити вибірку лишнього матеріалу.

СЗ повинен мати менші габарити. Зменшення габаритів захоплювача дозволяє знизити його масу та економить робочий простір роботизованої комірки. Що стосується ПР, то розрахунок його граничного навантаження пов'язаний з розрахунком моменту інерції останньої ланки маніпулятора. Тому, чим менші габарити СЗ, тим кращі робочі характеристики ПР.

Потрібно, щоб СЗ забезпечував можливість роботи різної форми, що зменшить потребу у його заміні та знизить затрати на придбання оснащення. Проте зменшення габаритів СЗ в деякій мірі звужує спектр утримуваних ним ОМ. В конструкції СЗ можна передбачити можливість їх швидкого ручного переналагодження на ОМ різних розмірів. Для переходу на ОМ з іншим розміром і формою, можна використати змінні кільця, накладки, насадки та ін. Можлива і автоматична зміна СЗ в залежності від класу оброблюваних ОМ. Таке рішення зменшує масу та габарити СЗ.

Наступна вимога до конструкції СЗП – це максимальна приєднувальна жорсткість, яка в цілому визначає робочі характеристики ПР. ПР забезпечують точність позиціонування, а при недостатній жорсткості СЗ виникає похибка позиціонування. При малій точності виготовлення деталей це призводить до різкого зниження надійності виконуваних операцій.

Нежорстке закріплення СЗ на приєднувальному фланці може викликати вібрацію. Така вібрація може призвести до його пошкодження або руйнування. Використання жорстких конструкцій дозволяє уникнути вібрації.

Конструкція СЗ повинна забезпечувати максимальні силові характеристики із міркувань безпеки. ОМ повертають навколо осі ПР, і при цьому виникають відцентрові сили. При переміщенні від однієї точки до іншої на ОМ діють сили прискорення і гальмування маніпулятора. При розрахунку конструктивних параметрів СЗ ці фактори слід враховувати, щоб забезпечити надійне утримання ОМ. З іншого боку силові характеристики СЗ не повинні бути настільки великими, щоб викликати деформацію або руйнування.

При проектуванні оснастки слід враховувати зручність її технічного обслуговування. Необхідно передбачити можливість швидкої заміни неміцних елементів конструкції. В конструкції СЗ слід використовувати один і той самий тип кріпильних деталей, що зменшує число інструментів.

Матеріал та фізичні властивості ОМ впливають на конструкцію СЗ. На основі їх аналізу визначається тип СЗ, аеродинамічний ефект, розташування і кількість точок контакту СЗ, необхідність давачів та пристроїв.

Потім визначається кількість і розташування точок контакту, які забезпечують надійне його перенесення. Статичне і динамічне навантаження узгоджуються із його робочими характеристиками.

Аналіз чистоти поверхні і форми ОМ необхідні для уточнення типу СЗ. Якщо ОМ має складну форму, то слід використовувати комбінацію двох або більше незалежних СЗ.

Поряд з аналізом ОМ для визначення оптимальних параметрів оснащення необхідно провести аналіз процесу його обробки. Таке рішення дозволяє одночасно виконувати декілька операцій обробки деталі. Прикладами можуть бути: миття об'єктів, їх сушіння та розігрів в процесі маніпулювання. При необхідності СЗ дозволяють проводити пневматичний контроль та орієнтацію об'єктів в процесі маніпулювання.

Для роботи з об'єктами різних розмірів заміна СЗ відбувається автоматично. Для прискорення заміни слід передбачити зручні засоби роз'єднання і суміщення.

Необхідність контролю за перебігом процесу обробки деталі впливає на конструкцію СЗ. Вона визначає вимоги до управління СЗ, до давачів і вимірювальних пристосувань. Умови обробки деталі можуть вимагати включення в СЗ декількох давачів.

На конструкцію СЗ впливають зовнішні умови роботи. Потрібно оцінити можливий вплив температури, вологості, дії кислот і лугів, вібрації, ударів. За результатами проведеної оцінки робиться вибір матеріалу, давачів, оснащення, механічних з'єднань, захисних пристосувань.

4.1.2 Технічні характеристики струменевих захоплювачів. Роботизована операція починається із захоплення ОМ роботом, спосіб фіксації об'єкта у захоплювачі визначає точність його базування та центрування і визначає подальші дії роботизованої системи (РС).

При визначенні положення захоплення ОМ відомої форми необхідно забезпечити наступні вимоги:

- виключити можливість пошкодження СЗ в момент захоплення об'єкта та в момент його розвантаження;
- ПР повинен мати можливість подати СЗ у зону захоплення і з захопленим ОМ без зіткнень перейти у зону розвантаження;
- СЗ повинен надійно утримувати захоплений ОМ, протидіяти силам, що виникають при переміщеннях і складальних операціях.

Більшість відомих методів вибору положення захоплення складається з трьох етапів:

- на першому етапі формується множина можливих положень захоплювача.
- на другому етапі із цієї множини відкидаються положення, які конкретний робот не може виконати або виконання яких веде до зіткнення.
- на третьому етапі із залишених положень вибирається одне, в певному

розумінні оптимальне.

Початкове формування множини можливих початкових положень захоплення здійснюється із міркувань геометричної форми об'єкту, способу захоплення, похибки позиціювання ПР. Для СЗ паралельної дії вибір положення захоплення визначається умовою паралельності захоплюваних поверхонь. Додатковим критерієм, що враховується при виборі місця захоплення на ОМ є мінімальність моментів інерції відносно осі СЗ. В якості критерію оптимальності можна використовувати степінь надійності базування, який зводиться до визначення зміщення центру тяжіння ОМ.

При обслуговуванні технологічних процесів обробки необхідна додаткова точність встановлення об'єктів. До них ставиться цілий ряд спеціальних вимог – це вимоги до точності базування заготовок на власному торці і точності центрування об'єктів відносно осі захоплювача потоком стиснутого повітря.

Аналіз процесу встановлення об'єктів у затискні пристрої технологічного обладнання показує, що точність та надійність виконання цих операцій визначається такими основними похибками:

- сумарною похибкою позиціювання всіх виконавчих механізмів маніпулятора;
- похибкою базування об'єкта відносно торця СЗ;
- похибкою установки затискного пристрою.

Всі ці три складові частини представляють собою систему “робот – захоплювач – об'єкт”. В ідеальному випадку – відповідні похибки  $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0$ . У реальному випадку – точність позиціювання маніпулятора  $\delta_l$  є величиною відміною від. Типові значення точності  $\delta_l$  повторного позиціювання маніпулятора можуть лежати в діапазоні від 2мм до  $\pm 0,01$ мм і навіть до 0,005мм.

При розташуванні осей СЗ та затискного пристрою у одній площині, похибки  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  і  $\delta_3$  додаються і складають максимальну похибку.

При нормальному законі розподілу похибок густина розподілу

$$P_p(x) = \frac{I}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_k)^2}{2\sigma_p^2}}, \quad (4.1)$$

де  $P_p(x)$  – ймовірність для випадкової величини попасти в точку  $x$ ;

$\sigma_p$  – середнє квадратичне відхилення розподілу похибок позиціювання ПР, тобто, та точка в якій повинен знаходитись ОМ.

Густина розподілу похибок базування ОМ відносно осі СЗ буде рівна:

$$P_0(x) = \frac{I}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_k)^2}{2\sigma_0^2}}, \quad (4.2)$$

де  $\sigma_0$  – середнє квадратичне відхилення похибок базування об'єкту у захоплювачі.

Сумарна похибка від дії трьох факторів

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_0^2 + \sigma_3^2}, \quad (4.3)$$

де  $\sigma_3$  – середнє квадратичне відхилення похибок установки затискного пристрою.

Очевидно, що рівність буде:

$$P(x) = \frac{I}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_k)^2}{2\sigma_c^2}}. \quad (4.4)$$

Отже, якщо

$$\sum \delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \leq 3\sigma_c, \quad (4.5)$$

то ПР виконує своє завдання і ОМ буде встановлений у затискний пристрій.

Якщо, ж умова буде:

$$\sum \delta > 3\sigma_c, \quad (4.6)$$

то операція передбачена програмою може бути не виконана. В такому випадку слід добиватись вищої точності базування ОМ в СЗ.

Величина зміщення осі об'єкта відносно осі СЗ була перевірена двома індикаторами годинникового типу МКГ ГОСТ 9696–95 з ціною поділки 1мкм. Зміщення об'єкта визначалось у вигляді:

$$\delta_2 = \sqrt{\delta_{2x}^2 + \delta_{2y}^2}, \quad (4.7)$$

де  $\delta_{2x}$ ,  $\delta_{2y}$  – похибки центрування по осях  $x$  і  $y$ .

Результати дослідження дозволили встановити, що середнє значення похибки центрування об'єктів струменевими захоплювачами становить близько  $\delta_2=22$  мкм.

Похибка базування об'єктів на торці СЗП залежить від жорсткості розташованих базуючих елементів, їх сумарної площі та величини аеродинамічного ефекту. Її можна підрахувати:

$$\delta_\delta = \frac{Fh}{ES_{\text{сум}}}, \quad (4.8)$$

де  $F$  – величина присмоктуючої сили;

$h$  – висота базуючих елементів;

$E$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу базуючих елементів;

$S_{\text{сум}}$  – сумарна площа поперечного перерізу базуючих елементів.

Вимоги до конструктивного виконання базуючих елементів на торці СЗ повинні попереджувати утворення вихрових зон при обтіканні їх потоком стисненого повітря. Базуючі елементи виконуються у вигляді кутових секторів. Кількість базуючих елементів обмежена, їх зростання приводить до зниження силових характеристик захоплювача. Якщо вихідна площа  $S_0$  зменшується при розташуванні базуючих елементів до 10%, то силові характеристики захоплювача практично не змінюються. Враховуючи, що вихідна площа

радіального зазору при відсутності фрикційних накладок рівна  $S_g = 2\pi r_k h$ , а при їх присутності рівна:

$$S_{gn} = (2\pi - \varphi n) r_k h, \quad (4.9)$$

отримаємо залежність для розрахунку кількості  $n$  накладок з кутовою величиною  $\varphi$  і висотою  $h$

$$n \leq \frac{0,2\pi}{\varphi \text{ [рад.]}} = \frac{36}{\varphi \text{ [град.]}}. \quad (4.10)$$

## 4.2 Проектування стикувального пристрою руки промислового робота

Розроблений пристрій промислового робота для стискувальних операцій містить стикувальний вузол маніпулятора, стикувальні вузли робочих органів, із закріпленими робочими органами. Стикувальні вузли маніпулятора і робочих органів мають стикувальні робочі площини. Крім того, стикувальний пристрій промислового робота містить роз'ємні оптронні пари (випромінювачі 11 і приймачі 12, рис.4.1), закріплені в отворах обох стикувальних вузлів маніпулятора і робочих органів для передачі інформації від маніпулятора до робочих органів і навпаки.

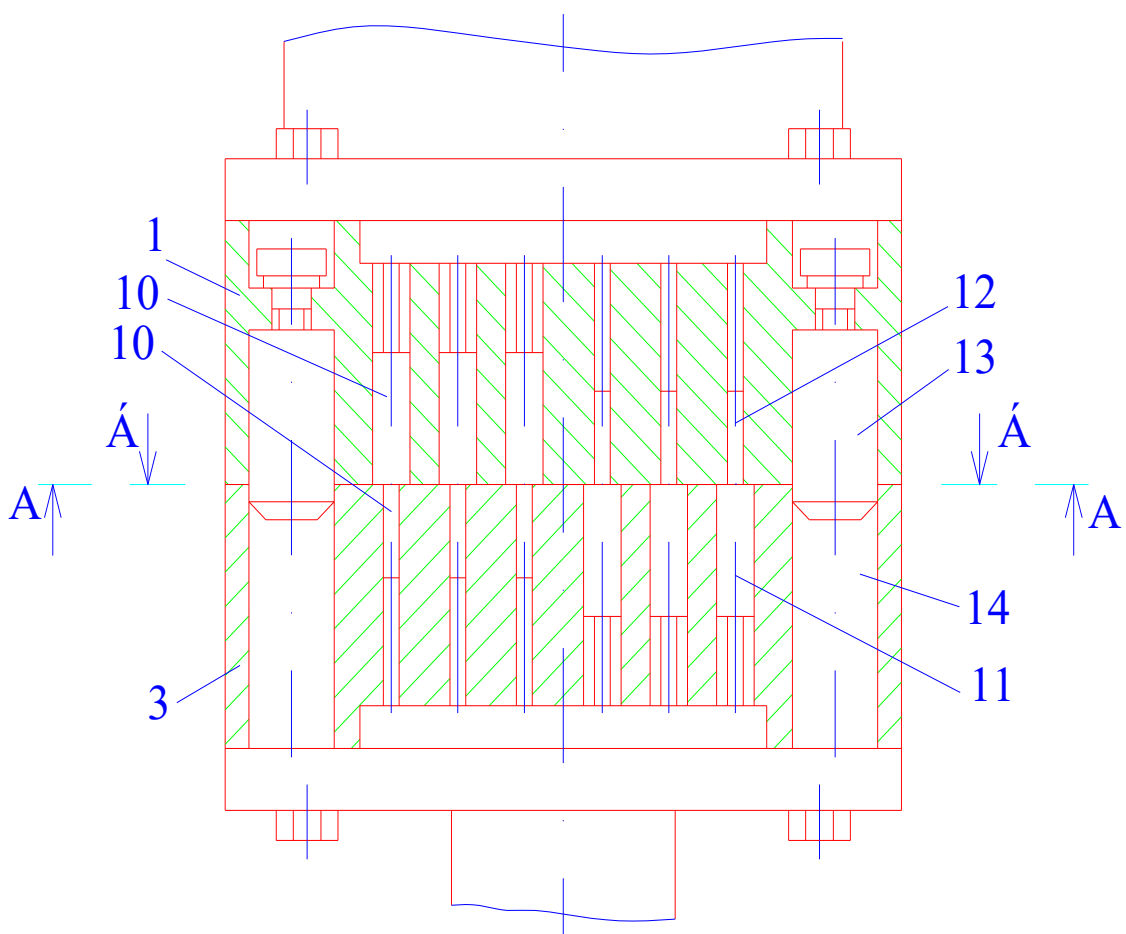


Рисунок 4.1 – Фронтальний розріз стикувального пристрою

Стикувальний вузол маніпулятора містить направляючі штифти 13, а стикувальні вузли мають направляючі отвори 14 під штифти 13. Стикувальний пристрій (рис. 4.2 - 4.4) має стиковані пневматичні і гідравлічні лінії 15, електромагніти 16, магнітопроводи 17 з вихідними обмотками 18 (рис. 4.2 - 4.5., 4.6, 4.7).

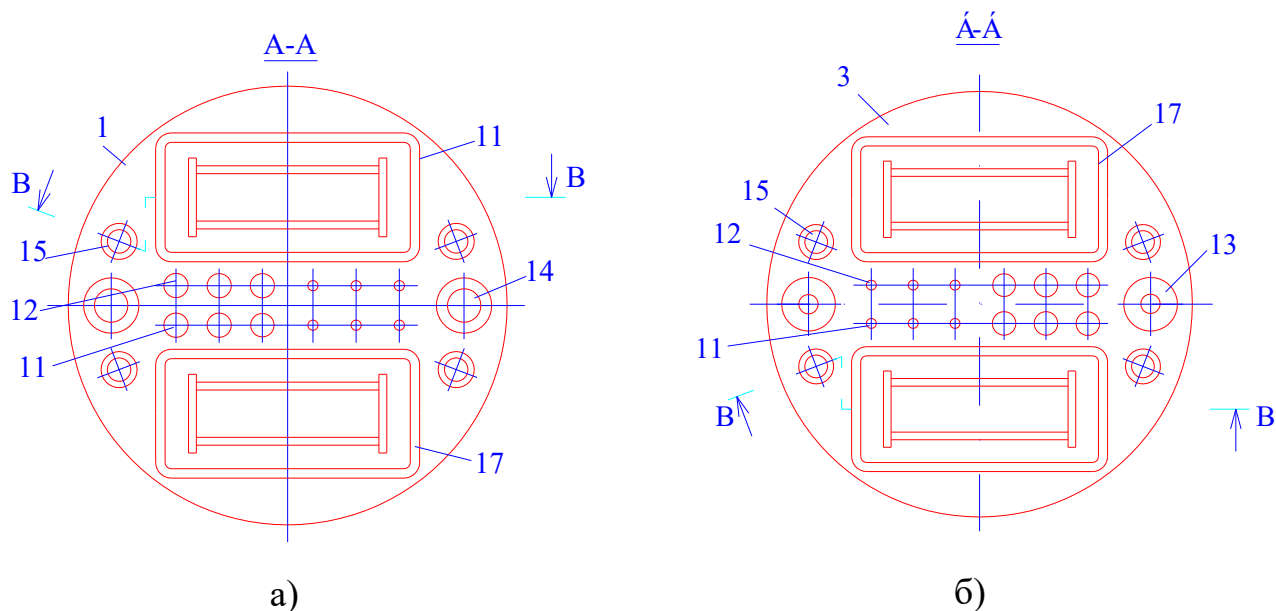


Рисунок 4.2 – Переріз А-А на рис. 4.1 по стикованій площині (а), переріз Б-Б на рис 4.1 по стикованій площині (б)

Електромагніти 16 містять внутрішні полюсники 19 і зовнішні охоплюючі полюсники 20, входні обмотки 21, закріплені між внутрішніми 19 і зовнішніми охоплюючими 20. Корпуси стикувальних вузлів маніпулятора і робочих органів виконані з немагнітного матеріалу. Внутрішні полюсники 19 електромагнітів 16 містять постійні магніти 22. Полісники 19 і 20 виконані з електротехнічної сталі з низьким коефіцієнтом залишкової намагніченості. Магнітопроводи 17 містять додаткові вихідні обмотки 23 в корпусах стикувальних вузлів робочих органів 3. Електромагніти 16 і магнітопроводи 17 утворюють роз'ємні трансформатори з входними обмотками 21 і вихідними обмотками 18. Стикувальний вузол маніпулятора (рис. 4.4, 4.5, 4.6, 4.7) оснащений джерелами постійної 24 і змінної 25 напруг. Виходи джерел напруг 24 і 25 сполучені з входом комутатора 26, виходи комутатора 26 - з входними обмотками 21 роз'ємних трансформаторів

(рис. 4.1). Джерела постійної 24 і змінної 25 напруг через комутатор 26 живлять вхідні обмотки 21 пульсуючою напругою.

Джерело постійної напруги 24 необхідне для збільшення стикувального зусилля та для шунтування постійного магніту 22 при розстиковці робочих органів. Джерело змінної напруги 25 потрібне для передачі енергії живлення до робочих органів.

Для збільшення опорного моменту  $M=F \cdot l$ , ( $F$  - сила притиску стикувального вузла робочого органу до стикувального вузла маніпулятора,  $l$  - плече сили) електромагніти 16 слід розташувати по периферії стикувальних контактних площин 9.

Стикувальний пристрій промислового робота також може мати варіант з роздільною передачею електричної енергії, коли є два типи електромагнітів 16 - з постійними магнітами 22 і без постійних магнітів. До електромагнітів 16 з постійними магнітами 22 стикувального вузла маніпулятора приєднані магнітопроводи 29 у вигляді пластин, закріплені в стикувальних вузлах робочих органів.

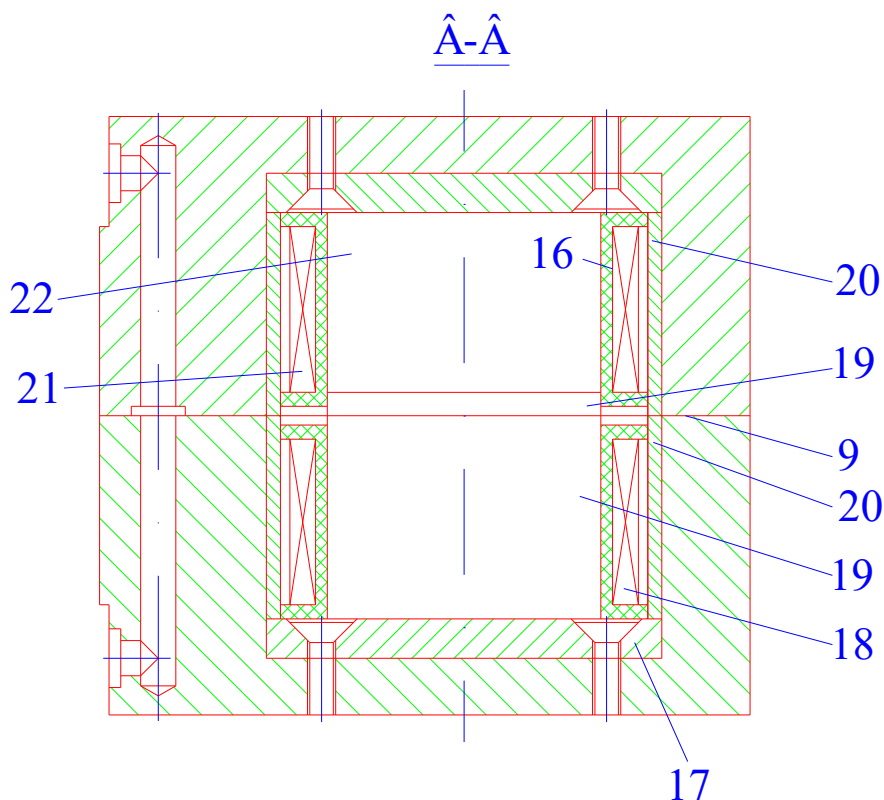


Рисунок 4.3 – Переріз В-В на рис. 4.2

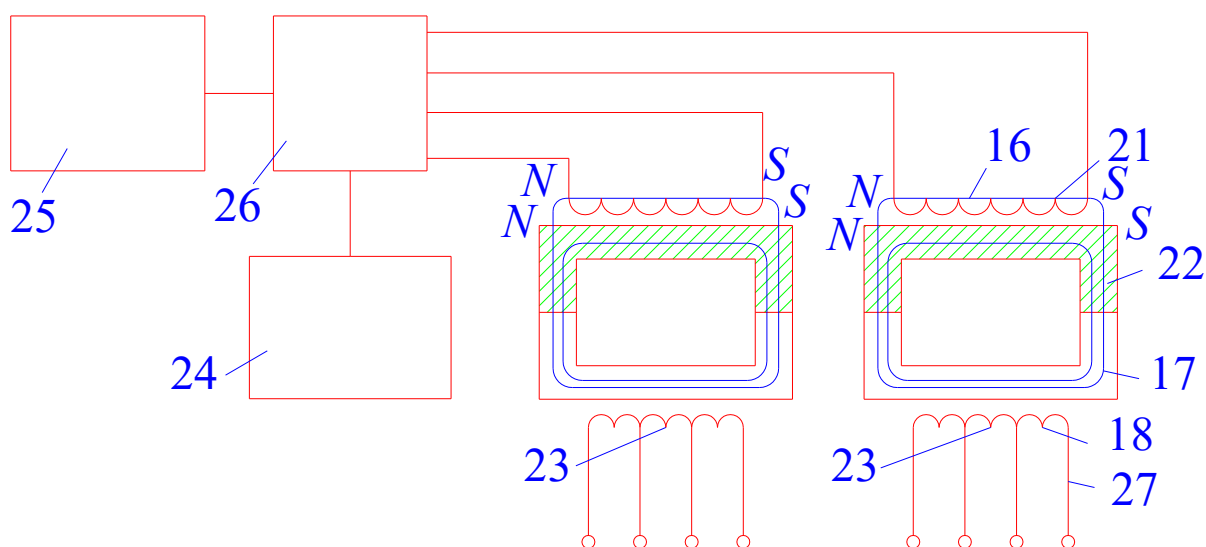


Рисунок 4.4 – Схема пристрою при роботі в режимі максимального зусилля

До електромагнітів 16 приєднані магнітопроводи 17 з внутрішніми 19 і зовнішніми 20 полюсниками і додатковими обмотками 23. Причому магнітопроводи 29 також виконані з електротехнічної сталі з низьким коефіцієнтом залишкової намагніченості. Електромагніти 16 без постійних магнітів утворюють також роз'ємні трансформатори. Джерело змінної напруги 25 для конструктивного виконання роз'ємних трансформаторів без постійних магнітів (рис. 4.8) живить вхідні обмотки 21 струмом.

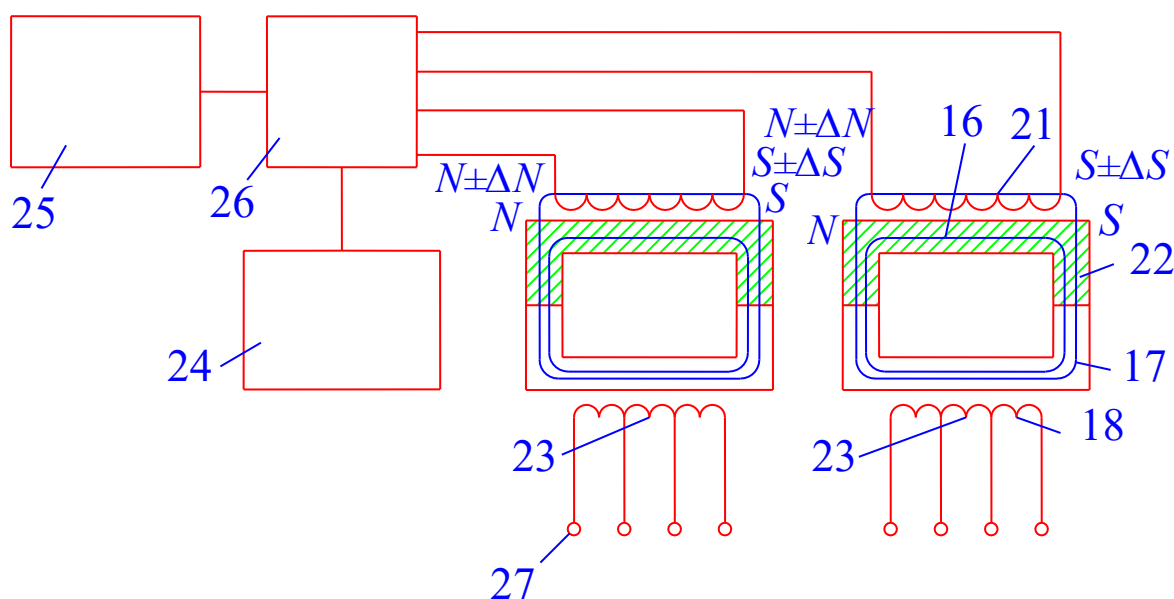


Рисунок 4.5 – Схема пристрою при роботі електромагнітів

Стикувальний вузол маніпулятора за допомогою руки маніпулятора 2 може стикуватися шляхом введення направляючих штифтів 13 (рис.4.2) у відповідні отвори 14 стикувальних вузлів робочих органів до стулення робочих площин 9 (рис.4.2). При цьому зістиковуються роз'ємні оптронні пари 10 для передачі зустрічної інформації. Потім зістиковуються пневматичні і гідравлічні лінії 15. Стикувальний вузол робочого органу притягується до стикувального вузла маніпулятора 2 і утримується за допомогою роздільної або сумісної дії постійних магнітів 22 і електромагнітів 16.

Стикувальний пристрій промислового робота має декілька режимів роботи: захват і утримання робочого органу електромагнітами 16 і постійними магнітами 22, захват і утримання робочого органу електромагнітами 16 і постійними магнітами 22 з передачею електричної енергії вихідним обмоткам 18, захват і утримання робочого органу постійними магнітами 22, відстикування робочого органу.

Захват й утримання робочого органу 4-8 електромагнітами 16 і постійними магнітами 22 проводиться таким чином. Стикувальний вузол маніпулятора 1 підводиться до стикувального вузла робочого органу 3 в стані, коли поле постійних магнітів 22 нейтралізовано полем електромагнітів 16, що живляться від джерела постійної напруги 24 через комутатор 26. Після стулення стикувальних робочих площин 9 комутатор 26 міняє полярність живлячої

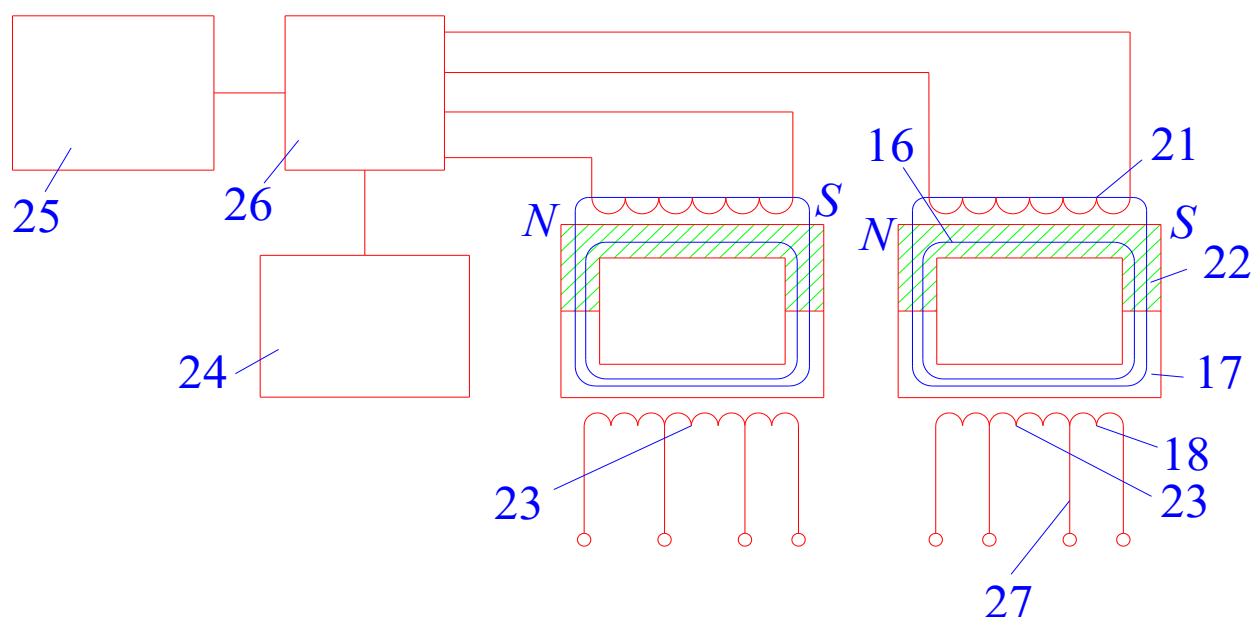


Рисунок 4.6 – Схема пристрою при відключених обмотках

постійної напруги обмоток 21 на протилежну. При цьому напрями магнітних потоків обмоток 21 співпадають з напрямками магнітних потоків постійних магнітів 22.

Захват і утримання робочого органу електромагнітами 16 і постійними магнітами 22 проводиться таким чином. Стикувальні вузли маніпулятора 1 і робочого органу 3 зімкнуті. На обмотки 21 електромагнітів 16 через комутатор 26 подається пульсуюча напруга. Постійна складова струму викликає магнітний потік. Сумарні магнітні потоки електромагнітів 16 і постійних магнітів 22 притягають магнітопроводи 17 стикувального вузла робочого органу 3 і утримують його. Змінна складова струму наводить ЕРС взаємоіндукції на вихідних обмотках 18 і 23 роз'ємного трансформатора.

Захват і утримання робочого органу постійними магнітами 22 проводиться таким чином. Стикувальний вузол маніпулятора 1 підводиться до стикувального вузла робочого органу 3 в стані, коли поле постійних магнітів 22 нейтралізовано полем електромагнітів 16. Після стулення робочих площин 9 комутатор 26 відключає живлення. Магнітні потоки постійних магнітів 22 притягають магнітопроводи 17 і утримують його. Переваги цього режиму виявляються у разі аварійного відключення електроенергії.

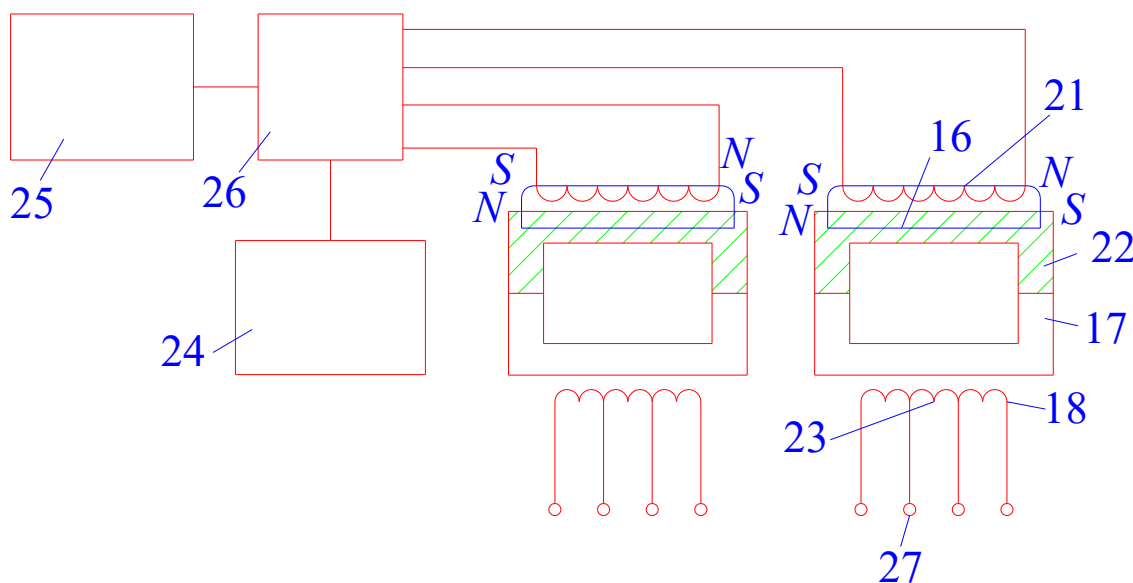


Рисунок 4.7 – Схема пристрою при роботі електромагнітів

Відстикування робочого органу проводиться за рахунок подачі напруги зворотної полярності від джерела постійної напруги 24 через комутатор 26. Протікаючий по обмоткам 21 електромагнітів 16 електричний струм викликає магнітний потік, який нейтралізує магнітний потік постійних магнітів 22. При цьому електромагніти 16 стикувального вузла маніпулятора більше не утримують магнітопроводи 17 стикувального вузла робочого органу 3 і розстикування проводиться без зусиль.

Варіант стикувального пристрою промислового робота (рис.4.8) також працює в розглянутих режимах від джерела змінної напруги 25 через комутатор 26 на обмотки 21 подається змінна напруга. Можна збільшити зусилля утримання магнітопроводів 17 за рахунок подачі пульсуючої напруги на обмотки 21.

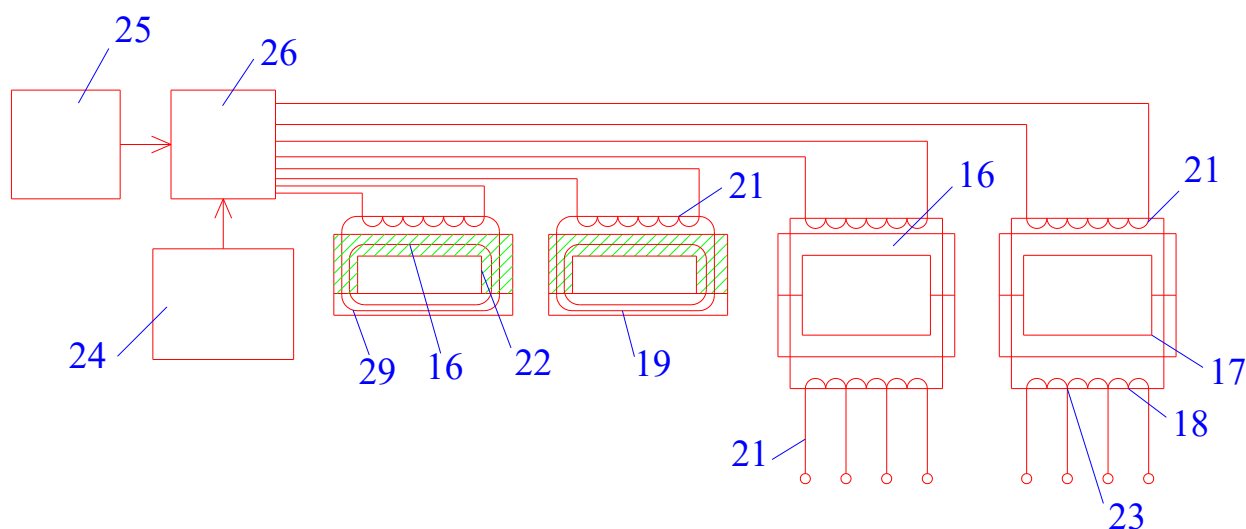


Рисунок 4.8 – Схема пристрою з роздільною передачею електричної енергії

Безконтактна передача інформаційних сигналів і силової електроенергії дозволяє покращити заводозахисність і підвищити надійність передачі. Застосування магнітної фіксації сприяє процесу стикування за рахунок зменшення довжини направляючих штифтів і, відповідно, ходу стикування.

Застосування магнітної фіксації стикувальних вузлів дозволяє спростити конструкцію пристрою за рахунок: відсутності механічної фіксації, переміщення

направляючих штифтів в стикувальний вузол маніпулятора і скорочення загального числа штифтів.

#### 4.3 Проектування магнітно-струменевого захвата

Розроблений захоплювач складається з корпусу 1 у якому змонтована конічна вставка 2, що виконані з немагнітного матеріалу на основі алюмінію. Корпус і вставка утворюють камеру 3, для підводу стисненого повітря і кільцеву конічну щілину 4. До корпусу 1 кріпиться осердя 5 з розташованою у ньому котушкою 6. По периферії котушка обмотується ізоляційним матеріалом. Виводи котушки приєднуються до електромережі з напругою 24...36 В. Для усунення залишкового магнетизму після вимкнення живлення електромагніта, необхідно в процесі його виготовлення провести відпалювання осердя з нагріванням до 600...700°C.

В камеру 3 подається стиснене повітря від магістралі. В процесі витікання із щілини 4 кільцевий конічний повітряний струмінь заломлюється до поверхні заготовки. При увімкненому живленні котушки на заготовку діє також електромагнітна сила. Зближення торців захоплювача і заготовки до величини 0,2 мм приводить до значного зростання втрат енергії потоку повітря на тертя в радіальному. При зближенні 0,005...0,01 мм пружна дія пневматичної подушки зрівноважить електромагнітну силу.

Розроблений захват дозволяє приєднувати модулі, що дозволяє захоплювати не тільки плоскі деталі, а й деталі з глухими і наскрізними отворами. Для приєднання даних модулів в конічній вставці змонтована котушка 7 яка приєднується до електромережі. При увімкненому живленні під дією електромагнітної сили, модуль переміщається вздовж центрального отвору конічної вставки і утримується в такому положенні до відключення живлення. Для уникнення аварійних ситуацій, при раптовому відключенні живлення, тобто щоб модуль не випав із захвата, в розробленому захваті змонтовані котушки 8, при подачі напруги на які, виникає електромагнітна сила яка втягує фіксатори 9 всередину камери 10. При відключенні живлення пружина 11 виштовхує фіксатори 9 з камери і вони фіксуючи приєднаний модуль запобігають випаданню його з захвата.

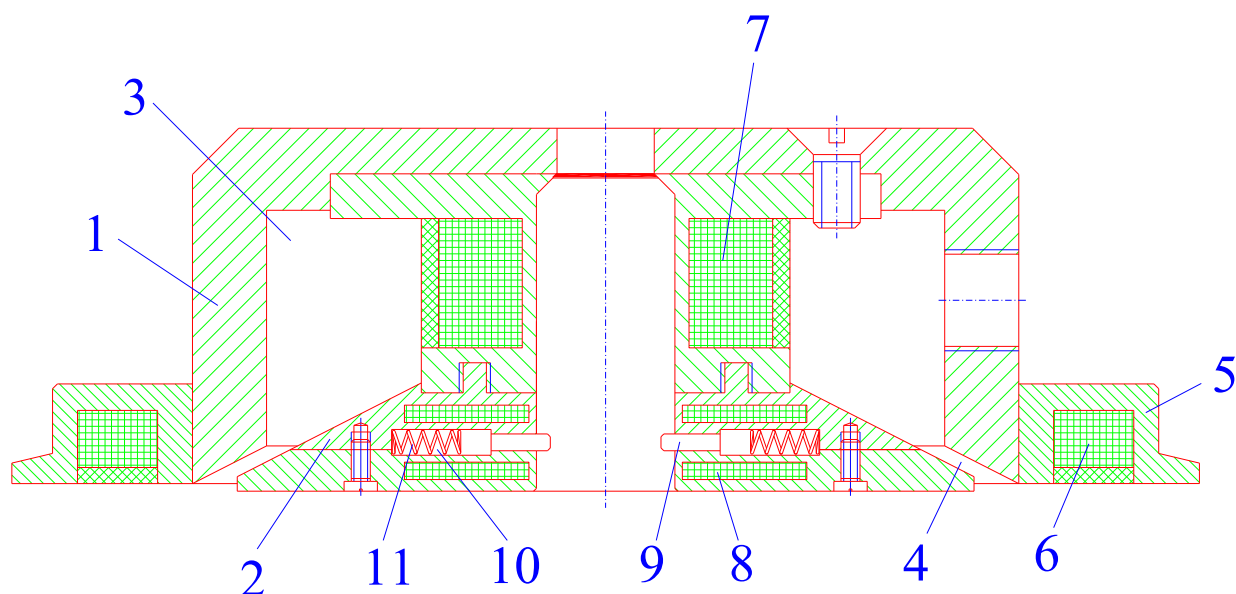


Рисунок 4.9 – Схема безконтактного магнітно-струменевого захвату

## ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було удосконалено комбіновані захоплюючі пристрої промислового робота, а також:

- проведений аналіз літературних джерел щодо захоплюючих пристроїв;
- проведені комплексні дослідження схем, конструкцій і елементів відомих захоплюючих пристроїв;
- отримано результати щодо вдосконалення, дослідження та експлуатації захоплюючих пристроїв;
- показаний вплив характеристик механізмів структури конструктивних елементів захоплюючих пристроїв.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота: методичні вказівки до оформлення кваліфікаційних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти всіх освітніх програм денної та заочної форм навчання / уклад. Н.В. Ковальчук, Ю.Г. Фесіна, І.Л.Заблоцька Луцьк : ЛНТУ, 2023. 46 с.
2. Інноваційні підходи в підготовці магістрів з прикладної механіки : навч. посіб. / Т. Є. Божко, Б. П. Валецький, Л. М. Самчук, Т. І. Четвержук . – Луцьк : Вежа-Друк, 2024. – 324 с.
3. Методичні рекомендації до написання кваліфікаційної роботи за ступенем вищої освіти «магістр» : метод. рекомендації для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньої програми «Прикладна механіка», спец. 131 Прикладна механіка, галузі знань 13 Механічна інженерія денної та заоч. форм навч. / уклад.: Т. І. Четвержук, Р. М. Полінкевич. – Луцьк: ЛНТУ, 2024. 48 с.
4. Дмитрієв Д.О. Кінетостатичний аналіз каркасних компонок верстатів з механізмами паралельної структури // Науковий журнал "Технологічні комплекси" №2, 2010. – с. 40-45.
5. Борозенець Г.М., Павлов В.М., Семак І. В. Деталі машин : Навчальний посібник. – К.: Видавничий дім «Кондор», 2021. – 220 с.
6. Головня В.Д. САПР технологічних процесів : конспект лекцій / В.Д. Головня. – Житомир : Житомирська політехніка, 2019. – 200 с.
7. В. Боярчук Особливості проектування комбінованих захоплюючих пристроїв // Тези IV студентської науково-технічної конференції факультету транспорту та механічної інженерії “Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії ” (16 листопада 2024 року). – Луцьк: ЛНТУ – 2023 – С.6-9.
8. Ямпольский Л.С. та ін. Елементи роботи технічних пристроїв і модулі ГВС: Підручник / Л.С. Ямпольський, М.М. Поліщук, М.М. Ткач; За заг. ред. Л.С. Ямпольського. – К.: Вища шк., 1992. – 431 с.: іл.

9. Патент США №3343864 Material handling apparatus and the like / BAER JAMES/ Опубліковано 1967-09-26. 8.
10. Патент США №2002157388A1 Pump-integrated flexible actuator /SETO TAKESHI, TAKAGI KUNIHICO/ Опубліковано 2002-10-31. 9.
11. Патент США №4815782A Grappling device /CRAIG PRESTON S, FISHER JEFFREY/ Опубліковано 1989-03-28.
12. Павленко І.І., Мажара В.А. Роботизовані технічні комплекси / Под ред. Павленко І.І. - Навчальний посібник 2012 - 393с.
13. Khalifa H. Harib, Kamal A.F. Moustafa, A.M.M. Sharif Ullah and Salah Zenieh: Parallel, Serial and Hybrid Machine Tools and Robotics Structures: Comparative Study on Optimum Kinematic Designs - 110-124p.
14. Технологічні машини. Розрахунок і конструювання: Навчальний посібник / Ю.В. Кодра, З.А. Стоцько; За ред. З.А. Стоцька. – Львів: Бескид БІТ, 2004. – 466с.
15. Павленко І.І., Мажара В.А. Продуктивність функціонування двозахватних промислових роботів на позиціях допоміжних пристроїв // Прогресивні технології і системи машинобудування. Міжнародний збірник наукових праць. – Вип. 30 – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – С. 170 – 175.
16. Павленко І.І., Мажара В.А. Конструктивно-кінематична структура двозахватних пристроїв промислових роботів // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Вип. 19 – Краматорськ – Київ, 2006. – С. 104 – 109.
17. Антонюк В.С., Клименко С.Ан., Клименко С.А. Теплові явища при обробці різанням: Навч. посібник. – К.: НТУ України «КПІ», 2014. – 156 с.