

**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»**

**Проектування промислового робота-маніпулятора з  
електромагнітним захватним пристроєм**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи ПМм-21  
Ткачук Андрій Олександрович

(підпис)

Керівник:  
к.т.н., доцент  
Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.  
к.т.н., доцент  
Гарант освітньої програми:  
Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

**Луцький національний технічний університет**

**Факультет** Транспорту та механічної інженерії  
**Кафедра** Прикладної механіки та мехатроніки  
**Другий (магістерський) рівень**  
**освітньо-професійної програми** «Прикладна механіка»  
**Спеціальність** 131 Прикладна механіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Р. РЕДЬКО

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Ткачука Андрія Олександровича  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Проектування промислового робота-маніпулятора з електромагнітним захватним пристроєм» керівник кваліфікаційної роботи магістра Четвержук Тарас Іванович к.т.н., доц. каф. ПМіМ, затверджена наказом вищого навчального закладу від від «14» червня 2025 р. № 391/01-07
2. Строк подання студентом роботи 02.12.2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: звіт з переддипломної практики, технічна документація аналогів роботів-маніпуляторів, інструкція для контролера, конструкторська документація, нормативні дані.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)  
1. Загальний розділ. 2. Конструювання і розрахунок захватного пристрою. 3. Розробка електроприводу. 4. Розробка системи управління електроприводу.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Презентація

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

24.06.2025 р.

Керівник

\_\_\_\_\_ (підпис)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_ (підпис)

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів виконання кваліфікаційної роботи магістра	Примітка
1.	<i>Загальний розділ</i>	<i>01.10.2025</i>	
2.	<i>Конструювання і розрахунок захватного пристрою</i>	<i>17.10.2025</i>	
3.	<i>Розробка електроприводу</i>	<i>30.10.2025</i>	
4.	<i>Розробка системи управління електроприводу</i>	<i>29.11.2025</i>	
6.	<i>Електронний варіант кваліфікаційної роботи магістра</i>	<i>20.12.2025</i>	
7.	<i>Представлення роботи до захисту</i>	<i>27.12.2025</i>	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Ткачук А.О.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Четвержук Т.І.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Ткачук А.О. Проектування промислового робота-маніпулятора з електромагнітним захватним пристроєм. – Рукопис.

Атестаційна магістерська робота на здобуття кваліфікації другого (магістерського) рівня вищої освіти із спеціальності 131 – Прикладна механіка. – Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2025.

Робота присвячена питанням проектування та дослідження систем автоматизації в машинобудуванні, зокрема розробці ефективних механізмів та систем управління промисловими роботами-маніпуляторами.

У теоретичній частині розглянуто сфери застосування роботів у сучасному виробництві, проведено класифікацію промислових маніпуляторів та детальний аналіз конструкцій захватних пристроїв.

Практична частина містить повний цикл конструювання електромагнітного захвату: від розрахунку зусиль затиску та аналізу схем навантаження до проектування самого електромагніту. Особливу увагу приділено розробці системи електроприводу, що включає обґрунтування технічних вимог, вибір електродвигунів за потужністю та підбір елементів силової схеми.

Заключний розділ присвячений розробці системи управління, в якому розраховано статичні характеристики, що дало змогу спроектувати замкнуту систему електроприводу та описати алгоритм роботи принципової схеми управління промисловим роботом маніпулятором з електромагнітним захватом.

Ключові слова: робот-маніпулятор, захват, система управління, моделювання, управляючий елемент, похибка, оптимізація, позиціонування.

## ANNOTATION

Tkachuk A. Design of an industrial robot manipulator with an electromagnetic gripping device. – Manuscript.

Attestation master's thesis for obtaining the qualification of the second (master's) level of higher education in specialty 131 – Applied mechanics. – Lutsk National Technical University.– Lutsk, 2025.

The work is dedicated to the design and research of automation systems in machinery, the development of effective mechanisms and control systems for industrial robotic manipulators.

The theoretical part examines the areas of use of robots in current production, carries out a classification of industrial manipulators and a detailed analysis of the design of gripping devices. It is practical to carry out a new cycle of designing the electromagnetic capture: from the design phase, the design and analysis of the magnetization circuits to the design of the electromagnet itself.

Particular attention is paid to the development of the electric drive system, which includes the arrangement of technical components, the selection of electric motors for tension and the selection of power circuit elements.

The final section is devoted to the development of a control system, which covers static characteristics, which made it possible to design a closed-loop electric drive system and describe the algorithm of the operating principles of control of an industrial robot manipulator with an electromagnetic gripper.

Keywords: robot manipulator, gripper, control system, modeling, control element, error, optimization, positioning.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ .....	10
1.1 Використання роботів-маніпуляторів в машинобудуванні.....	10
1.2 Класифікація промислових роботів-маніпуляторів.....	12
1.3 Аналіз захватних пристроїв роботів-маніпуляторів.....	14
2 КОНСТРУЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК ЗАХВАТНОГО ПРИСТРОЮ.....	17
2.1 Розрахунок зусиль затиску електромагнітного захвату.....	17
2.2 Схема навантаження.....	19
2.3 Розрахунок електромагніту.....	21
3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.....	26
3.1 Опис конструкції та технології роботи механізму.....	26
3.2 Обґрунтування вимог до електроприводу.....	27
3.3 Розрахунок потужності та вибір двигунів.....	27
3.4 Розрахунок та вибір основних елементів силової схеми.....	37
4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	41
4.1 Розрахунок та побудова статичних характеристик у розімкнутій системі.....	41
4.2 Розробка замкнутої системи електроприводу.....	44
4.3 Розробка схеми управління та опис її роботи.....	45
ВИСНОВОК.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	48
ДОДАТКИ.....	51

## ВСТУП

Сучасний етап розвитку глобальної промисловості характеризується переходом до повної цифровізації виробничих процесів та впровадженням концепцій Industry 4.0 та вже переходу до Industry 5.0. Провідну роль у цьому процесі відіграють промислові роботи-маніпулятори, які дозволяють мінімізувати вплив людських факторів, підвищити точність операцій та забезпечити безперервність циклу виробництва.

Особливе місце серед робототехнічних систем посідають маніпулятори з електромагнітними захватними пристроями. На сьогоднішній день попит на такі системи значно зріс у металургійній, машинобудівній та логістичній галузях. Це зумовлено їхньою здатністю швидко та надійно оперувати деталями складної конфігурації, де використання традиційних механічних чи вакуумних захватів є технічно складним або енергетично не вигідним. Проектування таких роботів дозволяє вирішити ключові завдання сучасної інженерії: підвищення продуктивності праці, зниження енерговитрат завдяки використанню електропостійних магнітів та забезпечення високого рівня техногенної безпеки на підприємствах.

*Актуальність теми.* В сучасних умовах дефіциту кадрів машинобудівні підприємства прагнуть максимально автоматизувати процеси переміщення металевих заготовок, що потребує надійних маніпуляторів, здатних працювати з великою вагою без ризику пошкодження деталей захватними пристроями. Електромагнітні захватні пристрої дозволяють маніпулювати об'єктами складної геометричної форми (листи, труби, деталі з отворами), де традиційні затискачі неефективні. Це значно скорочує час циклу операції завантаження-розвантаження.

Сучасне проектування зосереджене на створенні систем з імпульсним керуванням (електропостійні магніти), які споживають енергію лише в момент захоплення/відпускання, що відповідає актуальним вимогам енергозбереження.

Інтеграція додаткових датчиків у магнітний захват дозволяє роботу самостійно визначати силу притягання та тип металу, забезпечуючи інтелектуальну взаємодію з об'єктами в реальному часі. Це є актуальною задачею в контексті розвитку концепції Industry 4.0 та 5.0.

Таким чином, у даній кваліфікаційній роботі магістра буде спроектовано промисловий робот-маніпулятор з детальною розробкою електромагнітного захватного пристрою та вдосконаленою системою управління.

*Метою даної роботи є проектування ефективний промисловий робот-маніпулятор, здатний здійснювати прецизійне захоплення, транспортування та позиціонування деталей, оптимізувавши його конструктивні параметри та алгоритми управління.*

Для досягнення мети поставлено наступні *задачі*:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій маніпуляторів та типів різних захватів.
2. Розрахувати кінематичні та динамічні характеристики маніпулятора.
3. Розробити конструкцію електромагнітного захвату промислового робота-маніпулятора з оптимальною вантажопідйомністю.
4. Спроектувати систему управління електроприводів, що забезпечують точність позиціонування.

*Об'єкт дослідження.* промисловий робот-маніпулятор та процеси автоматизації машинобудівних виробництв.

*Предмет дослідження.* конструкція та система керування промислового робота-маніпулятора, оснащеного електромагнітним захватним пристроєм.

*Методи дослідження.* CAD-CAM-CAE технології в машинобудуванні, методи системного аналізу і синтезу, математичне та комп'ютерне моделювання динамічних систем, теорія автоматичного управління, цифрова обробка сигналів, а також методи штучного інтелекту.

*Практичне значення та новизна результатів.* Розроблений робот-

маніпулятор скорочує час на допоміжні операції (захоплення/базування) на 15-20% порівняно з механічними аналогами за рахунок відсутності необхідності точного суміщення затискачів. Впровадження імпульсного керування електромагнітом дозволяє знизити споживання електроенергії захватним пристроєм до 40%, оскільки струм споживається лише в моменти активації та деактивації. Спроектвана система може бути легко адаптована для роботи з різними типами металевих виробів (від листової сталі до дрібних металовиробів) без переналагодження механічної частини.

*Новизна* роботи полягає в оптимізації конструктивних параметрів промислового робота-маніпулятора шляхом впровадження комбінованої схеми управління електромагнітного захвату, що забезпечує надійне утримання вантажів.

*Особистий внесок здобувача.* Основні результати та технічні рішення, які розкривають зміст магістерської роботи, рекомендації та висновки належать автору. Автором самостійно сформовано задачі дослідження, обрано методи дослідження та проведено увесь комплекс проектних та конструкторських рішень.

*Апробація результатів роботи.* Основні результати роботи доповідалися на V студентській науково-технічній конференції «Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії» факультету транспорту та механічної інженерії ЛНТУ. м. Луцьк, 13 листопада 2025 року, а пройшли апробацію на наукових семінарах кафедри прикладної механіки та мехатроніки ЛНТУ.

*Структура та обсяг роботи.* Кваліфікаційна магістерська робота складається із вступу, 4 розділів, висновку та списку використаних літературних джерел. Зміст роботи представлено на 47 сторінках ф. А4, містить 18 рисунків. Список використаних літературних джерел складається з 22 позицій.

## РОЗДІЛ 1

### ЗАГАЛЬНИЙ

#### 1.1 Використання роботів-маніпуляторів в машинобудуванні

Роботи-маніпулятори в машинобудуванні (рисунок 1.1) незамінні для автоматизації складних, небезпечних і точних операцій, виконуючи завдання механічної обробки, зварювання, складання, фарбування, пакування, а також обслуговування верстатів (завантаження/розвантаження) з високою швидкістю та точністю, що підвищує якість, продуктивність та безпеку виробництва, замінюючи ручну роботу там, де потрібна стабільна, повторювана робота [1, 21]. Маніпулятором, в свою чергу, називають пристрій, що імітує робочі та рухові функції людської руки і працює автоматично або управляється оператором [14].



Рисунок 1.1 – Промислові роботи-маніпулятори

Основними та найпопулярнішими сферами застосування в машинобудуванні [5] даного типу обладнання є :

- Обслуговування верстатів, для завантаження заготовок та вивантаження готових деталей;
- Механічна обробка матеріалів. Обробка деталей різанням, штампування, лиття під тиском, полірування і. т.д.
- Операції складання. Роботи-маніпулятори збирають складні вузли, забезпечуючи повторюваність операцій;
- Зварювання та фарбування. Виконуються з високою точністю в небезпечних та/або шкідливих для людини умовах;
- Забезпечення контролю якості: Використання датчиків положення і машинного зору для автоматичної перевірки продукції.
- Адитивне виробництво. Застосування роботів-маніпуляторів для 3D-друку складних геометричних конструкцій.

Перевагами використання у механообробному, або механоскладальному виробництві таких роботів є:

- Підвищення продуктивності. Роботи працюють безперервно та швидше за людину;
- Безпечність використання. Виконують небезпечні роботи, знижуючи ризик травматизму для робітників, або роботу у шкідливих та небезпечних умовах.
- Точність. Здатні виконувати надзвичайно точні операції та забезпечують стабільне повторення операцій, із високими та якісними показниками.

Впровадження роботизованих маніпуляторів у гнучкі виробничі лінії [22] дозволяє повністю автоматизувати взаємодію з верстатним парком підприємства. Відповідно, функціональне навантаження маніпулятора охоплює весь логістичний ланцюжок у межах робочого місця: маніпуляції з заготовками, ініціацію виробничого процесу, контроль за станом робочої зони та складування готових компонентів.

## 1.2 Класифікація промислових роботів-маніпуляторів

У зв'язку з величезністю технологічних можливостей застосування роботів-маніпуляторів існує їх різноманітність, які відрізняються конструкцією, формою, технічними характеристиками та енергетичними критеріями.

Згідно з рисунком 1.2, промислові роботи-маніпулятори поділяють на групи за функціональними операціями, рівнем спеціалізації та сферою виробничого застосування (механообробка, складання, ковальсько-пресоване, зварювання, фарбування, транспортно-складські тощо). Крім того, їх розрізняють за технічними параметрами – архітектурою системи координат, видом енергопривода, гнучкістю програмного забезпечення та методами програмування траєкторій виконавчих рухів (позиційні чи контурні).

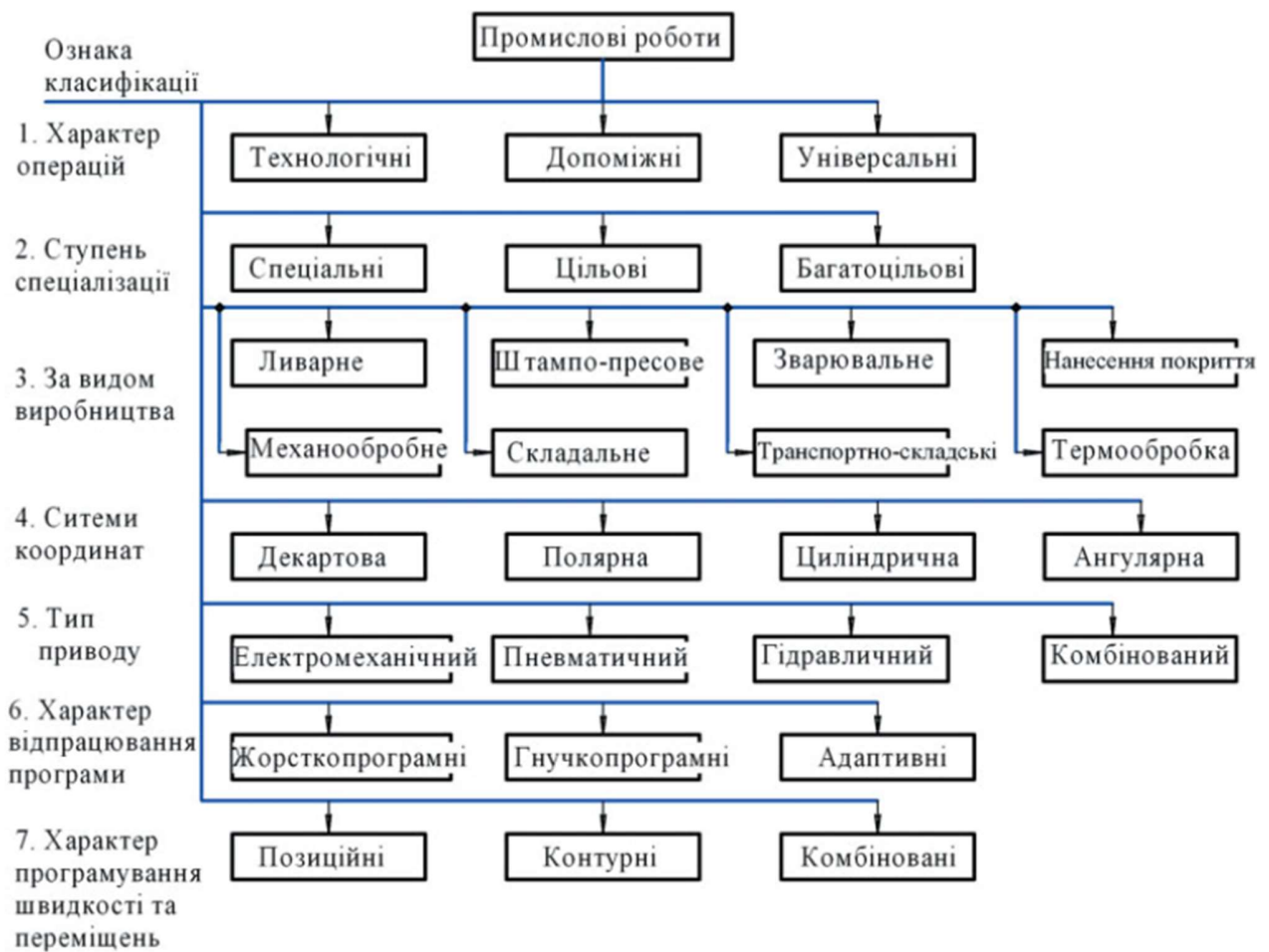


Рисунок 1.2 – Класифікація роботів-маніпуляторів

Розрізняють такі види промислових роботів-маніпуляторів за формою робочого простору [16] та представлені на рисунку 1.3.

1) Прямокутна (а). Використовуються три перпендикулярні ланки для руху вздовж осей координат X, Y, Z. Переміщаючи три шарніри один відносно одного, робот здатний працювати в межах прямокутної робочої зони.

2) Циліндрична (б). У ній використовується вертикальна колона і повзун, який можна переміщати вгору і вниз по колоні. Маніпулятор прикріплений до повзуна таким чином, що його можна переміщати радіально щодо колоні. Обертаючи колону, робот здатний рухатися по циліндричній робочій зоні.

3) Сферична (в). Використовує телескопічну штангу, яку можна піднімати або опускати навколо горизонтальної точки повороту. Точка повороту встановлена на основі, яка обертається, і забезпечує роботу вертикальний рух. Ці шарніри забезпечують роботу можливість рухати рукою в межах сферичної зони.

4) Шарнірне плече (г). Вона складається з двох прямих компонентів, плечові та згинальні шарніри, які обертаються навколо горизонтальних осей, що відповідають передпліччю та плечу людини. Його робоча зона має неправильну форму.

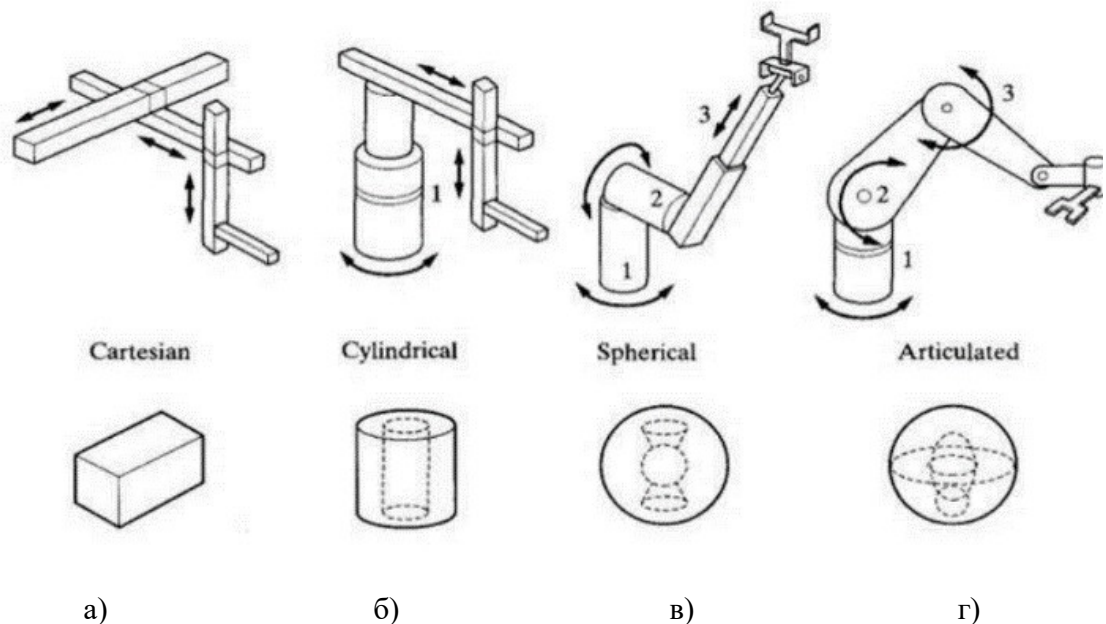


Рисунок 1.3 – Класифікація роботів за формою робочого простору

Також промислові роботи розрізняються за степенями вільності (рисунок 1.4). Якщо робот має три ступені вільності (свободи), він може вільно рухатися вздовж осей X, Y і Z, але не може нахилитися або обернутися. Коли кількість осей робота збільшується, він стає більш гнучким.

У виробництві промислових роботів, як правило, необхідно оснащувати периферійним обладнанням, таким як поворотний стіл для обертання заготовки, мобільний візок для переміщення заготовки тощо. Керування рухом і положенням цих периферійних пристроїв має узгоджуватися з промисловими роботами та вимагати відповідної точності. Найбільш популярним у виробництві є 6-осьовий промисловий робот, який має 6 рухомих з'єднань (осей). Визначення осей руху відрізняються у різних промислових роботів.

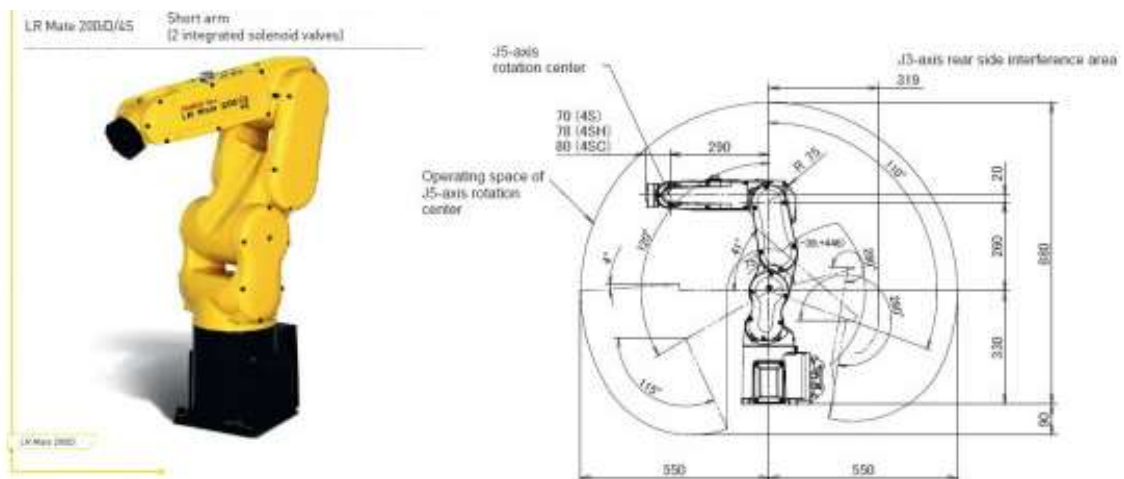


Рисунок 1.4 – Класифікація роботів за степенями вільності

### 1.3 Аналіз захватних пристроїв роботів-маніпуляторів

Захватним пристроєм (ЗП) промислового робота називається його робочий орган, який призначений для захвату та утримання предмета виробництва та (або) технологічного оснащення. ДСТУ EN 14238:2018 [6] встановлює такі типи

захватних пристроїв промислових роботів: механічні, вакуумні, магнітні та інші (рисунок 1.5).

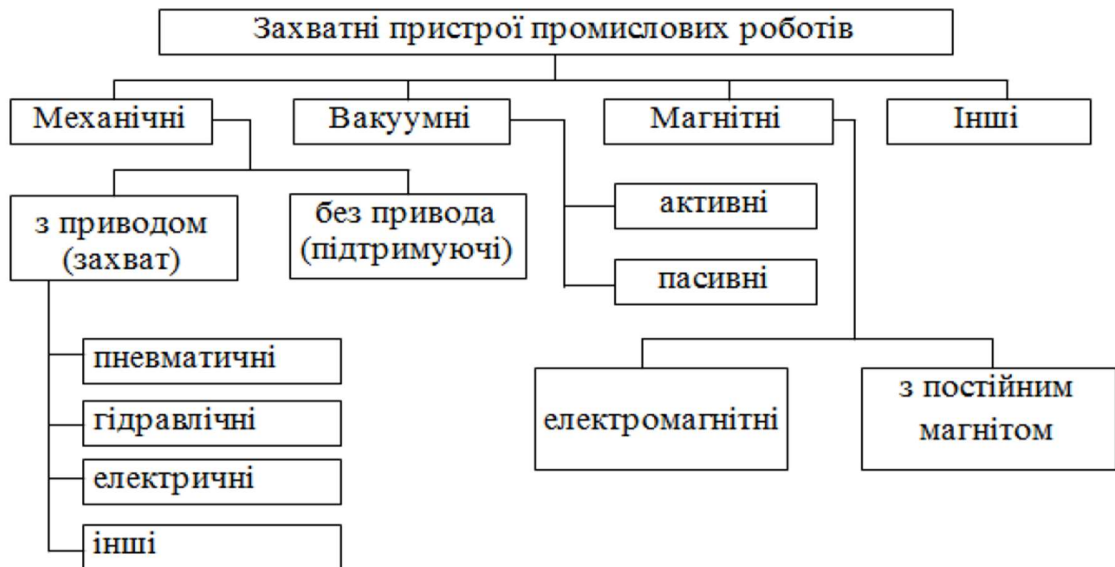


Рисунок 1.5 – Захватні пристрої промислових роботів

Найпоширенішим типом захватів є механічні (затискні), в яких використовуються пальці (2, 3 або більше) для фіксації деталі або заготовки. Вакуумні захватні пристрої зазвичай це присоски та вакуумні ежектори. Вони ідеально підходять для плоских, крихких або пористих деталей (скло, коробки).

Магнітні ЗП це електромагніти або постійні магніти для маніпуляцій з магнітними деталями. Швидкі в роботі, але обмежені типом матеріалу. Пневматичні ЗП володіють високою швидкістю, простотою конструкції, проте мають низьку точність позиціонування пальців робочих органів (пальців).

Електричні ЗП дозволяють точно контролювати силу затиску та положення, що важливо для роботи з крихкими заготовками або предметами.

Гідравлічні ЗП використовуються для переміщення надважких вантажів завдяки великій потужності, проте мають складну конструкцію і додаткові гідравлічні системи живлення.

Для ефективного підбору ЗП аналізують такі показники:

- Вантажопідйомність. Вага об'єкта з урахуванням сил інерції при русі;
- Форма та матеріал. Твердість, шорсткість та геометрія деталі;
- Виробниче середовище з врахуванням температури, наявності агресивних речовин або небезпечних технічних умов.

Для підбору конкретних типів та моделей ЗП промислових роботів-маніпуляторів слід підлаштовуватися під конкретні умови виробництва. В нашому випадку ми будемо проектувати робот-маніпулятор з електромагнітним ЗП, так як у нас переважно використовуються металеві заготовки та деталі.

Висновок до розділу.

Виконавши загальний розділ можна зробити наступні висновки. Аналіз типів та видів промислових роботів-маніпуляторів, їх побудови, способів автоматизації їх систем управління допомогло визначитись із наступними кроками щодо розробки та проектування альтернативної конструкції з електромагнітним захватним пристроєм та відповідно системи його керування.

## РОЗДІЛ 2

## КОНСТРУЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК ЗАХВАТНОГО ПРИСТРОЮ

## 2.1 Розрахунок зусиль затиску електромагнітного захвату

При конструюванні найбільш поширених захватних пристроїв (ЗП) роботів необхідно враховувати конкретний тип деталі або групи деталей, їх форму, матеріал та умови технологічних процесів. Важливі критерії при цьому – необхідна точність утримання деталі та допустиме зусилля на губках. Тому розроблено велику кількість різних ЗУ, які відрізняються кінематичною схемою та іншими конструктивними параметрами [3, 10].

Промисловий робот-маніпулятор спроектований за найбільш поширеною та універсальною кінематичною схемою – шести рухомого маніпулятора з обертальними кінематичними парами та електромагнітним захватним пристроєм. Його 3D – модель представлена на рисунку 2.1.

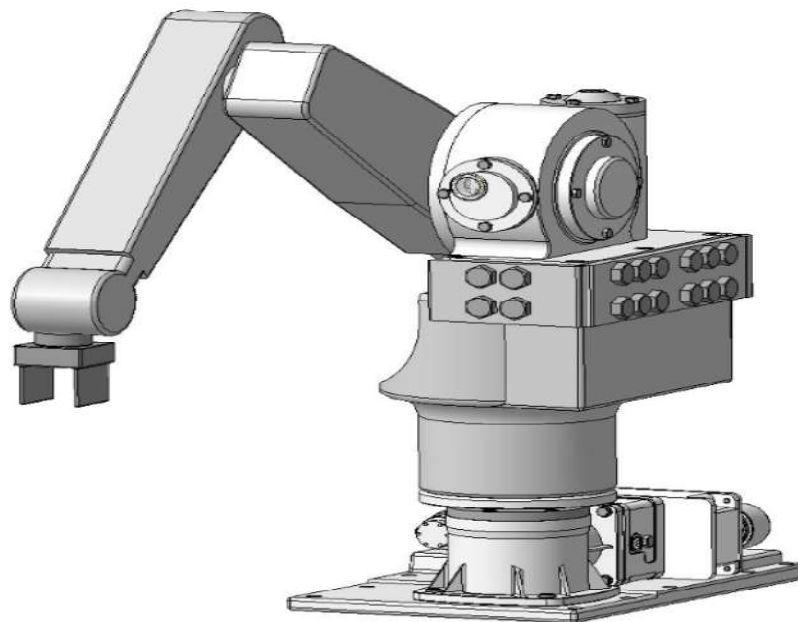


Рисунок 2.1 – 3D модель робота-маніпулятора

Основним виконавчим вузлом робота-маніпулятора є робочий (кінцевий) орган, який є системою, яка безпосередньо виконує операції. Цей орган може бути як захватним пристроєм, що утримує об'єкт, так і спеціальним інструментом (наприклад, свердлом, фрезою, пальником для зварювання, вимірювальним щупом і т.д.), який дозволяє виконувати технологічні операції. В нашому випадку цим робочим органом є захват. Розрахункова схема захвату (для циліндричних деталей) наведена на рисунку 2.2.

Зусилля ЗП має відповідати одному із значень ряду Ra10 у межах 1 – 8000 Н, тобто 1,0; 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10; 12; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3200; 4000; 5000; 6300; 8000.

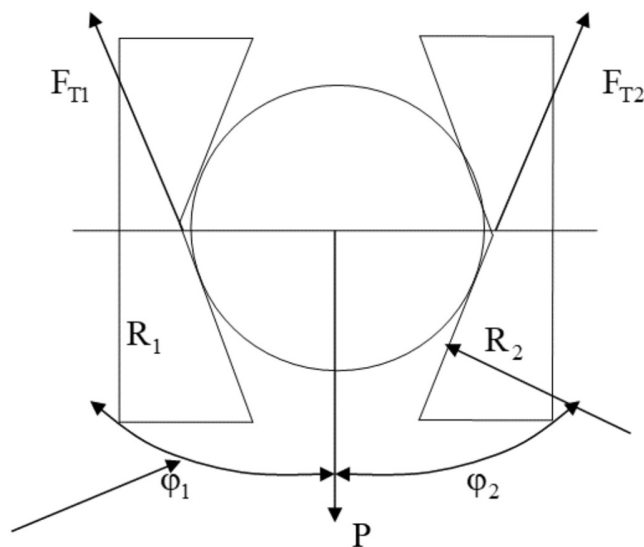


Рисунок 2.2 – Схема навантаження захвату

Розрахунок ЗП включає знаходження сил, що діють у місцях контакту заготовки та губок; визначення зусиль приводу; перевірку відсутності пошкоджень поверхні об'єкта під час захоплення; розрахунок на міцність деталей пристрою [20].

Зусилля контактування між деталлю та губкою визначається за формулою:

$$N_i = \frac{R_n \sin(\varphi_i - \mu \cos \varphi_i)}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2) - 2\mu \cos(\varphi_1 + \varphi_2)}, \quad (2.1)$$

де,  $i, j = 1, 2; i \neq j$ ,

## 2.2 Схема навантаження

Так як в нас захват має симетричне захоплення, згідно схеми навантаження (рисунок 2.3), то розглянемо схему навантаження однієї з губок.

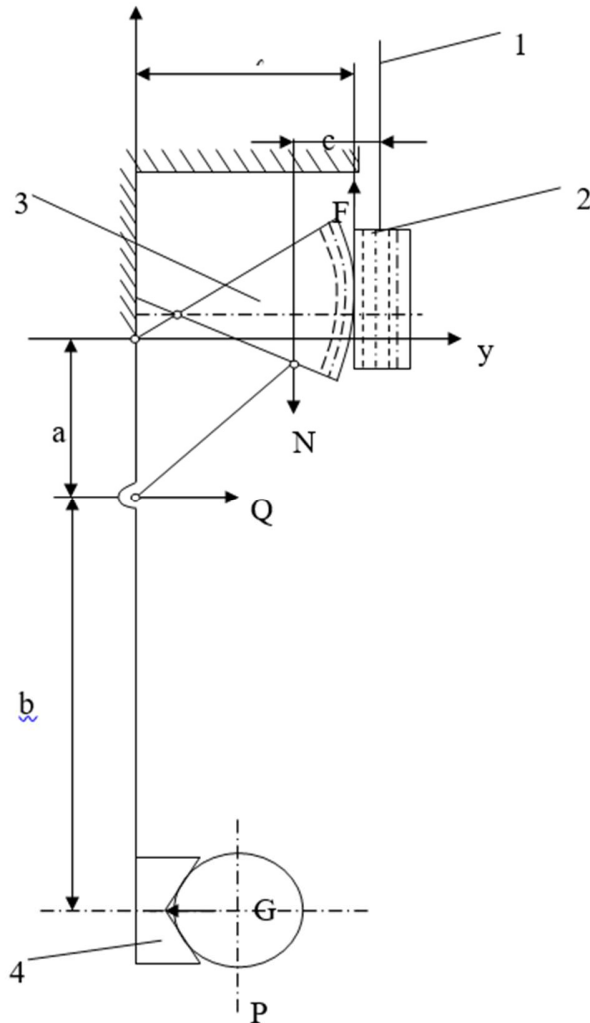


Рисунок 2.3 – Схема навантаження

Робочі губки 4 з'єднані тягами із зубчастими секторами 3, які знаходяться в зачепленні з рейкою 2, зв'язаною з тягою приводу 1. При переміщенні рейки 2 під дією зусилля електромагніта  $F$  відбувається поворот губок 4 в напрямку центру на однакові кути і захоплення об'єкта маніпулювання. Розраховуємо зусилля контакту

між об'єктом (деталлю) та губкою. Нехай об'єктом затискання буде деталь у формі циліндра масою  $m = 1$  кг.

Реакція на одну губку захвату буде:

$$R = mg \approx 10\text{Н}, \quad (2.2)$$

де,  $g$  – прискорення вільного падіння, або сила земного тяжіння.

Зусилля контакту між деталлю та губкою визначимо за формулою 2.1:

При  $\varphi_1 = \varphi_2 = 30^\circ$  отримаємо:

$$N = N_1 = N_2 = R \frac{\sin 30^\circ - \mu \cos 30^\circ}{\sin 60^\circ - 2\mu \cos 60^\circ} = 4,18\text{Н}$$

Коефіцієнт тертя для пари губка – деталь рівний 0,2.

Зусилля затиску на губці захвату дорівнює:

$$G = 2R \cos \varphi - 2 \cdot 4,18 \cos 30^\circ = 7,33\text{Н} \quad (2.3)$$

Зусилля, що виникають у ланках захвату під час його роботи, позначені на рисунку 2.3. Передаточний коефіцієнт механізму можна знайти за умови:

$$F = K_2 P. \quad (2.4)$$

Для визначення цієї залежності складемо умови рівноваги системи щодо точки А, згідно рисунка 2.3.

$$\sum_{i=1}^n M_{A_i} = 0; \quad \sum_{i=1}^n X_i = 0; \quad \sum_{i=1}^n y_i = 0, \quad (2.5)$$

Так як сума проекцій усіх сил на довільно вибрані осі прямокутних координат  $X$  та  $Y$  сума моментів цих сил щодо точки А дорівнюють нулю. У разі умови рівноваги системи щодо точки А записується як:

$$\begin{cases} M_A = F\ell - N(\ell - c) + Qa - P(a + b) = 0; \\ X = F - N = 0; \\ y = Q - G = 0. \end{cases} \quad (2.6)$$

Розв'язавши систему щодо  $G$  і  $F$  отримаємо рівняння:

$$F\ell = F(\ell - c) + Ga - G(a + b) = 0, \quad (2.7)$$

перетворивши яке отримаємо:

$$F = \frac{b}{a}G \text{ або } F = K_2G \quad (2.8)$$

Задавшись співвідношенням  $\frac{b}{a} = 2$ , коефіцієнтом запасу та коефіцієнтом корисної дії механізму 0,9, то знайдемо:

$$F = k_1 k_2 \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\eta} = \frac{2 \cdot 2 \cdot (7,33 + 7,33)}{0,9} \approx 65\text{Н}$$

Якщо ми програємо в важільному механізмі, то ми виграємо в відстані. Хід губок 20 мм, хід штока електромагніту 10мм. Таким чином, зусилля електромагніту має бути  $F=65\text{Н}$ , а хід 10 мм.

### 2.3 Розрахунок електромагніту

Для розрахунку електромагніту беремо короткоходову магнітну систему постійного струму (рисунок 2.4). Прямоходові системи постійного струму [11] виконуються, як правило, у вигляді соленоїдів. Тому такі системи часто називають соленоїдними. У застарілих конструкціях соленоїдні системи виконуються з відкритим магнітопроводом [15]. Для зручності вибору форми електромагніту вводиться поняття про конструктивний фактор (к. ф.), що є відношенням:

$$\text{к.ф.} = \frac{\sqrt{Q_E}}{\delta_H}, \quad (2.9)$$

де  $O_E$  – сила електромагніту, кг;

$\delta_H$  – хід штока електромагніту, см.

Вибір розрахункової формули визначається на підставі таких міркувань:

а) довжина електромагніту пропорційна необхідній величині ходу –  $\delta_H$ ;

б) поперечний переріз сталі електромагніта визначається величиною необхідної початкової сили. Кожній формі електромагніту відповідає певна зона величини к.ф., у яких ця система виконується з оптимальними даними щодо витрат матеріалу.

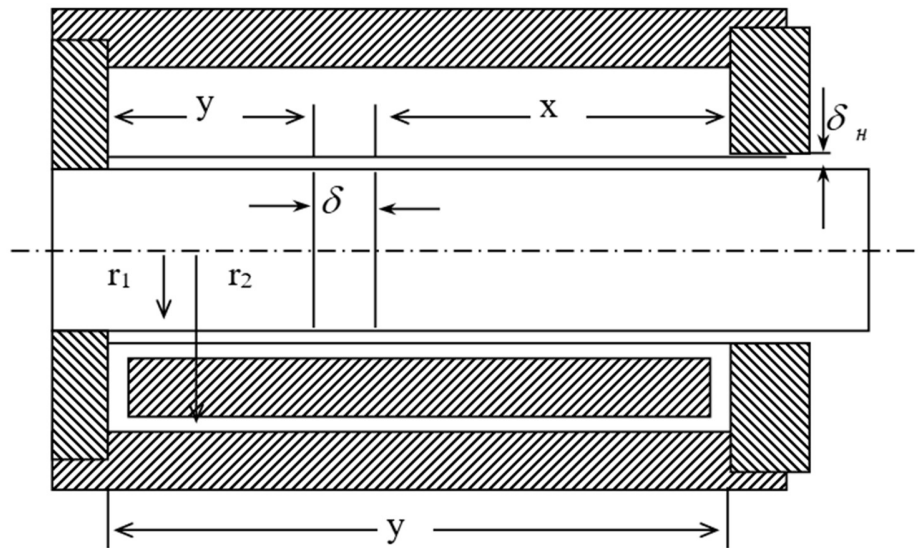


Рисунок 2.4 – Прямоходова система з плоским стопом

Короткоходові системи передбачаються для отримання більших значень сил за відносно малого ходу якоря. Такі системи приймаються за більших значень конструктивного фактору.

Вихідними є такі дані:

- початкова сила на якорі;
- робочий хід мм;
- робоча напруга 24В.

При проведенні попереднього розрахунку не враховують соленоїдну силу, а приймають тільки силу тяжіння якоря до стопу. Деякі значення параметрів, які визначають габарити системи:

Індукцією  $B$  на якорі робочого зазору; падінням магнітного потенціалу в сталі та в неробочих зазорах –  $\sum H_i l_i$ ; температурою перевищення котушки;

відношенням довжини намотування котушки до товщини її. Правильний вибір зазначених параметрів визначає економічність конструкції [8].

Визначимо відношення довжини котушки до товщини намотування. Площа перерізу міді котушки  $q_k = \ell_k h_k$  приймають залежно від необхідного значення сили навантаження  $F$ . Значення  $q_k$  може бути отримано за різних відношень  $\frac{\ell_k}{h_k}$ .

При зміні цього відношення отримують різні умови щодо витрати міді та сталі:

- 1) збільшення призводить до зменшення витрати міді, так як при цьому зменшується об'єм міді та збільшується поверхня охолодження котушки;
- 2) зменшення призводить до збільшення витрати сталі, тому що при цьому збільшується довжина магнітопроводу.

Мінімальна вага всієї конструкції досягається для різних видів електромагнітів та умов їх роботи різними шляхами. Практично встановлено що при відносно великому ході якоря та малому значенні сили приймаються великі значення  $\frac{\ell_k}{h_k}$  зі збільшенням сили та зменшення ходу – це відношення зменшується.

Таким чином, і відношення можна фіксувати функції значення к.ф. Значення  $\frac{\ell_k}{h_k}$  коливається у практично виконаних конструкціях у межах 1 до 8. Значення вибирається залежно від конструктивного чинника і від режиму роботи котушки: що більше значення к.ф., то більше значення, згідно рисунка 2.5.

Короткоходові системи передбачаються для отримання більших значень сил за відносно малого ходу якоря. Розрахуємо коефіцієнт форми к.ф. для взятої короткоходової системи:

$$к.ф. = \frac{\sqrt{Q}}{\delta} = \frac{\sqrt{9,8}}{1} \approx 2,5 \quad (2.10)$$

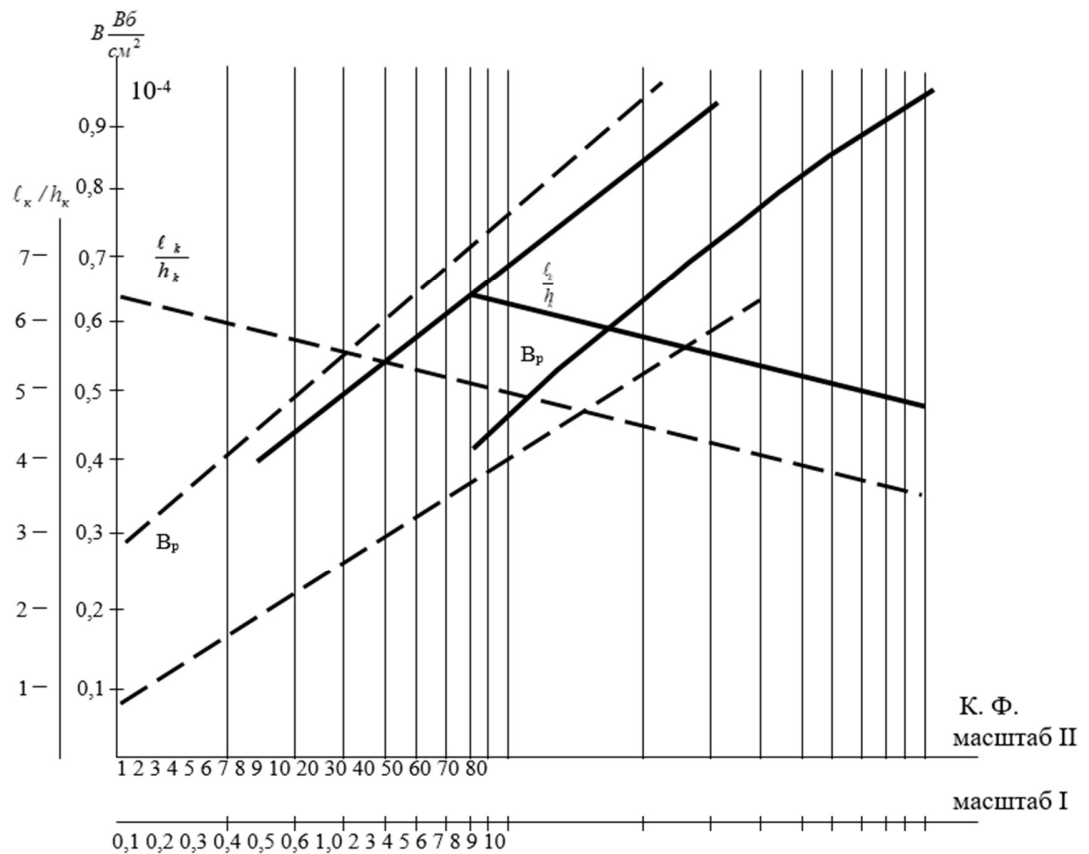


Рисунок 2.5 – Криві залежності  $B_p = f(\kappa.\phi.)$  для магнітних систем: масштаб I – суцільні лінії; масштаб II – пунктирні.

Рівняння сили електромагніту буде мати вигляд:

$$Q = 4,06 \cdot 10^8 B^2 \pi r_1^2 q [H] \quad (2.11)$$

Відповідно до графіка рисунка 2.5 (масштаб 1) приймаємо індуктивність у якорі згідно:

$$B_{як} = f(\kappa.\phi) = 1 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{B\phi}{cm^2} \right] \quad (2.12)$$

У раціонально побудованих конструкціях падіння магнітного потенціалу сталі магнітопроводу складається при початковому положенні якоря 10-20% від

величини котушки, а в неробочих зазорах 5-10%, відповідно отримаємо:

$$F_n + F_c = (1,15 \div 1,3) \cdot F \quad (2.13)$$

Індукція у сталі кожуха буде:

$$B_{cm} = 0,8 \cdot B_{як} = 0,8 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{B\bar{b}}{cm^2} \right] \quad (2.14)$$

Неробочий зазор  $\delta_{\setminus H}$  визначається товщиною латунної направляючої трубки (близько 0,5 мм) і зазор між трубкою і якорем. Цей зазор приймають близько 0,125 мм для випадку, коли внутрішня поверхня трубки не оброблена і 0,05 мм для трубки з обробленою внутрішньою поверхнею.

Відношення  $k = \frac{\ell_{\kappa}}{h_{\kappa}}$  буває в межах 5 ÷ 8 і вибирається також в залежності від значення к.ф. (графік рисунку 2.5). Товщина намотування  $h$  приймається з умови ,

$$m = \frac{r_2}{r_1} = 2 \div 2,5, \text{ тоді буде } h = r_1(m - 1) = r_1 \cdot 1,5$$

Приймаємо  $r_1 = 0,7$  тоді сила притягування електромагніту дорівнюватиме:

$$Q = 4,06 \cdot 10^8 \cdot (10^{-4})^2 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot g = 70H \quad (2.15)$$

У процесі виконання розрахунку короткоходової системи ми отримали силу притягування електромагніту, що дорівнює 70 Н.

## РОЗДІЛ 3

## РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

## 3.1 Опис конструкції та технології роботи механізму

Спроекований промисловий робот-маніпулятор представлений в попередньому підрозділ, а його кінематична схема зображена на рисунку 3.1.

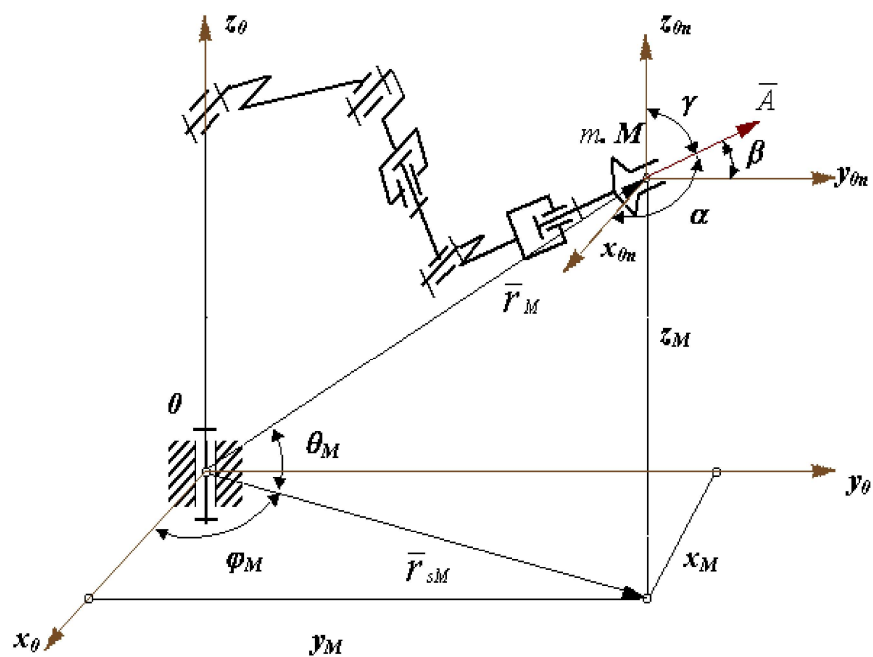


Рисунок 3.1 – Кінематична схема робота маніпулятора

Подібна кінематична схема [16] дозволяє застосовувати спроектований робот-маніпулятор у таких областях:

- завантаження та розвантаження на верстат заготовок і оброблених деталей;
- операції металообробки;
- операції складання/розбирання;
- обслуговування верстатів;
- вибіркове комплектування;

- операції вимірювання, тестування та перевірка;
- паяння.

### 3.2 Обґрунтування вимог до електроприводу

Електропривод промислового робота маніпулятора має забезпечувати такі технічні характеристики:

Маса вантажу:  $m_b = 12$  кг;

Маса ступеня рухливості:  $M_{с.р.} = 3$  кг;

Кутова швидкість:  $\omega = 600$  %с;

Кутове переміщення:  $S_{max} = 720^\circ$

Ексцентриситет щодо осі приводу  $L_{цм} = 0.1$  м

Передатне відношення редуктора:

Режим роботи:  $i_p = 30$ ;

ПВ = 80%.

Основні вимоги щодо електроприводу:

- 1) відносний статичний перепад швидкості у всьому діапазоні зміни статичного моменту –  $\delta \leq 10\%$ ;
- 2) для зниження кінематичних зусиль при переміщеннях необхідно обмеження прискорення –  $\varepsilon \leq 52,36$  рад/с<sup>2</sup>;
- 3) час пуску трохи більше 0,2 с;
- 4) діапазон регулювання швидкості D повинен становити 50:1 для забезпечення точної зупинки приводу;
- 5) допускається зниження напруги живлення не більше ніж на 10%;
- 6) точність зупинки –  $\Delta\varphi \leq 0,5^\circ$ .

### 3.3 Розрахунок потужності та вибір двигунів

Статичні моменти в розрахунку на один двигун будуть:

$$M_{c1} = g(m_{гр} + m_{сп})L_{цм}(1 + k_{тр}) = 9.81 \cdot (12 + 3) \cdot 0.1 \cdot (1 + 0.08) = 15.89 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{c2} = |g(m_{гр} + m_{сп})L_{цм}(-1 + k_{тр}) = 9.81 \cdot (12 + 3) \cdot 0.1 \cdot (-1 + 0.08)| = 13.53 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Встановлюємо параметри тахограми:

час пуску –  $t_n = 0.2$  с;

час циклу –  $t_{ц} = 60$  с час роботи на встановленій швидкості:

$$t_y = t_{цПВ} - 4t_n = 60 \cdot 0.8 - 4 \cdot 0.2 = 47.2 \text{ с}.$$

Розраховуємо динамічний момент:

$$J = (m_{гр} + m_{сп})L_{цм} = (12 + 3) \cdot 0.1 = 0.15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$\varepsilon = \frac{\omega}{t_p} = \frac{10.47}{0.2} = 52.36 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}, \text{ где } \omega = 600 \cdot \frac{\pi}{180} = 10.47 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$M_{дин} = J\varepsilon = 0.15 \cdot 52.36 = 7.86 \text{ Нм}.$$

Розрахунок еквівалентного моменту ведеться за умови рівності статичних моментів найбільшого, так як можливе перевертання ступеня рухливості.

$$M_{эквд} = \sqrt{\frac{[(M_{c1} + M_{дин})^2 + (M_{c1} - M_{дин})^2] \cdot 4t_n + M_{c1}^2 t_y}{t_{цПВ}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{[(15.89 + 7.86)^2 + (15.89 - 7.86)^2] \cdot 4 \cdot 0.2 + 15.89^2 \cdot 47.2}{60 \cdot 0.8}} = 16.1 \text{ Нм}.$$

Прикладемо еквівалентний момент до ПВ = 80%, так як номінальний ПВ обирається двигуна становить 100 %

$$M_{экв} = M_{эквд} \sqrt{ПВ} = 16.1 \cdot \sqrt{0.8} = 14.38 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Розрахункова потужність двигуна буде становити:

$$P_{расч} = M_{экв} \omega = 14.38 \cdot 10.47 = 150.64 \text{ Вт}.$$

Умовою вибору двигуна є:

$$P_{\text{расч}} \leq P_{\text{н}}; \omega_{\text{расч}} \approx \omega_{\text{н}}$$

Тахограма та навантажувальна діаграма наведено на рисунку 3.2

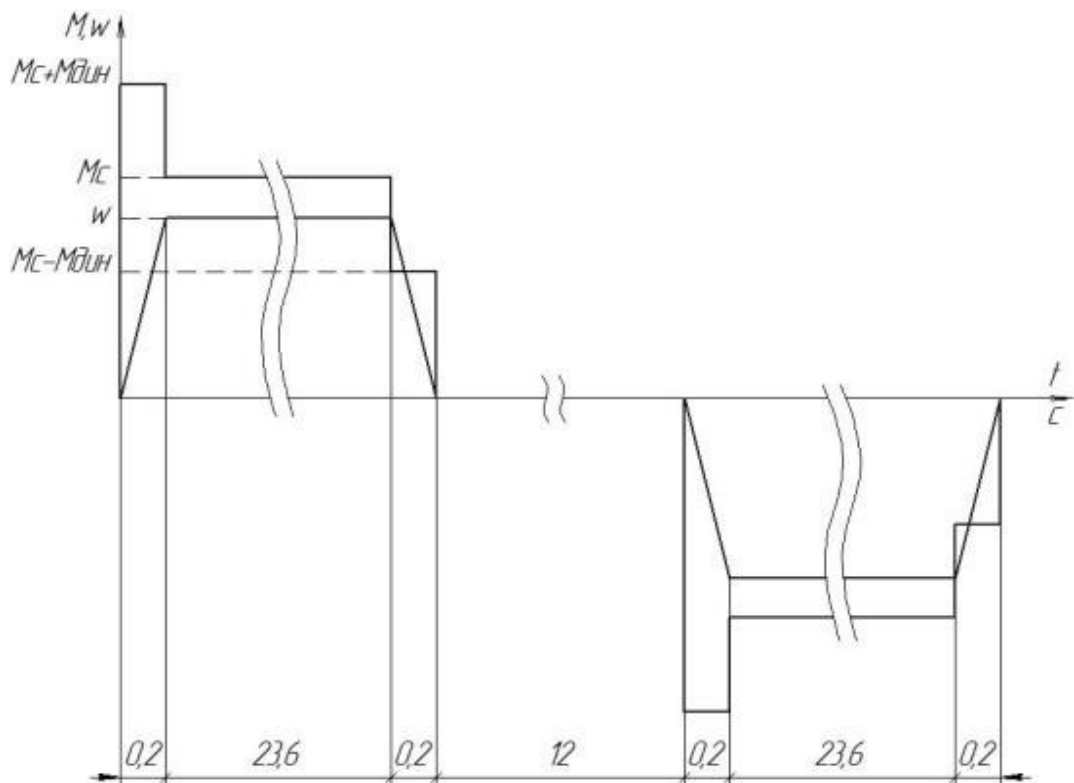


Рисунок 3.2 – Тахограма та навантажувальна діаграма механізму переміщення

Відповідно до тахограми та навантаження вибираємо двигун AIP56A2, виконання IM2082. Відповідно його характеристики згідно [3] представлені нижче:

Потужність –  $P_{\text{ном}} = 180$  Вт;

Частота обертання –  $n_{\text{ном}} = 2730$  об/хв;

Струм статора –  $I_{\text{ном}} = 0.52$  А;

Коефіцієнт потужності ККД –  $\cos\varphi = 0.78$   $\eta = 0.68$ ;

Напряга статора –  $U_{\text{н}} = 380$  В;

Активний опір статора –  $R_1 = 72,74 \text{ Ом};$

Активний опір ротора  $R'_2 = 40,22 \text{ Ом};$

Індуктивність статора –  $L_1 = 2,795 \text{ Гн};$

Індуктивність ротора –  $L'_2 = 2,815 \text{ Гн};$

Взаємна індукція –  $L_m = 2,724 \text{ Гн};$

Кратність критичного моменту –  $\lambda_k = 2,2;$

Кратність пускового моменту –  $\lambda_\pi = 2$

Число полюсів –  $2p = 2;$

Коефіцієнт приведення опору –  $K_r = 1,45;$

Момент інерції –  $J_p = 0,42 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Частота мережі живлення –  $f = 50 \text{ Гц}$

Кількість фаз –  $m = 3$

Врахувавши підібрані технічні характеристики двигуна та підставивши числові дані, номінальна кутова швидкість буде становити:

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{p n_{\text{НОМ}}}{30} = \frac{3.14 \cdot 2730}{30} = 285.89 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номінальний момент:

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{180}{285.89} = 0.63 \text{ Нм.}$$

Критичний момент:

$$M_k = \lambda_k M_{\text{НОМ}} = 2.2 \cdot 0.63 = 1.38 \text{ Нм.}$$

Пусковий момент:

$$M_\pi = \lambda_\pi M_{\text{НОМ}} = 2 \cdot 0.63 = 1.26 \text{ Нм.}$$

Здійснимо перевірку двигуна за умовою максимального моменту:

$$M_{\text{max}} < M_{\text{доп}};$$

$$M_{\text{max}} = \frac{M_{c1} + M_{\text{дин}}}{i_p} = \frac{15.89 + 7.86}{30} = 0.79 \text{ Нм};$$

$$M_{\text{доп}} = 0.8 \cdot M_{\text{к}} = 1.11 \text{ Нм};$$

$$0.79 \text{ Нм} < 1.11 \text{ Нм}$$

Двигун за перевантажувальною здатністю проходить.

Перевіримо двигун за нагрівом. Запропонований цикл допускає 120 включень за годину. Розрахуємо допустиму частоту включень для вибраного двигуна.

Номінальне ковзання:

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_0 - n_{\text{НОМ}}}{n_0} = \frac{3000 - 2730}{3000} = 0.09.$$

Повні втрати потужності двигуна при номінальному режимі:

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} \frac{(1-\eta)}{\eta} = 180 \cdot \frac{(1-0.68)}{0.68} = 84.7 \text{ Вт.}$$

Змінні втрати в обмотках статора та ротора в номінальному режимі:

$$V_{\text{НОМ}} = M_{\text{НОМ}} \omega_0 s_{\text{НОМ}} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) = 0.63 \cdot 314.16 \cdot 0.09 \cdot \left(1 + \frac{72.74}{40.22}\right) = 41 \text{ Вт.}$$

Постійні втрати потужності:

$$K = \Delta P_{\text{НОМ}} - V_{\text{НОМ}} = 34.7 \text{ Вт.}$$

Середній момент двигуна при пуску:

$$M_{\text{ср}} = \frac{M_{\text{пуск}} + M_{\text{к}}}{2} = \frac{1.26 + 1.38}{2} = 1.32 \text{ Нм.}$$

Сумарний момент інерції:

$$J_{\Sigma} = J_p + \frac{J}{i_p^2} = 0.42 \cdot 10^{-3} + \frac{0.15}{30^2} = 0.58 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Втрати енергії при пуску, зумовлені змінними втратами:

$$\begin{aligned} \Delta W_V &= J_{\Sigma} \omega_0^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) (1 - s_{\text{НОМ}}^2) \frac{M_{\text{ср}}}{2 \left(M_{\text{ср}} - \frac{M_{\text{с1}}}{i_p}\right)} = \\ &= 0.58 \cdot 10^{-3} \cdot 314.16^2 \cdot \left(1 + \frac{72.74}{40.22}\right) (1 - 0.09^2) \frac{1.32}{2 \left(1.32 - \frac{15.89}{30}\right)} = 134.54 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Втрати енергії під час пуску, зумовлені постійними втратами:

$$\Delta W_K = Kt_{\pi} = 34.7 \cdot 0.2 = 6.94 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати при пуску:

$$\Delta W_{\text{пуск}} = \Delta W_K + \Delta W_V = 6.94 + 134.54 = 141.48 \text{ Вт.}$$

Допустима частота включення двигуна:

$$h = 3600 \frac{\Delta P_{\text{ном}} \beta (1 - \text{ПВ})}{\Delta W_{\text{пуск}}} = 3600 \frac{84.7 \cdot 0.3 (1 - 0.8)}{141.48} = 129 \frac{\text{вкл}}{\text{ч}},$$

де  $\beta = 0.33$  – коефіцієнт погіршення тепловіддачі за [2]. Двигун за рівнем нагрівання проходить.

Принципово можливі та технічно відпрацьовані на сьогоднішній день такі способи регулювання швидкості асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором [10]:

- зміна числа пар полюсів;
- регулювання напруги на статорі;
- частотне регулювання:
  - а) зі скалярним керуванням;
  - б) із векторним управлінням.

Проковзуванням можна керувати, змінюючи число пар полюсів обмотки статора, але для цього потрібні двигуни спеціального виконання, до того ж цей спосіб дозволяє змінювати проковзування дискретно.

Регулювання швидкості зміни напруги на статорі в замкнутій системі, яке здійснюється за допомогою тиристорного регулятора напруги, дозволяє збільшити плавність і розширити діапазон регулювання швидкості асинхронного електроприводу [11], але тільки до критичного ковзання.

У розімкнутій системі асинхронного електроприводу ефективність такого регулювання швидкості обмежена малим діапазоном стійких режимів роботи двигуна. Розширити функціональні можливості асинхронного електроприводу

можна у замкнених системах. Недоліком цього способу регулювання є те, що втрати ковзання при регулюванні швидкості розсіюються у вигляді тепла двигуна. Застосування тиристорів [14] дає ряд переваг. Тиристорні регулятори напруги практично безінерційні, мають великий коефіцієнт підсилення за потужністю та високий ККД. Електропривод із таким керуванням асинхронним двигуном (АД) представлений на рисунку 3.3.

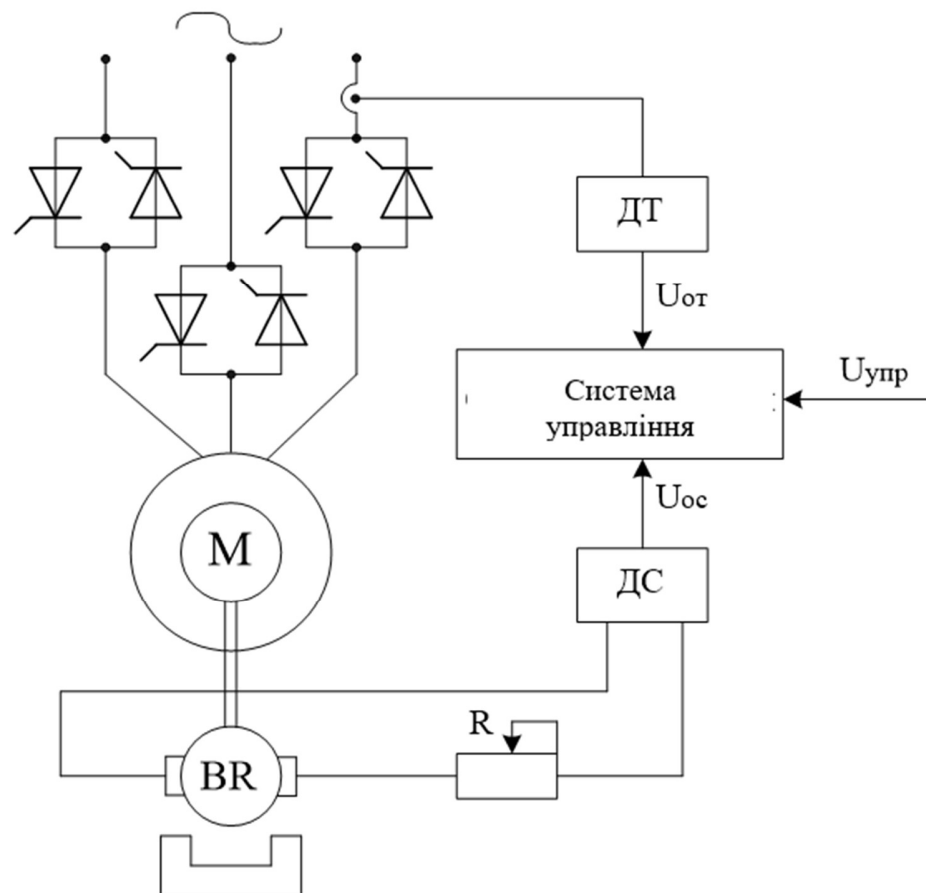


Рисунок 3.3 – Принципова схема регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною напруги на статорі.

Частотно регульований електропривод складається з асинхронного або синхронного електродвигуна та перетворювача частоти [13]. Перетворювач частоти управляє електричним двигуном і є електронним статичним пристроєм. На виході

перетворювача формується напруга зі змінними амплітудою та частотою. Схема будь-якого перетворювача частоти складається з силової та керуючої частин [7].

Силова частина перетворювачів зазвичай виконана на тиристорах чи транзисторах, які працюють у режимі електронних ключів. Управляюча частина виконується на цифрових мікропроцесорах та забезпечує управління силовими електронними ключами, а також вирішення великої кількості допоміжних завдань (контроль, діагностика, захист). Перетворювачі частоти, що застосовуються в регульованому електроприводі, залежно від структури та принципу роботи силової частини поділяються на два класи [15]:

- перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком (силова частина являє собою керований випрямляч і виконана на тиристорах, які не замикаються. Система управління по черзі відключає групи тиристорів і підключає статорні обмотки двигуна до мережі живлення);

- перетворювачі частоти з явно вираженою проміжною ланкою постійного струму.

У частотно-регульованому приводі на основі асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором застосовуються скалярне та векторне частотне керування. Принцип скалярного керування частотно-регульованого асинхронного електроприводу базується на зміні частоти та поточних значень модулів змінних АД (напруг, магнітних потоків, потокозчеплень та струмів двигуна). Керованість АД при цьому може забезпечуватися спільним регулюванням частоти  $f_1$  і напруги  $U_1$ , або частоти  $f_1$  і струму статора  $I_1$ .

Перший спосіб називають частотним керуванням, а другий – частотно-струмовим [17]. Зміна частоти напруги живлення призводить до відхилення від розрахункових значень максимального і пускового моментів двигуна, його К.К.Д та коефіцієнта потужності. Тому для підтримки необхідних робочих характеристик двигуна необхідно зі зміною частоти одночасно відповідно змінювати і амплітуду

напруги. Для постійного моменту навантаження підтримується відношення  $U/f = \text{const}$  (забезпечується сталість максимального моменту двигуна).

У випадку вентиляторного навантаження реалізується залежність  $U/f_2 = \text{const}$ . Скалярний принцип управління є найпоширенішим в асинхронному електроприводі. Йому властива технічна простота вимірювання та регулювання змінних АД. Основний недолік подібного принципу управління полягає у труднощі реалізації бажаних законів регулювання швидкості та моменту АД у динамічних режимах. Пов'язано це з дуже складними процесами, що протікають в АД. Скалярне керування придатне для більшості практичних випадків застосування частотно-регульованого електроприводу з діапазоном регулювання частоти обертання двигуна до 1:40.

Векторне управління дозволяє суттєво збільшити діапазон керування, точність регулювання, підвищити швидкодію електроприводу. Векторне управління частотно-регульованого асинхронного електроприводу пов'язане як із зміною частоти та поточних значень змінних АД, так і з взаємною орієнтацією їх векторів у системі полярної або декартової системи координат. За рахунок регулювання амплітудних значень змінних та кутів між їхніми векторами забезпечується повне управління АД як у статиці, так і в динаміці, що дає помітне покращення якості перехідних процесів порівняно зі скалярним керуванням [18]. Саме цей факт і є визначальним під час виборів систем із векторним управлінням.

Інформація про поточні значення та просторове положення векторів змінних АД може бути отримана як прямим їх вимірюванням за допомогою відповідних датчиків, так і опосередковано на основі математичної моделі АД. Конфігурація та складність такої моделі визначається вимогами до технічних електроприводів. У загальному випадку такі системи з непрямим регулюванням координат електроприводу через нестабільність параметрів АД і складний їх взаємозв'язок поступаються за своїми статичними і динамічними показниками системам з прямим векторним управлінням. При складності обчислювальних операцій та алгоритмів

управління електроприводом перевага систем з непрямим регулюванням полягає у простоті технічних рішень і, отже, в практичній надійності. Функціональна схема низьковольтного (на промислову мережу  $\sim 380$ ) перетворювача частоти представлена на рисунку 3.4.

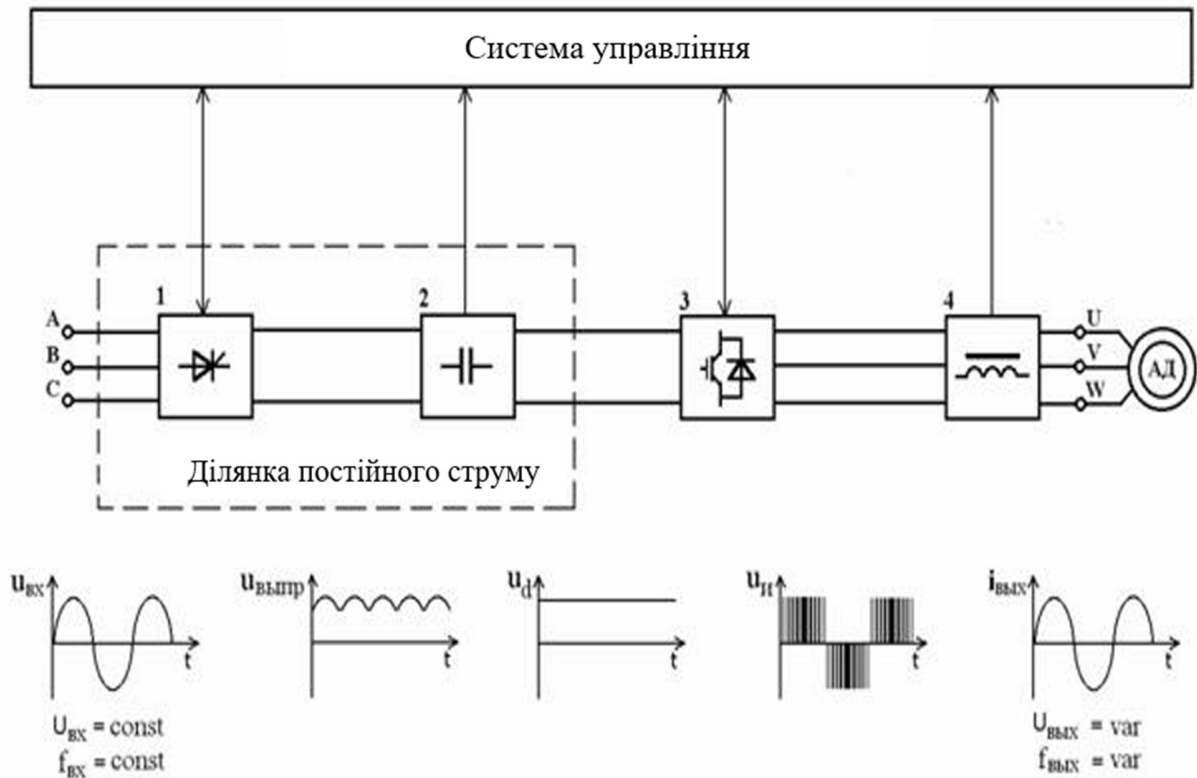


Рисунок 3.4 – Функціональна схема низьковольтного перетворювача

Змінна напруга мережі живлення ( $U_{\text{вх.}}$ ) з постійною амплітудою і частотою ( $U_{\text{вх}} = \text{const}$ ,  $f_{\text{вх}} = \text{const}$ ) надходить на керований або некерований випрямляч 1. Для згладжування пульсацій випрямленої напруги ( $U_{\text{випр.}}$ ) використовується фільтр 2. Випрямляч та ємнісний фільтр 2 утворюють ланку постійного струму. З виходу фільтра постійна напруга  $U_d$  надходить на вхід автономного інвертора 3. Автономний інвертор виконується на основі силових тиристорів або біполярних транзисторів із ізольованим затвором (IGBT). При необхідності на виході

автономного інвертора встановлюється фільтр для згладжування пульсацій струму. (У схемах перетворювачів на IGBT через низький рівень вищих гармонік у вихідній напрузі потреба у фільтрі практично відсутня.). Схема силової частини з автономним силовим інвертором виконана на рисунку 3.5.

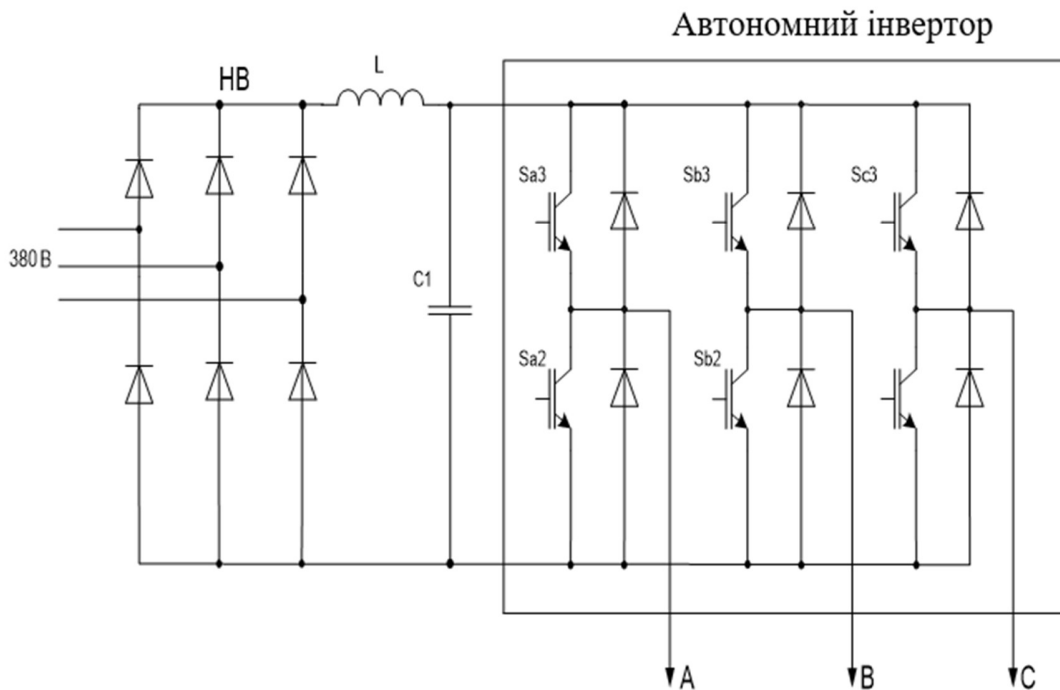


Рисунок 3.4 – Схема силової частини з автономним інвертором

З розглянутих систем електроприводу приймаємо систему частотно-регульованого приводу з некерованим мостовим трифазним випрямлячем і транзисторним трифазним автономним інвертором напруги.

### 3.4 Розрахунок та вибір основних елементів силової схеми

Спочатку проведемо розрахунок інвертора. Максимальний струм через ключі інвертора:

$$I_{\text{смакс}} = \frac{P_{\text{ном}} k_1 \sqrt{2} k_2}{\sqrt{3} U_{\text{л}} \cos \phi \cdot \eta} = \frac{180 \cdot 1.5 \cdot \sqrt{2} \cdot 1.2}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.78 \cdot 0.68} = 1.313 \text{ A},$$

де,  $k_1 = 1,5$  – коефіцієнт допустимого короткочасного навантаження за струмом;  $k_2 = 1,2$  – коефіцієнт допустимої миттєвої пульсації струму;

Транзистори IGBT вибираємо за умовою  $I_c \geq I_{c\text{макс}}$ :

Вибираємо транзистор IRGB5058DPBF, що має такі параметри:

- робочий струм (при 25 °C):  $I_c = 8 \text{ A}$ ;

- напруга насичення (при 125 °C):  $U_{ce(\text{sat})} = 2,2 \text{ В}$ ;

- клас з напруги:  $U_{ce} = 600 \text{ В}$ . Транзистор випускається в корпусі із зустрічно-паралельним діодом.

Втрати в IGBT у провідному стані будуть становити:

$$P_{ss} = I_{cp} U_{cesat} \left( \frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cos\varphi \right) = 0.875 \cdot 2.2 \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{0.95}{3 \cdot 3.14} 0.78 \right) = 0.392 \text{ Вт},$$

де,  $D = 0,95$  – максимальна тунельність;

$U_{cesat} = 2,2 \text{ В}$  – пряме зниження напруги на IGBT  $I_{cp}$  та  $T_j = 125^\circ \text{C}$ ;  $I_{cp} = I_{c\text{макс}}/k_1 = 1,313/1,5 = 0,875 \text{ А}$  – максимальна величина амплітудь струму на виході інвертора.

Втрати IGBT при комутації будуть становити:

$$P_{sw} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{cp} U_{cc} (t_{con} + t_{coff}) f_{sw}}{2} =$$

$$= \frac{1}{3.14 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{1.36 \cdot 513 (0.3 + 0.6) \cdot 10^{-6} \cdot 10^4}{2} = 0.455 \text{ Вт},$$

Сумарні втрати IGBT:

$$Q = P_{ss} + P_{sw} = 0.392 + 0.455 = 0.847 \text{ Вт}.$$

Втрати діода у провідному стані:

$$P_{ds} = I_{ep} U_{ec} \left( \frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cos\varphi \right) = 0.875 \cdot 0.7 \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{0.95}{3 \cdot 3.14} 0.78 \right) = 0.125 \text{ Вт},$$

Втрати відновлення замикаючих властивостей діода:

$$P_{dr} = \frac{1}{8} I_{pr} U_{cc} t_{pr} f_{sw} = \frac{1}{8} \cdot 0.875 \cdot 513 \cdot 0.2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4 = 0.112 \text{ Вт},$$

Наступним кроком буде розрахунок випрямляча.

Середня випрямлена напруга знаходимо за:

$$U_d = k_{cx} U_{л} = 1.35 \cdot 380 = 513 \text{ В},$$

Максимальне значення середнього виправленого струму:

$$I_d = \frac{\sqrt{3} \frac{I_{\text{смакс}}}{\sqrt{2}} U_{л} \cos\varphi + NP_T}{U_d} = \frac{\sqrt{3} \frac{1.313}{\sqrt{2}} \cdot 380 \cdot \cos\varphi + 6 \cdot 1.084}{513} = 0.941 \text{ А},$$

де,  $N = 6$  – кількість пар IGBT/FWD в інверторі.

Максимальний робочий струм діода:

$$I_{vm} = k_{cc} I_{dm} = 1.045 \cdot 0.941 = 0.984 \text{ А},$$

де  $k_{cc} = 1,045$  за оптимальних параметрів Г-подібного фільтра для 3-фазної мостової схеми.

Максимальна зворотна напруга вентиля:

$$U_{vm} = k_{zn} \sqrt{2} U_{л} k_{cx} k_c + \Delta U_n = 1.2 \cdot \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1.35 \cdot 1.1 + 120 = 1078 \text{ В},$$

де,  $k_c = 1,1$  – коефіцієнт допустимого підвищення напруги мережі;

$\Delta U_n$  – запас на комутаційні викиди напруги у ланці постійного струму.

Діоди вибираються за постійним робочим струмом і за класом напруги:

Вибираємо діод EM518, що має такі параметри:

Постійна зворотна напруга, яка повторюється  $U_{zv.max} = 1300 \text{ В}$ ;

максимальний прямиий струм:  $I_{пр.max} = 1 \text{ А}$ ;

Наступним етапом буде розрахунок фільтра.

Коефіцієнт пульсацій на вході фільтра:

$$q_{1вх} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0.057.$$

де  $m = 6$  – пульсність схеми випрямлення.

Розмір мінімальної індуктивності фільтра:

$$L_{0мин} = \frac{0.013 \cdot U_{л}}{2\pi f_s I_d} = \frac{0.013 \cdot 380}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 0.94} = 17 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

де  $I_d = 0,94$  А – номінальний середній струм ланки постійного струму.

Для забезпечення коефіцієнта потужності на виході випрямляча  $k_m = 0.95$  індуктивність дроселя визначається умовою  $L_0 \geq L_{0\text{мін}}$ .

Тоді необхідне значення індуктивності буде:

$$L_0 = 3L_{0\text{мін}} = 3 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 51 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Вибираємо дросель типу РОБ-1А, який має такі параметри:

- струм дроселя, що згладжує:  $I = 3$  А;

- індуктивність:  $L = 70$  мГн.

Місткість конденсату, необхідна для протікання реактивного струму навантаження інвертора:

$$C_{03} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}}}{2U_d m f_s q_1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0.52}{2 \cdot 513 \cdot 6 \cdot 50 \cdot 0.057} = 51 \text{ мкФ.}$$

Вибираємо конденсатор К50-35, що має такі параметри:

- номінальна напруга:  $U_n = 350$  В;

- номінальна ємність:  $C_n = 220$  мкф.

Встановлюємо конденсатори послідовно. Проведений розрахунок елементів силової схеми повністю задовольняє вимоги спроектованого промислового робота-маніпулятора.

## РОЗДІЛ 4

## РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

4.1 Розрахунок та побудова статичних характеристик у розімкнутій системі

Проведемо розрахунок статичних характеристик у розімкнутій системі для побудови системи управління електроприводу.

Індуктивний опір короткого замикання:

$$X_k = (L_1 + L_2 - 2L_m) \cdot 2\pi f_s = (2.795 + 2.815 - 2 \cdot 2.724) \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 50.9 \text{ Ом.}$$

Критичне проковзування:

$$s_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \frac{40.218}{\sqrt{72.736^2 + 50.9^2}} = 0.453.$$

Розрахунковий критичний момент:

$$M'_k = \frac{3U_{1H}^2}{2\omega_0 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314.159 \cdot (72.736 + \sqrt{72.736^2 + 50.894^2})} = 1.431 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Для побудови механічної характеристики скористаємось уточненою формулою Клоса:

$$M(\omega) = \frac{2M'_k(1+a \cdot s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2a \cdot s_k},$$

де,

$$a = \frac{R_1}{R'_2} = \frac{72.736}{40.218} = 1.81$$

тоді отримаємо:

$$M(\omega) = \frac{2 \cdot 1.431(1 + 1.81 \cdot 0.453)}{\frac{s}{0.453} + \frac{0.453}{s} + 2 \cdot 1.81 \cdot 0.453}.$$

Струм ротора буде:

$$I'_2(\omega) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_k^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(72.736 + \frac{40.218}{s}\right)^2 + 50.9^2}}$$

Під час роботи на нижній характеристиці:

$$\omega_{\text{ниж}} = \frac{\omega_0}{D} = \frac{314.159}{50} = 6.283 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Швидкість холостого ходу під час роботи на нижній характеристиці:

$$\omega_{0\text{ниж}} = \omega_{\text{ниж}} + \delta \cdot \omega_{\text{ниж}} = 6.283 + 0.1 \cdot 6.283 = 6.91 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Частота напруги живлення:

$$f_{\text{ниж}} = \frac{\omega_{0\text{ниж}} \cdot p}{2\pi} = \frac{6.91 \cdot 1}{2 \cdot 3.14} = 1.1 \text{ Гц}$$

За такої частоти напруга живлення для забезпечення  $U/f = \text{const}$  буде дорівнювати:

$$U_{1\phi\text{ниж}} = 4.4 \cdot f_{\text{ниж}} = 4.4 \cdot 1 = 4.84 \text{ В},$$

де,

$$\frac{U_{1\phi}}{f_{\text{ном}}} = \frac{220}{50} = 4.4$$

Індуктивний опір короткого замикання при  $f_{\text{ниж}} = 1.1 \text{ Гц}$ :

$$X_{\text{книж}} = (L_1 + L_2 - 2L_m) \cdot 2\pi f_{\text{ниж}} = (2.795 + 2.815 - 2 \cdot 2.724) \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot 1.1 = 1.023 \text{ Ом}.$$

Критичне проковзування при  $f_{\text{ниж}} = 1.1 \text{ Гц}$ :

$$s_{\text{книж}} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{книж}}^2}} = \frac{40.218}{\sqrt{72.736^2 + 1.023^2}} = 0.553.$$

Розрахунковий критичний момент при  $f_{\text{ниж}} = 1.1 \text{ Гц}$ :

$$M'_{\text{книж}} = \frac{3U_{1\phi\text{ниж}}^2}{2\omega_{0\text{ниж}} \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\text{книж}}^2}\right)} = \frac{3 \cdot 4.84^2}{2 \cdot 314.159 \cdot (72.736 + \sqrt{72.736^2 + 1.023^2})} = 0.031 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

М.

Механічна характеру при  $f_{\text{ниж}} = 1.1$  Гц:

$$M(\omega) = \frac{2M'_{\text{к}}(1+a \cdot s_{\text{к}})}{\frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s} + 2a \cdot s_{\text{к}}},$$

$$M(\omega) = \frac{2 \cdot 0.029(1+1.81 \cdot 0.553)}{\frac{s}{0.553} + \frac{0.553}{s} + 2 \cdot 1.81 \cdot 0.553}.$$

Струм ротора при  $f_{\text{ниж}} = 1.1$

$$I'_2(\omega) = \frac{U_{1\text{фниж}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{\text{книж}}^2}} = \frac{4.84}{\sqrt{\left(72.736 + \frac{40.218}{s}\right)^2 + 1.023^2}}.$$

Графіки статичних механічних та електромеханічних характеристик у розімкнутій системі представлені на рисунку 4.1.

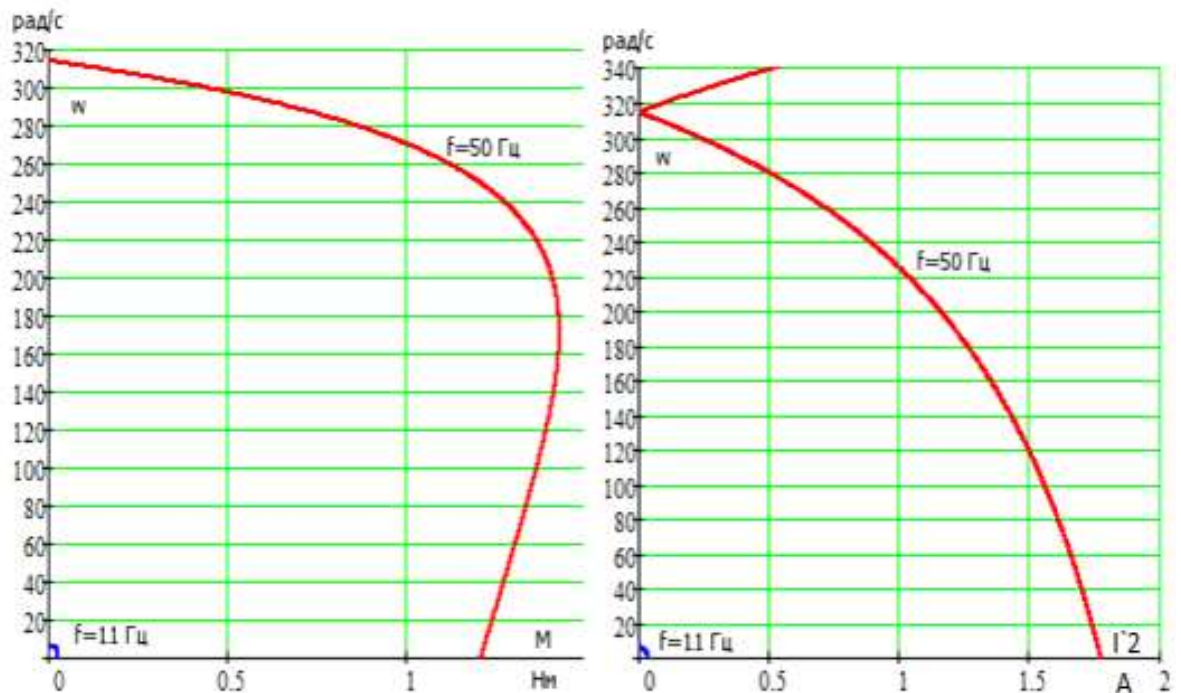


Рисунок 4.1 – Статичні механічні та електромеханічні характеристики у розімкнутій системі управління електроприводом робота- маніпулятора

Статичні характеристики в розімкнутій системі не відповідають вимогам, щодо статичного перепаду швидкості. Крім того, для двигунів невеликої

потужності значення активного опору статора велике, і характеристики розімкнутої системи на низькій швидкості мають малий критичний момент, тобто істотно знижується перевантажувальна здатність.

#### 4.2 Розробка замкнутої системи електроприводу

Сигнал задання приймаємо в абсолютних одиницях, тому коефіцієнти зворотних зв'язків приймаємо одиничними.

Коефіцієнт регулятора швидкості буде:

$$k_{pc} = \frac{2 \cdot J_{\Sigma} \cdot k_{от}}{3 \cdot p_n \cdot \left(\frac{L_{\mu}}{L_2}\right) \cdot k_{oc} \cdot a_w \cdot a_i \cdot T_n} = \frac{0.58 \cdot 10^{-2} \cdot 1}{3 \cdot 1 \cdot \left(\frac{2.724}{2.815}\right) \cdot 1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 0.999$$

Коефіцієнт регулятора положення налаштований ітераційно при додаванні контуру положення  $K_{pn} = 1000$ .

Рівняння статичної характеристики знаходимо згідно [18]:

$$\omega = \frac{\omega_{\Sigma}}{k_{oc}} - \frac{M \cdot k_{от}}{\frac{3}{2} p_n k_2 k_{oc} k_{pc}}$$

Статичні механічні характеристики двигуна у замкнутій системі представлені на рисунку 4.2.

Визначимо відносний статичний перепад на нижній характеристиці:

$$\delta = \frac{\Delta\omega}{\omega_{онизк}} \cdot 100\% = \frac{0.4}{6.9} \cdot 100\% = 5.8\% < 10\%.$$

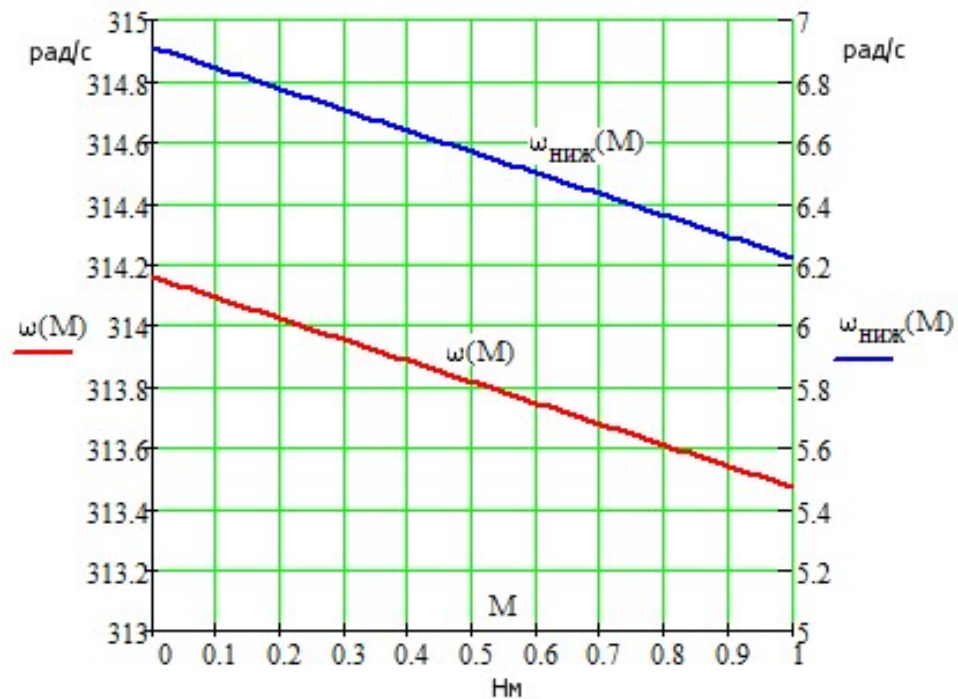


Рисунок 4.2 – Статичні механічні характеристики двигуна у замкнутій системі

#### 4.3 Розробка схеми управління та опис її роботи

Основним елементом схеми керування електроприводом спроектованого робота-маніпулятора є мікроконтролер фірми Texas Instrument TMS320F28 [1]. Саме на контролер припадає завдання векторного керування приводами.

Переваги даного контролера є:

- висока продуктивність (тактова частота 60 – 100 МГц);
- достатній обсяг оперативної та flash-пам'яті (68 - 512 КБ);
- можливість роботи з операціями з «плаваючою точкою»;
- великі можливості підключення периферійних пристроїв;
- спеціалізовані апаратні засоби для керування приводами;
- відносно низька вартість (50-80\$);

Особливостей цієї серії процесорів:

- наявність ШІМ-модулів;
- можливість організації як векторного, і скалярного управління асинхронним двигуном;
- обробка сигналів датчиків швидкості та моменту;
- можливість виконання координатних змінних змін;
- для цього сімейства контролерів існує спеціально розроблене програмне забезпечення для роботи з перетворювачами частоти для асинхронних двигунів.

Розроблена принципова схема керування електроприводом промислового робота маніпулятора представлена на рисунку 4.3.

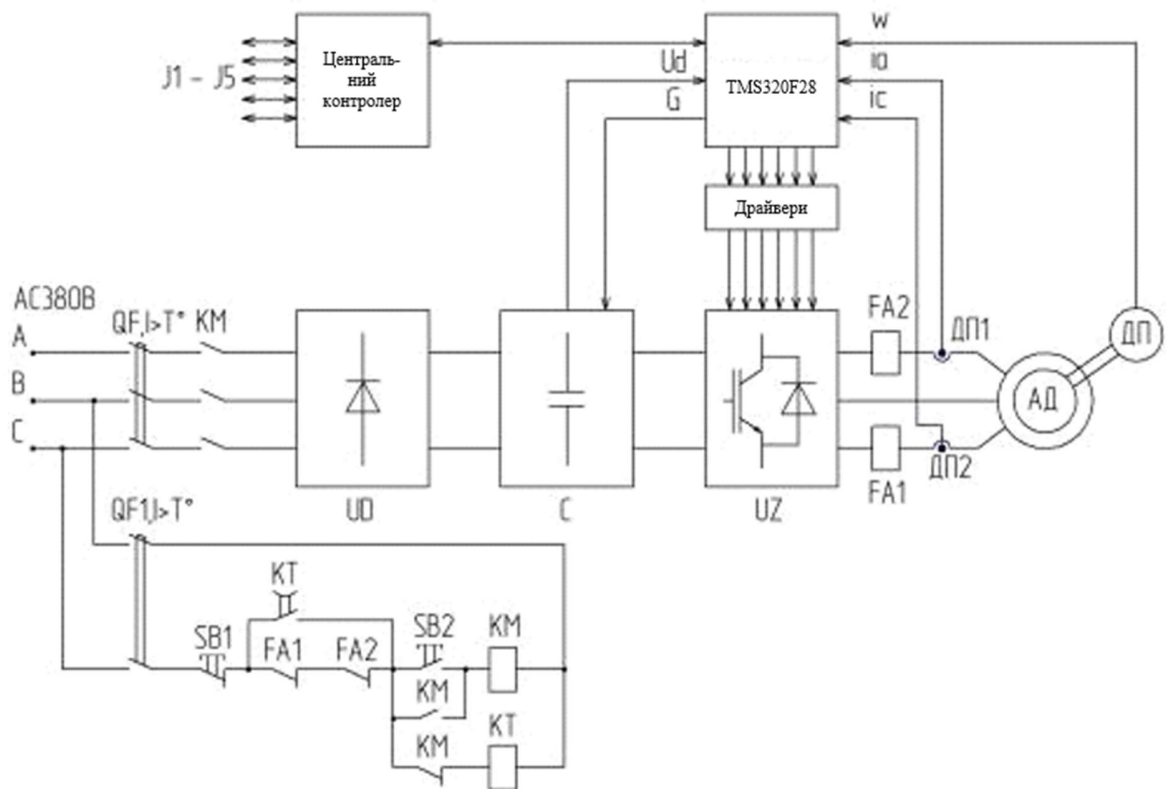


Рисунок 4.3 – Принципова схема управління спроектованого промислового робота-маніпулятора.

## ВИСНОВОК

В даній кваліфікаційній магістерській роботі було спроектовано промисловий робота-маніпулятора з електромагнітним захватним пристроєм та вдосконаленою схемою управління електроприводами.

Був проведений аналіз можливих варіантів електроприводу і як робочий обраний електропривод регулювання швидкості асинхронний двигун з частотно-струмовим векторним управлінням з непрямою орієнтацією за полем та регуляторами струмів, виконаними в нерухомій системі координат.

Вибрано електродвигун змінного струму AIP56A2. Здійснено розрахунок статичних характеристик розімкнутої системи. Отримані характеристики не забезпечили необхідної жорсткості та перевантажувальної здатності, тому було ухвалено рішення про проектування замкнутої системи.

Здійснено розрахунок та побудову статичних характеристик замкнутої системи. Отримана система забезпечила статичний перепад близько 6%, що відповідає вимогам до електроприводу. Розроблено схему управління електроприводу, що відповідає технологічному процесу. Забезпечено необхідний діапазон регулювання.

Здійснено моделювання та аналіз перехідних процесів у замкнутій системі зі зворотним зв'язком за швидкістю та положенням. Необхідної точності позиціонування досягнуто. Аналіз статичних та динамічних властивостей системи електроприводу показав, що розроблена система повністю задовольняє поставленим вимогам.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Matjaž Mihelj. Robotics. / T. Bajd, A. Ude, J. Lenarčič, A. Stanovnik, M. Munih ets.; Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2019. – 249 p.
2. Zaleta O. M., Povstyanoy O. Yu., Ribeiro L. F., Redko R. G., Bozhko T. Ye., Chetverzhuk T. I. (2023). Automation of optimization synthesis for modular technological equipment. Journal of Engineering Sciences, Vol. 10(1), pp. A6-A14, DOI: [10.21272/jes.2023.10\(1\).a2](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).a2).
3. Борозенець Г.М., Павлов В.М., Семак І. В. Деталі машин : Навчальний посібник. – К.: Видавничий дім «Кондор», 2021. – 220 с.
4. Головня В.Д. САПР технологічних процесів : конспект лекцій / В.Д. Головня. – Житомир : Житомирська політехніка, 2019. – 200 с.
5. Грабченко А. І. Інтегровані генеративні технології: навч. посібник / А. І. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок та ін.; під ред. А. І. Грабченко. – Харків: НТУ «ХП», 2011. – 416 с.
6. ДСТУ EN 14238:2018 – Крани вантажопідіймальні. Маніпулятори з людиною-оператором (людино-керовані маніпулятори, де оператор безпосередньо керує кінцевим органом).
7. Дубовой В. М., Моделювання та оптимізація систем: підручник / В.М. Дубовой, Р.Н. Кветний, О.І. Михальов, А.В. Усов. – Вінниця: «ГД «Едельвейс», 2017. – 804 с.
8. 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. ISBN 978-966-940-536-4.
9. Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. Посібник для практичного програмування верстатів з ЧПК [Електронний ресурс] – Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2019. – 115с.

10. Кузнєцов Ю.М. Технологічне обладнання з ЧПК: механізми і оснащення: Навч. посібник. Київ-Кременчук-Севастополь: Вид-во «Точка», 2014. – 500 с.
11. Леонтєв П. В. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник / П. В. Леонтєв та ін. За заг. ред. П. В. Леонтєва. – Суми: Сумський державний університет, 2024. – 296 с. ISBN 978-966-657-987-7.
12. 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.
13. Морзе Н.В. Основи робототехніки: навчальний посібник / Н.В. Морзе, Л.О. Варченко-Троценко, М.А. Гладун. – Кам'янець-Подільський : ПП Буйницький О.А., 2016. – 184 с.
14. Павленко І.І., Мажара В.А. Роботизовані технічні комплекси / Під ред. Павленко І.І. – Навчальний посібник, 2012 – 393с.
15. Петров О.В. Технологічна оснастка : навчальний посібник / О. В. Петров, С. І. Сухоруков. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 123 с.
16. Приходько В.П. Проектування оснащення верстатів, роботів і машин: Навч. посіб. / Литвин О.В. . – Київ: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2018. – 212 с.
17. Проць Я.І. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів./ Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 344с.
18. Репнікова Н.Б. Теорія автоматичного керування: класика і сучасність; підручник / Н. Б. Репнікова. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – 328 с.
19. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування. Монографія / Є.А. Фролов, С.І. Кравченко, С.В. Попов, С.М. Гнітько. Полтава, 2019. – 204 с.

20. Ткачук А., Четвержук Т. Конструювання і розрахунок захватного пристрою робота-маніпулятора. Тези V студентської науково-технічної конференції факультету транспорту та механічної інженерії «Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії». Луцьк: ЛНТУ – 2025. – С. 189-191.

21. Цвіркун Л.І. Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. / Л.І. Цвіркун, Г. Грулер ; під заг. ред. Л.І. Цвіркуна ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. –3-тє вид., переробл. і доповн. – Дніпро: НГУ, 2017. – 224 с.

22. Четвержук Т.І., Полінкевич Р.М., Редько Р.Г., Залета О.М., Склярів Р.А. Статистичне моделювання технічних характеристик металорізальних верстатів. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2021. №71. – С. 322-329. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2021.71.47>

## ДОДАТКИ