

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
АЕРОКОСМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ В.П. Захарченко  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
**(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР

ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 151 «АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА  
КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

**Тема: «Система автоматичного керування електропривідним роботом-маніпулятором складського приміщення»**

Виконавець \_\_\_\_\_ студентка групи АТ-216М Іваницька Вікторія Ігорівна  
(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник \_\_\_\_\_ к.т.н., доцент Єнчев Сергій Васильович  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Консультант розділу «Охорона праці»: \_\_\_\_\_ С.М. Занько  
(підпис) (ПІБ)

Консультант розділу «Охорона  
навколишнього середовища»: \_\_\_\_\_ В.Ф. Фролов  
(підпис) (ПІБ)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ С.В. Єнчев  
(підпис) (ПІБ)

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аерокосмічний

Кафедра автоматизації та енергоменеджменту

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
(шифр, найменування)

Освітньо-професійна програма «Автоматика та автоматизація на транспорті»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

В.П.Захарченко

« 05 » жовтня 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на виконання дипломної роботи (проекту)**

Іваницької Вікторії Ігорівни

(П.І.Б. випускника)

1. Тема роботи (проекту) «Система автоматичного керування електропривідним роботом-маніпулятором складського приміщення» затверджена наказом ректора від «30» вересня 2020 р. № 1835/ст.

2. Термін виконання роботи (проекту): з 05.10.2020 р. по 27.12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи (проекту): розробити систему підпорядкованого керування електроприводом постійного струму маніпулятора. Дані двигуна:  $U=26$  В,  $P=100$  Вт,  $I=5,5$  А,  $n=4000$  об/хв,  $J=1,375 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>,  $M=0,225$  Н·м.

4. Зміст пояснювальної записки: Сфери застосування робототехнічних систем та комплексів. Види та функції роботів-маніпуляторів, що застосовуються на промислових та складських приміщеннях. Опис маніпуляційного робота. Аналіз систем приводів робота-маніпулятора. Класифікація систем керування електроприводами. Системи керування швидкістю електроприводів постійного струму. Постановка задачі на дослідження. Елементна база електроприводу. Датчик струму. Датчик швидкості. Транзисторний перетворювач. Двигун. Розробка системи керування електроприводом. Розрахунок контуру струму. Розрахунок контуру швидкості. Охорона праці. Охорона навколишнього середовища.

5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу:

Механічна система маніпулятора. Функціональна схема електроприводу маніпулятора. Структурна схема електроприводу маніпулятора. Функціональна схема підпорядкованого контуру струму електроприводу. Функціональна схема контуру швидкості електроприводу. Перехідні характеристики контурів струму та швидкості по керуючому впливу.

## 6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін Виконання	Підпис керівника
1.	Вивчення інформаційних джерел	12.09 – 17.09.2020	
2.	Збір та аналіз даних інформаційного характеру. Обґрунтування вибору рішення щодо тематики дослідження	18.09 – 30.09.2020	
3.	Проведення аналізу існуючих систем керування електроприводами маніпуляторів	01.10 – 15.10.2020	
4.	Виконати підбір елементної бази електроприводу	16.10 – 30.10.2020	
5.	Розробити систему керування електроприводом	31.10 – 13.11.2020	
6.	Розгляд питання з охорони праці	14.11 – 19.11.2020	
7.	Проведення дослідження впливу системи на навколишнє середовище	20.11 – 30.11.2020	
8.	Розробити та оформити пакет обов'язкового ілюстративного матеріалу	01.12 – 20.12.2020	

## 7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	С.М. Занько		
Охорона навколишнього середовища	В.Ф. Фролов		

8. Дата видачі завдання: «\_\_» жовтня 2020 р.

Керівник дипломної роботи (проекту)

\_\_\_\_\_ Єнчев С.В.  
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_ Іваницька В.І.  
(підпис випускника) (П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту «Система автоматичного керування електропривідним роботом-маніпулятором складського приміщення»: 103 с., 16 рис., 4 табл., 25 використаних джерел.

РОБОТ, ПРОМИСЛОВИЙ РОБОТ, ЕЛЕКТРОПРИВІД, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ, МАНІПУЛЯТОР, ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, КОНТУР ШВИДКОСТІ, КОНТУР СТРУМУ, ДАТЧИК СТРУМУ, ТРАНЗИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ДАТЧИК ШВИДКОСТІ, МОДУЛЬНИЙ ОПТИМУМ

**Об'єкт дослідження:** процес керування електроприводом робота-маніпулятора складського приміщення.

**Предмет дослідження:** система керування електроприводом робота-маніпулятора складського приміщення.

**Мета дипломної роботи:** розробити систему керування електроприводом маніпулятора, вибрати датчик струму та швидкості до цього електроприводу, провести імітаційне моделювання розробленої системи.

**Методи дослідження:** за допомогою методу імітаційного моделювання проведено дослідження перехідних процесів контурів струму та швидкості в електроприводі маніпулятора робота.

Матеріали дипломної роботи можуть бути використані на підприємствах для покращення роботи маніпуляторів під час виробничого процесу, а також в освітніх закладах для отримання студентами теоретичного та практичного досвіду.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ МАНІПУЛЯТОРІВ ТА ПОСТАНОВКА НА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	11
1.1. Сфери застосування робототехнічних систем та комплексів.....	11
1.2. Види та функції роботів-маніпуляторів, що застосовуються на промислових та складських приміщеннях.....	16
1.3. Опис маніпуляційного робота.....	18
1.4. Аналіз систем приводів робота-маніпулятора.....	20
1.5. Класифікація систем керування електроприводами.....	25
1.6. Системи керування швидкістю електроприводів постійного струму.....	28
1.7. Показники якості керування електроприводами.....	31
1.8. Постановка задачі на дослідження.....	32
РОЗДІЛ 2. ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.....	34
2.1. Основні елементи електроприводу.....	34
2.2. Датчики.....	35
2.2.1. Датчик струму.....	36
2.2.2. Датчик швидкості.....	39
2.3. Транзисторний перетворювач.....	42
2.4. Двигун.....	44
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ.....	47
3.1. Структурна схема електроприводу.....	47
3.2. Розрахунок контуру струму.....	50
3.2.1. Визначення передавальної функції двигуна постійного струму.....	51
3.2.2. Визначення передавальної функції транзисторного перетворювача.....	52

3.2.3. Визначення передавальної функції датчика струму.....	53
3.2.4. Визначення передавальної функції регулятора контуру струму.....	54
3.3. Розрахунок контуру швидкості.....	58
3.3.1. Визначення передавальної функції датчика швидкості.....	59
3.3.2. Визначення передавальної функції регулятора контуру швидкості.....	60
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	64
4.1. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори для суб'єкта охорони праці.....	64
4.1.1. Небезпечні та шкідливі фактори під час роботи в складських приміщеннях.....	65
4.1.2. Небезпечні та шкідливі фактори під час роботи з електропривідним роботом-маніпулятором.....	67
4.2. Технічні заходи для зниження впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	72
4.2.1. Розрахунок захисного заземлення для електроустановки.....	76
4.3. Забезпечення пожежної безпеки під час експлуатації електроустаткування.....	78
4.4. Інструкція з техніки безпеки під час експлуатації електроустаткування.....	81
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	84
5.1. Ефективність застосування робота-маніпулятора на виробництві.....	86
5.2. Вплив якості повітря на ефективність виконання робіт в складських приміщеннях.....	90
5.3. Вплив електромагнітного випромінювання на навколишнє середовище.....	93
5.4. Заходи щодо захисту від електромагнітного випромінювання.....	96
ВИСНОВКИ.....	100
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ...	101

## СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ВО – виконавчий орган;
- ВПП – вимірювальні-перетворювальні пристрої;
- ДПС – двигун постійного струму;
- ДС – датчик струму;
- ЕРС – електрорушійна сила;
- КС – контур струму;
- КШ – контур швидкості;
- МО – модульний оптимум;
- МР – маніпуляційний робот;
- ПР – промисловий робот;
- ПФ – передавальна функція;
- РС – регулятор струму;
- РШ – регулятор швидкості;
- ТП – транзисторний перетворювач;
- ШП – широтно-імпульсний перетворювач;
- ЕОМ – електронно-обчислювальна машина.

## ВСТУП

На сьогоднішній день все більша кількість виробничих компаній впроваджує промислові роботи на свої підприємства. Це пов'язано з тим, що в даний час завдяки використанню маніпуляторів з'являється можливість вдосконалити систему виробництва продукції, собівартість якої значно менше, ніж до модернізації.

**Актуальність теми** дослідження полягає в тому, що з переходом до нових технологій та для підвищення якості продукції виникає необхідність в розробці систем керування електроприводом маніпулятора, що значно спрощують її використання та технічне обслуговування. За допомогою використання маніпуляторів в процесі виробництва підприємство може збільшити прибуток при збереженні обсягів продажів і залучити нових клієнтів за рахунок більш високої якості продукції.

При застосуванні робота продуктивність підвищується, так як робот може виконувати переміщення і позиціонування робочого інструменту значно швидше людини, а також завдяки безперервній роботі робота 24 години на добу без перерв і зупинок, на відміну від людини. При правильному виборі роботизованої системи продуктивність зростає в рази або навіть на порядок, порівняно з ручним виробництвом. У випадках, коли застосування людської праці обмежується на законодавчому рівні, застосування роботів є найкращим рішенням. Сучасні промислові маніпулятори практично не вимагають обслуговування, за рахунок застосування безколекторних двигунів і передавальних механізмів з високоякісної сталі.

Маніпуляційний робот виконує рухові і керуючі функції в виробничому процесі. Його головне призначення – це здійснення робіт в умовах, в яких людина не зможе перебувати. Крім того, при використанні маніпуляторів рівень і якість продукції, що випускається, значно зростає. Промислові роботи (ПР) мають більш високу продуктивність, ніж людські ресурси. З'являється можливість щоденного використання технологічного обладнання в кілька змін.



Крім промисловості маніпулятори можуть бути використані для освітніх цілей, як сучасний високотехнологічний дослідницький інструмент в області теорії автоматичного керування. Таке використання ПР дозволяє забезпечувати відпрацювання професійних навичок відразу по декількох суміжних дисциплінах: механіки, теорії керування, схемотехніці, програмуванні та теорії інформації. Робота з роботами дозволяє студентам вже в процесі професійної підготовки вирішувати реальні практичні завдання.

В даний час, більшість ПР, що використовуються у вітчизняній промисловості, випускаються іноземними фірмами. Відомі закордонні роботи-маніпулятори мають значний недолік – високу ціну, а в нашій країні роботи-маніпулятори схожого або такого самого типу не виготовляються. Розробка пристроїв є закритою, тому для забезпечення технічного обслуговування промислових роботів організаціям потрібно і далі співпрацювати з іноземними компаніями. Більшість вітчизняних маніпуляторів відносяться до 70-80-их років минулого століття і є застарілими і менш ефективними, ніж їхні іноземні аналоги. Тому вивчення цієї теми і розробка сучасних вітчизняних маніпуляційних роботів є важливим завданням.

Сучасні промислові роботи мають суттєві відмінності. Їх пристрій і конструктивне виконання залежить від багатьох факторів. До них відносяться призначення робота, умови експлуатації, технічні характеристики і багато іншого. Однак до теперішнього часу склалися певна структура, склад, характеристика і зовнішній вигляд ПР.

Промисловий робот являє собою автоматичну машину, що складається з виконавчого пристрою (маніпулятора) і пристрою програмного керування.

**Метою** даної роботи є розробка системи керування електроприводом для забезпечення виконання маніпулятором, поставлених перед ним завдань. За допомогою методу віртуального моделювання провести дослідження перехідних процесів контурів струму та швидкості в електроприводі маніпулятора робота та проаналізувати отримані результати.

**Об'єктом дослідження** дипломної роботи є процес керування електроприводом маніпулятора.

**Предметом дослідження** є система керування електроприводом маніпулятора.

Таким чином вивчення роботів корисно в усіх відношеннях: по-перше, щоб розуміти принцип та пристрій роботи робота, по-друге, щоб самостійно спроектувати та створити маніпуляційного робота.

Тема дипломної роботи є актуальною, так як розроблена система керування може використовуватись на будь-яких підприємствах в складських приміщеннях та в освітніх закладах, для отримання студентами практичного досвіду роботи з маніпулятором і закріплення теоретичних знань.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВІДНИМ РОБОТОМ-МАНІПУЛЯТОРОМ ТА ПОСТАНОВКА НА ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1. Сфери застосування робототехнічних систем та комплексів

Автоматизація усіх видів виробництва є одним із основних напрямів розвитку сучасної техніки. Тому робототехніка все активніше входить в повсякденне життя, роблячи його більш зручним, комфортним і безпечним. Сфери застосування роботів розширюються з кожним днем. Це обумовлено впровадженням нових функцій і поступовим поліпшенням працездатності виробів. Основна мета впровадження роботизованих систем і автоматичних роботів в виробничі процеси – замінити або оптимізувати людську працю в сферах або завданнях, в яких його використання нерентабельне, небезпечне або є джерелом помилок. Виключивши людський фактор в деяких аспектах, підприємства знижують відсоток браку і підвищують продуктивність за рахунок збільшення швидкості і точності рутинних операцій [2].

Ефективним засобом вирішення багатьох завдань комплексної автоматизації є робототехнічні системи та комплекси.

Робототехнічна система – це система, що включає роботів, робочі органи роботів, а також машини, устаткування, пристрої та датчики, які підтримують роботів під час роботи [2]. Роль роботів в таких системах може бути:

- основна, коли роботи здійснюють головні функції;
- допоміжна, коли роботи обслуговують основне або допоміжне устаткування, що виконує ці функції.

Робот – це технічний комплекс, призначений для виконання різних рухів і деяких інтелектуальних функцій, які властиві людині. Робот забезпечений необхідними для цього виконавчими пристроями, які керують і інформаційними системами, а також засобами рішення обчислювально-логічних задач. Основними компонентами робота є маніпуляційний механізм і

автоматична система управління, яка включає мікроЕОМ або комплекс мікропроцесорів, а в ряді випадків включає і сенсорний пристрій [4].

По призначенню і областям застосування роботів, їх можна поділити на три класи:

- 1) маніпуляційні (або роботи-маніпулятори);
- 2) інформаційні;
- 3) крокуючі роботи.

Інформаційні роботи дають змогу автоматично отримувати і передавати інформацію про досліджуваний об'єкт. Найчастіше роботи цього класу призначені для використання в космосі, на орбіті Землі або інших планет, у відкритому космічному просторі, на поверхні різних космічних тіл, а також пов'язані з космічними дослідженнями. До цього класу також входять апарати для дослідження дна і підводного простору, а також для проведення підводних робіт тощо.

В даний час велика увага приділяється розробці крокуючих роботів, так як такі роботи можуть застосовуватись в медицині. Наприклад, роботи-екзоскелетони, які закріплюються безпосередньо на людині-операторові і які фізично розвантажують оператора, забезпечують йому фізичну підтримку, збільшують його фізичні здібності [10].

Найбільш великий клас роботів-маніпуляторів. Маніпуляційним роботом називають технічний пристрій, який забезпечений маніпуляторами і здатний самостійно виконувати різні механічні операції в своєму робочому просторі [4]. Це найбільш широкий клас робототехнічних пристроїв. До нього відносяться всі промислові роботи (ПР), а також маніпуляційні роботи (МР), призначені для заміни людини в тих випадках, коли вона не може бути присутня на місці виконання операції або виконувати її самостійно – під водою, в космічному просторі, в умовах підвищеної радіації і т.п. Важливою механічною частиною маніпуляційного робота є маніпулятор, який призначений для виконання рухових функцій, що відповідають аналогічним функціям руки людини при переміщенні об'єктів в просторі.

В даний час області застосування роботів зовсім різноманітні. Так як роботів часто використовують для виконання завдань, у вирішенні яких людина безпорадна, вони мають широке застосування в світі досліджень. Великими можливостями володіють дистанційно керовані роботи при роботі в космосі. Для вивчення планет сонячної системи і космічного простору використовуються космічні апарати, всюдиходи з функціями роботів і посадочні модулі.

Для проведення океанологічних досліджень застосовують підводні роботи. Їх робота заключається в пошуку і забезпеченні підйому затонулих об'єктів, в проведенні аварійно-рятувальних та інспекційних робіт, дослідження дна і підводного простору, проведенні геологічних робіт на морському дні, монтажних робіт, збір представників підводної флори і фауни і т.д. Цих роботів також використовують для обслуговування і ремонту устаткування підводних нафтових свердловин, розвідки і видобутку корисних копалин з дна у вигляді розсипів руд і конкрецій. У військових цілях їх можуть застосовувати для створення і обслуговування підводних баз, ракетних баз, підйому з дна затонулих об'єктів військового призначення, порятунку екіпажів затонулих підводних човнів, загублених ядерних бомб, штучних супутників Землі, несправних підводних апаратів тощо [4].

Слід зазначити, що існує великий спектр роботів, призначених для роботи на атомних електростанціях – діючих і тих, що виводяться з експлуатації, а також на підприємствах атомної промисловості, наприклад, на підприємствах, зайнятих виробництвом урану.

Це важливий напрямок роботизації, оскільки на таких підприємствах існує підвищена небезпека радіоактивного зараження і використання тут робототехніки в прямому сенсі може рятувати життя і здоров'я людей. В оборонній промисловості робототехнічні системи використовують при роботі з боєприпасами.

Широкі можливості застосування роботів в медицині. Наприклад, створення штучних кінцівок і протезів. Мета створення медичних робопротезів

– це відтворення втрачених кінцівок, що володіють як можна більш подібними можливостями, для відновлення функціональності людини з обмеженими здібностями. Вони універсальні, гнучкі і управляються оператором-інвалідом.

Застосовують в медицині і так звані мобільні роботи-маніпулятори («механічні доглядальниці»). Вони призначені для допомоги пацієнту, медсестрі або лікарю. Можуть здійснювати різну діяльність, пов'язану з вимірами і моніторингом стану пацієнта [10]. Деякі моделі мають додаткові можливості, наприклад, надання допомоги пацієнту в переміщеннях, наприклад, з ліжка на крісло-каталку тощо. Управління такими роботами здійснюється за допомогою рукоятки або мікроперемикача. Розробляються маніпулятори для проведення складних хірургічних операцій. Такі роботи мають високу точність рухів, можливість використання тривимірного стереозображення, більш широким діапазоном доступних системі рухам, ніж у людської руки.

Широко використовують навантажувальні маніпулятори, які дозволяють не тільки виконувати захоплення, перенесення і орієнтацію вантажів в просторі, але і забезпечувати розміщення вантажів в робочій зоні. Вони допомагають механізувати та автоматизувати роботу на вантажно-розвантажувальних і транспортно-складських роботах, в лісовій, дерево- та металообробній промисловості, в складальних роботах, в торгівлі, сфері побутового обслуговування та інших галузях сільського господарства [6].

Дуже широко роботи використовуються в складських приміщеннях. Це дозволяє звільнити людину від важкої роботи та збільшити об'єм виконаної роботи.

Так як роботи є досить точними, зручними і функціональними, це дозволяє використовувати їх в авіаційній галузі. Наприклад, роботизовані пілоти – покликані замінити льотчиків, здатні керувати будь-яким типом літального апарату. Роботи можуть взяти на себе ряд операцій передпольотного контролю, наприклад, автономного наземного тестування систем управління в

літакових кабінах, а також зовнішній структурний огляд. Роботи можна використовувати для огляду і ремонту турбовентиляторних двигунів.

Роботи можуть застосовуватись в організації роботи аеропортів:

а) Роботи інформатори – переміщуються по аеропорту і служать для надання довідок. Пасажири можуть задати такому роботу питання і отримати відповідь, наприклад, про прибуття або відправлення того чи іншого рейсу.

б) Роботи для приймання багажу (робот, який самостійно виконує приймання багажу в аеропорту).

в) Роботи-прибиральники, які забезпечують автономну прибирання приміщень аеропорту.

г) Роботи-поліцейські. Це свого роду рухливі телекамери, які проводять сканування осіб людей, що знаходяться в аеропорту з метою виявлення небажаних осіб, наприклад, тих, хто знаходиться в списках розшукуваних. Підтримують функцію телеприсутності – через робота співробітник служби охорони аеропорту або поліція можуть поспілкуватися з відвідувачами аеропорту по гучному зв'язку.

д) Роботи для приймання багажу (робот, який самостійно виконує приймання багажу в аеропорту).

е) Роботи-прибиральники, які забезпечують автономну прибирання приміщень аеропорту.

Використовують роботів і в сфері побуту. Найпоширенішими є робот-пилосос, кухонні роботи, робот-пожежний, робот-регулювальник вуличного руху, робот-домогосподарка.

У зв'язку епідеміологічною ситуацією у світі є актуальним використання роботів-дезінфекторів. Це роботи, призначені для автоматизації планової або екстреної дезінфекції в приміщеннях, де присутність вірусів і бактерій небажано.

Створення роботів, крім прогресу в безпосередніх областях їх застосування, призводить до розвитку таких галузей науки і техніки, як

кібернетика, механіка, теорія інформації, теорія автоматичного управління, біологія, медицина, океанологія, техніка зв'язку та інші.

Можна зробити висновок, що до теперішнього часу роботи впроваджені в багато сфер діяльності людини і продовжують доповнювати та іноді замінювати людську працю, як в небезпечних видах діяльності, так і в повсякденному житті.

## **1.2. Види та функції роботів-маніпуляторів, що застосовуються на промислових та складських приміщеннях**

Промислова роботизована техніка відіграє провідну роль при виконанні базових і допоміжних технологічних завдань в процесі виробничих операцій. Гнучкі автоматизовані системи дозволяють значно прискорити виробництво і підвищити якість робіт. Впровадження автоматизації в виробничі процеси значно спрощує багато процедур.

Промисловий робот – це автоматична машина, стаціонарна або пересувна, що складається з виконавчого пристрою у вигляді маніпулятора, що має кілька ступенів рухливості, і може змінювати програму пристрою програмного управління для виконання у виробничому процесі рухових і керуючих функцій.

Сучасні роботи-маніпулятори допомагають виключити можливі помилки і збої в роботі. Всі виробничі процедури виконуються з максимальною точністю, що виключає ризик можливих збитків. Керівники виробничих об'єднань відзначають безперебійність і високу продуктивність за рахунок використання робототехніки, адже промислові роботи-маніпулятори можуть бути оснащені різними видами маніпуляторів в залежності від оснащення об'єкта і побажань замовника.

Складські роботи – це роботи, призначені для ведення операцій на складах. Існує чимало їх різновидів, а також комплексні рішення автоматизації



складів, що залучають, наприклад, промислові маніпулятори, мобільні роботизовані візки, палетайзери та іншу техніку.

Стимул для активної роботизації складських приміщень – це оптимізація простору, прискорення операцій, виключення людини з операцій на складі.

Роботи-візки здатні автономно переміщати палетки по території складу. Деякі з них здатні автоматично знімати потрібні товари з полиці і поміщати їх в контейнери або на палетку, а також, навпаки, - розкладати товари по полицях. Складним питанням є забезпечення можливості навігації всередині складських приміщень. Для цього використовуються різні способи. Деякі вимагають підготовки складу – розмітки на підлозі або установки спеціальних міток (бездротових або відбивних) на стінах і полицях.

Також стоїть завдання підвищення коефіцієнта корисної дії складських робіт, оскільки сьогодні найчастіше роботи переміщують великі і важкі стелажі. У перспективі роботи повинні навчитися самостійно справлятися із завданням вилучення зі стелажа окремих предметів, незалежно від їх форми.

Роботи-палетайзери, як правило, це промислові маніпулятори, що приводяться в рух серводвигунами і призначені для автоматичного захоплення і складання продукції на палети.

Роботи-сортувальники – незамінні при сортуванні та упаковці товарів, наприклад, в системах онлайн-торгівлі. В ідеалі вони повинні вміти справлятися з завданням розбору предметів з купи з їх точною ідентифікацією. Це можна робити, наприклад, якщо мати цифрову базу тривимірних зображень всіх предметів, якими маніпулює робот.

Від створення окремих роботів для роботи на складі, розробники перейшли до створення комплексних рішень автоматизації, призначених для роботи на складах. Іноді в таких системах використовуються групи спеціалізованих роботів, що взаємодіють між собою, наприклад, один з роботів знімає з полиць товари, інший перевозить ці товари до точки видачі.

За допомогою літаючих безпілотників можна проводити швидку інвентаризацію складів з високими полицями.

Отже, автоматизована система складування нового покоління дозволяє вирішувати цілий комплекс завдань у виробничій сфері. Ціна на роботи-маніпулятори, звичайно ж, висока, проте швидко окупається за рахунок збільшення продуктивності і швидкості забезпечує хорошу рентабельність.

### **1.3. Опис маніпуляційного робота**

Маніпуляційний робот (МР) являє собою багатофункціональний маніпулятор, призначений для заздалегідь заданих переміщень деталей, виробів або матеріалів з метою виконання різних робіт. Маніпуляційний робот являє собою технічну систему, яка замінює праця людини, до складу якої входить орган впливу на навколишнє середовище [2].

Маніпулятор, по своїй структурі, є багатоланковим пристроєм, між окремими елементами якого є механічний зв'язок. Перша ланка маніпулятора є основою робота, а остання несе робочий орган, який безпосередньо взаємодіє з об'єктом маніпулювання. Система ланок сполучена між собою обертальними і поступальними зв'язками. Залежно від характеру і кількості таких зв'язків з'єднання елементів маніпулятора може бути виконано з використанням:

- декартової системи координат;
- циліндричної системи координат;
- сферичної системи координат;
- обертальної системи координат;
- паралельної зв'язку;
- кінематичної схеми SCARA.

Розглянутий в даній роботі маніпулятор (рис. 1.1) складається з вертикальної стійки і дволанкової шарнірної руки. Його ланки оснащені електроприводами, які забезпечують їх переміщення.

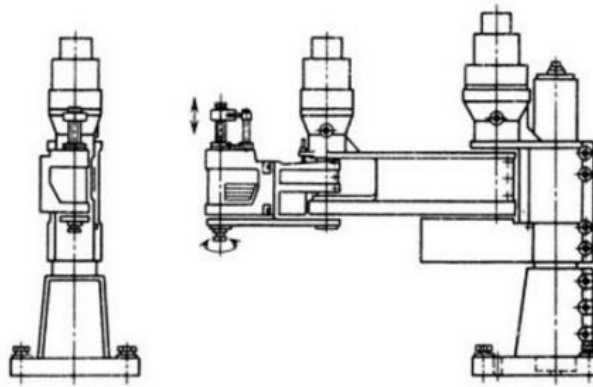


Рис. 1.1. Дволанковий маніпулятор

Маніпулятор має два обертальні в горизонтальній площині ступеня рухливості і перпендикулярний до них – поступальний (рис. 1.2). Таке з'єднання має назву "SCARA" (Selective Compliance Assemble Robot Arm – рука складального робота з виборчою піддатливістю) [6].

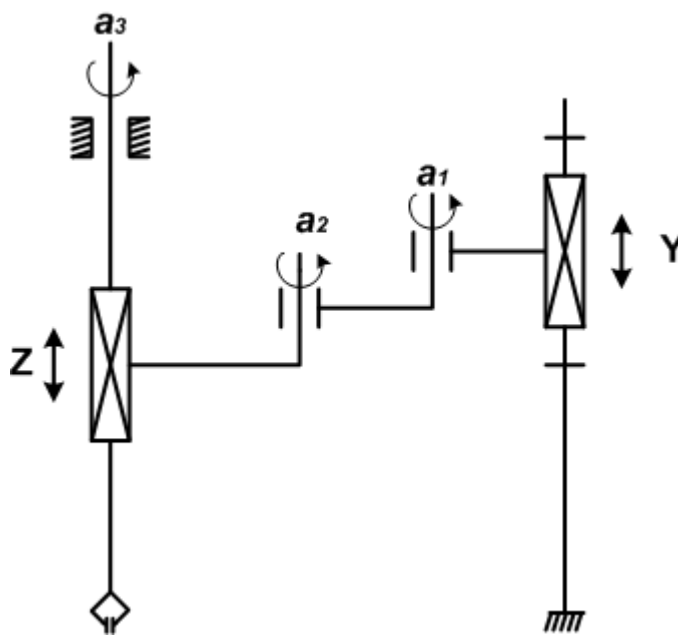


Рис. 1.2. Механічна система маніпулятора

Її відмінність полягає в обертанні ланок в плечовому і ліктьовому суглобі (під кутами  $a_1$  і  $a_2$ ) в горизонтальній площині, і використання вертикальної рухливості для поступального руху хватного пристрою в напрямку  $Z$ . Крім того можливо ручне переміщення по напрямку  $Y$  з фіксацією встановленого положення. На вільному кінці ланки закріплений пневмоциліндр

вертикального ходу захватного пристрою. Захватний пристрій може повертатися на кут  $\pm 360^\circ \cdot n$  (програмується число оборотів) навколо вертикальної осі [6].

Програмування промислового робота (ПР) проводиться з пульта, оснащеного телевізійним монітором (рис 1.3). В пам'ять керуючої мікроЕОМ можуть бути одночасно введені п'ять програм з умовою автоматичної зміни.



Рис. 1.3. Пульт для керування маніпулятором

За рахунок високої жорсткості в вертикальному напрямку роботи даного типу можуть переносити вантаж до 30 кг, і при цьому вони дуже зручні для виконання складальних операцій.

#### **1.4. Аналіз систем приводів робота-маніпулятора**

Маніпулятори роботів приводяться в дію за допомогою виконавчих приводів, які перетворюють електричні сигнали «електронного мозку» – керуючого пристрою – в необхідне положення ланки. Тому серйозним питанням є вибір типу приводу, так як привід визначає динамічні характеристики робота, його точність, число точок позиціонування, вимоги до умов експлуатації.

Привід, як відомо, включає в себе, перш за все двигун і відповідний пристрій керування. Крім цього, в склад приводу можуть входити різні механізми для передачі і перетворення руху (редуктори, перетворювачі обертового руху в поступальний і навпаки), гальмо і муфта [5].

При виборі типу приводу необхідно враховувати наступні фактори:

- навантаження, що діє на робочий орган;
- кінематику маніпулятора, тобто закони руху всіх ланок і робочого органу, що враховують процеси розгону і гальмування;
- необхідну точність позиціонування, відтворення траєкторії і швидкісних характеристик ланок;
- умови навколишнього середовища (забруднення, запиленість, пожежо- та вибухонебезпечність, агресивність, висока температура і ін.);
- регламент експлуатації робота (бажаний ККД, надійність, термін служби, компоновка та ін.).

У зв'язку з вищесказаним можна сформулювати вимоги до приводів для промислових роботів:

- висока питома потужність (відношення потужності приводу до маси його елементів, розташованих на маніпуляторі);
- висока точність позиціонування по кожній координаті, незважаючи на високі динамічні навантаження і велику кількість кінематичних пар;
- діапазон навантажень на привід з переважанням інерційних зусиль;
- великий ресурс роботи і висока надійність.

При виборі типу приводу необхідно орієнтуватися на наступну їх класифікацію:

- за способом відліку координат виділяються приводи з відносним або абсолютним відліком. При відносному способі наступна координата відраховується від того положення, яке привід зайняв при виконанні попередньої частини програми. Похибка переміщення буде накопичуватися. При абсолютному способі відлік ведеться кожен раз від початку координат, і якщо на одній з ділянок виникне помилка, то вона не позначиться на

подальших переміщеннях. Прикладом приводу з відносним відліком може служити кроковий привід, з абсолютним відліком – електропривід зі зворотним зв'язком по положенню;

- по виду руху виділяються приводи, на такі що задають обертальний або зворотно-поступальний рух;
- по виду використовуваної енергії приводи поділяються на пневматичні, гідравлічні, електричні і комбіновані (наприклад, електрогідравлічні, гідропневматичні та ін.).

Розглянемо докладніше деякі види приводів.

Пневматичні приводи широко застосовується в простих роботах і захватних пристроях малої вантажопідйомності [5]. Близько 40% роботів в світі виконані на пневматичних приводах. Широке поширення пневматичних приводів в робототехніці пояснюється їх простотою, дешевизною і надійністю. Правда, ці приводи погано керовані і тому використовуються в основному як нерегульовані з циклових управлінням. Крім того, пневматичні приводи застосовують тільки для роботів невеликої вантажопідйомності – до 10, рідше 20 кг.

Однак у зв'язку з тим, що розвиток робототехніки, почався з освоєння найбільш простих і легких роботів, пневматичні приводи відразу ж отримали в них широкого поширення. В промисловості такі прості і дешеві роботи виявилися дуже ефективними і потрібними все в більшій кількості, частка пневматичних роботів в загальному парку роботів продовжує зберігатися на вказаному вище рівні, незважаючи на появу і швидкий розвиток більш досконалих роботів інших типів.

Отже, основними перевагами використання пневматичних приводів є:

- простота конструкції і компоновки елементів та надійність конструкції;
- низька вартість конструкції та обслуговування;
- швидкодія;
- високий ККД (до 0,8);
- можливість використання стисненого повітря із заводської мережі;

- можливість застосування в пожежо- і вибухонебезпечних середовищах;
- екологічність.

Але схема системи пневмоприводу досить складна і включає в себе керуючі, розподільні і виконавчі пристрої. Також є складність реалізації керування положенням і швидкістю через стискання повітря. Через це пневматичні системи працюють в режимі програмного керування. Так само до недоліків пневмопривода відносяться:

- нестабільність швидкості вихідної ланки при зміні навантаження;
- неможливість здійснити програмне переміщення без упорів;
- обмеженість числа точок позиціонування;
- має деякі межі в вантажопідйомності. Для значних навантажень потрібні великі габарити пневмообладнання, тому частіше пневмопривід можна зустріти на ділянках, де не потрібно прикладати великі зусилля;
- необхідність демпфірування руху приводу в кінці ходу для погашення удару по упорів.

У гідроприводах рух виконавчого органу здійснюється за допомогою руху рідини. Гідравлічні приводи, на відміну від пневматичних та електричних, мають велику питому потужність (500-1000 Вт і вище), тому вони знайшли широке застосування в роботах середньої, великої та надвеликої вантажопідйомності [8]. Гідравлічні приводи добре управляються як в позиційному, так і в контурному режимі. До переваг гідроприводів так само відносять:

- здатність розвивати дуже велике зусилля при компактних параметрах;
- стабільність швидкості вихідної ланки і точність позиціонування;
- можливість управління за заданою програмою;
- широкий діапазон робочої температури від -50 до +100;
- безступінчасте регулювання швидкості;
- висока питома потужність.

До основних недоліків можна віднести наступне:

- необхідна насосно-акумуляторна установка, яка займає досить багато місця;

- необхідна часта заміна робочої рідини, фільтрів, ущільнень і тощо;

- висока вартість самого устаткування і його техобслуговування;

- застосування гідроприводу обмежена в пожежо- і вибухонебезпечних середовищах і в вакуумі;

- характеристики робочого тіла залежать від температури, яка змінюється в процесі роботи;

- можливі підтікання ущільнень та інших пристроїв.

Аналіз останніх тенденцій робототехніки показує, що все частіше в промислових роботах використовують електроприводи. Електропривод споживає енергію тільки при русі, що робить його особливо економічним [8]. Може використовуватися електродвигун будь-якого типу – постійного, змінного струму, серводвигун та інші [1].

Завдяки своїм компактним розмірам, він може монтуватися в складі практично будь-якого обладнання і верстатів. Через доступність джерела енергії він застосовується у всіх галузях на основних і допоміжних операціях.

Перевагами застосування електроприводу є:

- низька вартість енергії;

- простота конструкції всієї системи (щодо двох інших видів приводу);

- висока точність роботи;

- можливість передачі енергії на відстань без значних втрат;

- точне позиціонування і плавне регулювання;

- простота автоматизації, широкий спектр додаткових пристроїв, які контролюють і регулюють датчиків;

- екологічність, відсутність шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Недоліком електроприводу є складність застосування в пожежонебезпечних зонах і вибухонебезпечних середовищах, і також при великій вологості. Але цей недолік можна усунути вибором спеціального типу



двигуна з високим ступенем захисту. Так само електропривод відрізняється своєю дорожнечою, так як купується механізм уже з двигуном. При тривалій безперервній роботі можливий перегрів двигуна, зношування частин [8].

Основна область застосування електричних приводів в робототехніці на сьогоднішній день – це роботи середньої вантажопідйомності (десятки кілограм), легкі роботи з позиційним і контурним управлінням та важкі, перш за все рухливі роботи, з циклових і простим позиційним керуванням. Маніпулятори з електромеханічними приводами мають кращу точність і повторюваність рухів, ніж гідравлічні або механічні.

### **1.5. Класифікація систем керування електроприводами**

Завданнями управління електроприводами є: здійснення пуску, регулювання швидкості, гальмування, реверсування робочої машини, підтримання її режиму роботи відповідно до вимог технологічного процесу, управління становищем робочого органу машини. При цьому повинні бути забезпечені максимальна продуктивність машини або механізму, найменші капітальні витрати і витрати електроенергії [5].

Конструкція робочої машини, вид електроприводу і система його управління пов'язані між собою. Тому вибір, проектування і дослідження системи керування електроприводом повинні здійснюватися з урахуванням конструкції робочої машини, її призначення, особливостей і умов роботи.

Крім основних функцій системи управління електроприводами можуть виконувати деякі додаткові функції, до яких відносяться сигналізація, захист, блокування та ін. Зазвичай системи управління одночасно виконують кілька функцій.

За способом управління розрізняють наступні системи управління роботами:

- програмні, в яких управління здійснюється за заздалегідь складеною і залишається незмінною в процесі реалізації керуючої програми;

- адаптивні, в яких управління реалізується у функції від інформації про поточний стан і зміни зовнішнього середовища і самого робота, що отримується в процесі управління від сенсорних пристроїв;

- інтелектуальні, в яких адаптивні властивості розвинені до рівня, відповідного інтелектуальній діяльності людини.

Для систем управління електроприводами зберігається загальна класифікація автоматизованих систем за різними ознаками. Так, автоматизовані системи підрозділяються на два типи:

- розімкнені – без урахування результату керуючого впливу на об'єкт управління;

- замкнуті – з урахуванням через зворотні зв'язки результату впливу на об'єкт управління.

Для замкнутих систем основним принципом управління є принцип зворотного зв'язку, що означає управління по відхиленню результату від завдання. Доповненням до цього принципу є комбіноване управління, коли, крім відхилення від завдання, вводиться в управління рівноваги вплив або додатково похідні величини завдання.

Принципи регулювання визначають основу пристрою регулятора і головні особливості його роботи. За принципом побудови системи керування електроприводами можна розділити на:

- система регулювання по відхиленню. У системах з принципом регулювання по відхиленню зменшуються відхилення, що виникають при зміні параметрів елементів системи. Тому замкнуті системи будуть менш чутливі до змін параметрів її елементів в порівнянні з розімкнутими системами, де відхилення викликані змінами параметрів їх елементів не компенсується. Перевагою такого регулювання є зменшення відхилення регульованої величини від необхідного значення незалежно від того якими факторами воно викликано. Недоліком є те, що в простих одноконтурних системах не можна досягти абсолютної інваріантності, в системах виникає проблема стійкості [1].

- системи з регулюванням по збуренню. Така система є розімкнутою. У ній процес регулювання не залежить від результатів і спостерігається тільки прямий вплив. Системи з таким регулюванням дозволяють повністю компенсувати обурені впливу. Недоліком є те, що вони усувають вплив лише основних збурюючих впливів за якими створені компенсаційні канали. Так само застосування принципу регулювання по збуренню обмежена об'єктами, характеристики яких відомі [1].

- системи з комбінованим керуванням. Такі системи поєднують принципи регулювання по відхиленню і по збуренню. В цих системах принцип регулювання по відхиленню реалізується за допомогою головного зворотного зв'язку, а принцип регулювання по збуренню за допомогою компенсаційних зв'язків. У цих системах компенсаційний зв'язок за основним збуренням усуває складову помилку, викликану цим збуренням, а в результаті дії зворотного зв'язку зменшуються помилки викликані другорядними впливами, що обумовлюються відсутністю компенсаційних зв'язків. У комбінованих системах за допомогою комбінованих зв'язків можливо досягнення повної компенсації помилок, що викликані основними збуреннями. При порушенні умов компенсацій збурюючого впливу помилка, що виникає, зменшується із замкнутою системою, тобто комбіновані системи менш чутливі до змін параметрів розімкнених каналів [1].

До завдань, що покладаються на системи управління, в загальному випадку відносять:

- стабілізацію деякої координати об'єкта управління;
- програмне управління по заздалегідь відомому закону;
- стеження за деякою вимірюваною величиною, закон зміни якої заздалегідь невідомий;
- самоналаштування (адаптацію) системи управління на оптимум якого-небудь показника об'єкта управління.

В адаптивних системах керуючий сигнал від системи управління коригується автоматично при зміні параметрів зовнішнього середовища або

умов роботи машини. Для забезпечення оптимальності роботи системи відбувається переналаштування параметрів або структури регулятора на всьому діапазоні. Ці системи можна розділити на:

- ті, які самоналаштовуються, у яких зміна параметрів регулятора здійснюється на основі динамічних характеристик об'єкта та інформації, одержуваної в процесі роботи [1];

- ті, які самоорганізуються. У таких системах на основі поточної інформації про стан об'єкта формується алгоритм і відбувається зміна структури та параметрів регулятора [1].

## **1.6. Системи керування швидкістю електроприводів постійного струму**

Існує декілька варіантів систем керування швидкістю електроприводів постійного струму:

- системи модального керування;
- системи з вузлами обмеження струму;
- системи з підпорядкованим регулюванням координат.

Модальне керування відноситься до кореневих методів синтезу лінійних САК, тобто виходячи із заданих (бажаних, необхідних) показників якості управління, будується бажаний характеристичний поліном, тобто визначається місце розташування коренів характеристичного рівняння [9]. Задача зводиться до визначення коефіцієнтів відповідних зворотних зв'язків за станом об'єкта, а не шляхом застосування коригувальних ланок в прямій ланцюга САК. Це управління застосовується тоді, коли всі складові вектора стану об'єкта управління доступні безпосередньому виміру (повна керованість).

Системи модального керування застосовуються для електроприводів, яким важко надати стійкість. Такі електроприводи як динамічні системи характеризуються високим порядком результуючого диференціального рівняння.

Головною перевагою застосування такого методу керування є те, що синтезована модальна САК не вимагає перевірки на стійкість, так як вона заздалегідь повинна бути стійкою і мати необхідний ступінь стійкості. Також система не вимагає введення додаткових коригуючих пристроїв, так як вона сама вже задовольняє необхідним показниками якості.

Однією з переваг також є те, що введення модальних ОС, в силу їх безінерційності, не підвищує порядок об'єкта і не порушує його керованість і спостережуваність, що часто відбувається при введенні пасивних інерційних коригувальних пристроїв. Системи модального керування вирізняються своєю відносною простою і економічністю технічної реалізації, так як реалізації модальних ОС може бути виконана за допомогою малопотужних вимірювально-перетворювальних пристроїв і електронних підсилювачів з малими тепловими втратами.

При модальному керуванні при збільшенні вхідного сигналу за швидкістю одночасно зростають струм і прискорення, значення яких можуть виявитися вище допустимих [7]. Тобто недоліком такої системи є відсутність обмеження координат при великих змінах вхідних впливів. А властивість лінійної системи така, що відпрацювання різних за величиною впливів здійснюється за один і той же час перехідного процесу. Так, наприклад, при збільшенні задаючого сигналу по швидкості електроприводу зростають одночасно прискорення і струм, значення яких можуть виявитися неприпустимими.

За допомогою спеціального формуючого пристрою – задатчика інтенсивності, можна усунути перевантаження по струму і прискоренню, шляхом обмеження темпу зміни вхідного сигналу. Однак, можливість виникнення неприпустимих перевантажень по струму і моменту зберігається.

В даний час найбільшого поширення набули системи управління з підпорядкованим регулюванням координат.

Система складається з декількох вкладених один в іншій контурів. Число контурів дорівнює числу регульованих координат. Регулятори включені

послідовно. Кожен зовнішній регулятор є задаючим по відношенню до внутрішнього, крім того, на вхід регулятора подається сигнал ОС по регульованій координаті. У цій системі зручно здійснювати налаштування регулятора, оскільки кожен контур, починаючи з внутрішнього, можна розглядати незалежно. Здійснюється таке налаштування за допомогою модульного оптимуму (МО) або симетричного оптимуму (СО).

Модульний оптимум – налаштування системи автоматичного керування, при якій частотна характеристика замкнутої САК має максимально можливу смугу пропускання, але не перевищує по модулю «1» у всій смузі пропускання.

Налаштування системи на МО має такі переваги:

- забезпечує найкраще відпрацювання задаючого впливу (мінімальний час перехідного процесу при малому перерегулюванні);

- має малу чутливість до зміни параметрів регулятора і об'єкта, тобто не вимагає високої точності визначення параметрів об'єкта і налаштування регулятора;

- має більш простий в порівнянні з симетричним оптимумом регулятор.

Недоліки такого методу:

- при наявності в об'єкті інтегруючої ланки або аперіодичної ланки з дуже великою постійною часу необхідне застосування пропорційного регулятора, що призводить, в окремих випадках, до значних статичних помилок;

- має більшу в порівнянні з системою, оптимізованою на симетричний оптимум, помилку при відпрацюванні збурюючого впливу.

Симетричний оптимум – налаштування системи автоматичного керування, при якій на низьких частотах необхідний астатизм другого порядку, тобто нахил частотної характеристики 40 дб/дек. Це налаштування більш складне, але забезпечує зниження помилок по керуванню і збуренню в сталих режимах роботи.

Переваги системи, оптимізованої на симетричний оптимум:

- при відсутності вхідного фільтра має швидкодію, що перевищує швидкодію системи, оптимізованої на МО;

- не має статичної помилки при будь-яких об'єктах керування, в тому числі якщо об'єкт містить інтегруючу або аперіодичну ланку з дуже великою постійною;

- забезпечує меншу в порівнянні з модульним оптимумом помилку при відпрацюванні впливів, що збурюють.

Недоліками системи, що налаштована на симетричний оптимум є:

- при відсутності вхідного фільтра має велике перерегулювання;

- при наявності вхідного фільтра має меншу швидкодію, ніж система, оптимізована на МО;

- має більш складний у порівнянні з модульним оптимумом регулятор;

- має більш високу в порівнянні з системами, оптимізованими на модульний оптимум, чутливість до зміни параметрів регулятора і об'єкта, тобто вимагає більш ретельного визначення параметрів об'єкта і більш точного налаштування регулятора.

## **1.7. Показники якості керування електроприводами**

Головним призначенням системи керування електроприводом є сформувати і здійснити сукупність керуючих впливів на двигун, відповідно до технологічних і техніко-економічних вимог, що забезпечує рух робочого органу виробничої установки. Якість виконання покладених на систему завдань оцінюється різними техніко-економічними показниками якості. Показники якості можна розділити на дві групи:

- якості СУ (надійність, маса і габарити, вартість тощо);

- якості, що характеризують результат впливу системи керування на об'єкт управління (ступінь автоматизації руху електроприводу, жорсткість механічних характеристик, діапазон регулювання швидкості, точність

регулювання координат електропривода, їх перерегулювання, швидкодія, плавність руху та ін.) [1].

Для визначення ряду показників якості, що характеризують статичні і динамічні властивості електроприводу, використовуються тестові режими. Так, швидкодія в часовій області характеризується часом перехідного процесу, що визначається як час входження в п'ятивідсоткову зону відхилення керованої координати  $x$  від її сталого значення  $x_{вст}$  по режиму обробки стрибка сигналу, тобто по перехідній функції (рис. 1.4) [9]. Плавність руху визначається перерегулюванням по перехідній функції.

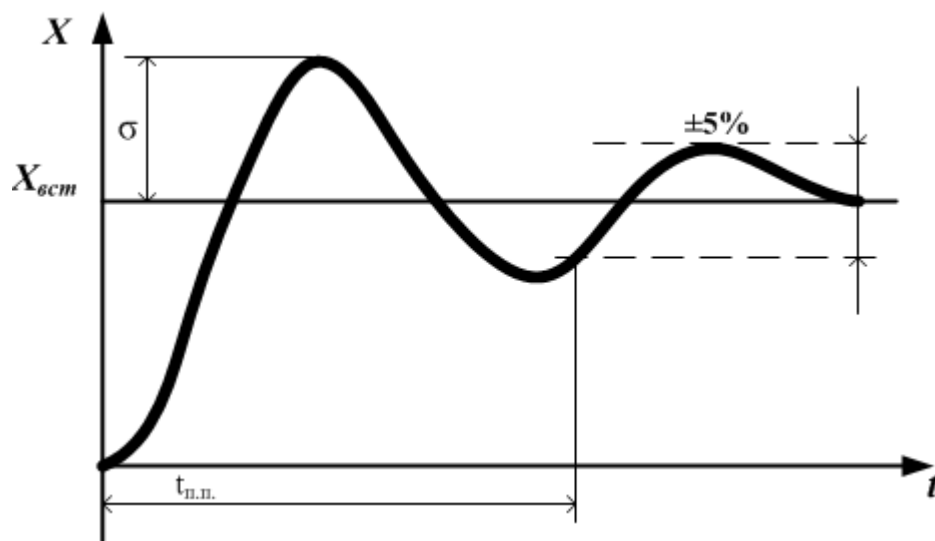


Рис. 1.4. Показники плавності руху в часовій області

## 1.8. Постановка задачі на дослідження

Головною задачею дослідження є необхідність змодельовати та дослідити систему автоматичного керування приводом робота-маніпулятора. Метою даного моделювання є створення ефективної, зручної, точної та адекватної моделі системи, а також здійснити підбір параметрів підсилювального пристрою та коригувального елемента. Дослідити ефективність даної системи та її вплив на навколишнє середовище. Для цього необхідно:

- підібрати елементну базу електроприводу: датчики струму і швидкості, перетворювач та двигун постійного струму незалежного збудження;



- розробити структурну схему електроприводу;
- розрахувати передавальні функції елементів контуру струму та контуру швидкості;
- змодельовати та дослідити перехідну характеристику в середовищі MatLab 2015.
- розробити інструкцію з охорони праці під час роботи з системою та її вплив на навколишнє середовище.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати ряд завдань:

- 1) проаналізувати існуючі системи автоматичного керування роботом-маніпулятором та приводи, які можуть бути використані;
- 2) розробити структурну схему системи автоматичного керування приводом;
- 3) змодельовати систему керування приводом робота-маніпулятора;
- 4) дослідити систему;
- 5) проаналізувати небезпечні та шкідливі фактори при роботі з роботом-маніпулятором;
- 6) розглянути заходи та інструкцію з техніки безпеки, для безпечного керування електроприводом;
- 7) проаналізувати вплив даної системи на навколишнє середовище.

## РОЗДІЛ 2

### ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

#### 2.1. Основні елементи електроприводу

Електричний привід (електропривод) являє собою сукупність електромеханічних, інформаційних і керуючих пристроїв, що використовуються для перетворення електричної енергії та приведення в рух виконавчих органів робочого обладнання в рамках виконання технологічного процесу [7].

Загальна структурна схема електричного приводу представлена на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Структурна схема автоматизованого електроприводу

Як показано на рис. 2.1 основними елементами електроприводу є:

- Перетворювальний пристрій (перетворювач електроенергії) – це електротехнічний пристрій, що перетворює електричну енергію з одними

значеннями параметрів або показників якості в електричну енергію з іншими значеннями параметрів або показників якості. Перетворювачі класифікуються по виду струму (постійного і змінного струму), або по елементній базі (тиристорні і транзисторні).

- Електродвигунний пристрій – електродвигун (електромеханічний перетворювач) – це електротехнічний пристрій, призначений для перетворення електричної енергії в механічну або механічної в електричну. Електродвигуни можуть бути змінного і постійного струму [7].

- Передавальний пристрій, який призначений для передачі механічної енергії від електродвигуна до виконавчого органу, перетворення видів руху, узгодження швидкостей, моментів, зусиль (редуктор, ремінна передача, електромагнітна муфта тощо). Передавальний пристрій складається з передачі механічної передачі і пристрою сполучення.

- Керуючий інформаційний пристрій призначений для формування керуючих впливів в електроприводі і являє собою сукупність функціонально пов'язаних між собою електромагнітних, електромеханічних, напівпровідникових елементів. У найпростішому випадку керуючий пристрій може зводитися до звичайного рубильника, що включає електродвигун в мережу. Високоточні електроприводи містять в керуючому пристрої мікропроцесори і ЕОМ.

- Робоча машина – це машина, що здійснює зміну форми, властивостей, стану і положення предмета праці. Виконавчий орган робочої машини – це рухомий елемент робочої машини, що виконує технологічну операцію.

## **2.2. Датчики**

Стан машин і установок можна контролювати спеціальними пристроями, які називають чутливими елементами або датчиками. Сигнал від датчика подається на пристрій порівняння разом з заданим сигналом, сигнал різниці подається на підсилювач, і цей посилений сигнал діє на виконавчий орган, що

змінює стан регульованого об'єкта. В даний час різні датчики широко використовуються при побудові систем автоматичного керування.

В системах автоматичного керування розрізняються і використовують чотири основні типи датчиків:

- струму;
- швидкості;
- напруги;
- положення.

Також можуть використовуватися датчики моменту (зусилля), потужності та електрорушійної сили (ЕРС), які отримують сигнали шляхом обробки даних з датчиків струму і напруги.

За принципом дії датчики ділять на аналогові та дискретні.

Аналогові вимірювальні датчики – це первинні перетворювачі. Такий тип датчиків застосовується в системах безперервного вимірювання і регулювання. Принцип дії таких датчиків полягає в тому, що при зміні параметра відбувається відповідна зміна його вихідного сигналу.

Дискретні вимірювальні датчики – це зазвичай сигналізатори, реле тощо. Такий тип датчиків застосовується, коли необхідно відстежити конкретне значення вимірюваного параметра для будь-яких подальших дій. Ці датчики встановлюються там, де немає необхідності отримувати всі значення вимірюваного параметра, там, де необхідно знати, чи досяг параметр будь-якого конкретного значення. В цьому випадку вимірювальна система видає сигнал тільки при досягненні заданого обмежувального значення.

### 2.2.1. Датчик струму

Контроль і вимірювання струму – це принципова вимога для багатьох систем автоматичного керування, це дозволяє захистити систему від перевантажень струму, імпульсних джерел живлення, програмованих джерел

струму, зарядних пристроїв та ін. Датчики струму призначені для формування електричного сигналу, пропорційного силі струму.

Залежно від принципу роботи датчики струму підрозділяються на резистивні, датчики на основі трансформатора струму і на основі ефекту Холла [11]. Порівняльна характеристика датчиків струму представлена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Порівняльна характеристика датчиків струму

Метод вимірювання струму Характеристика	Резистивні датчики	Датчики на основі ефекту Холла	Датчики на основі трансформатора струму
Точність	Хороша	Хороша	Середня
Точність при нестабільній температурі	Хороша	Погана	Хороша
Вартість	Низька	Висока	Середня
Ізоляція	Немає	Є	Є
Вимірювання високих струмів	Погане	Хороше	Хороше
Споживана потужність	Висока	Низька	Низька

Резистивні датчики містять в своєму складі резистивний елемент, що включається у вимірюваний ланцюг. Недоліком такого датчика є відсутність гальванічної розв'язки.

Перевагами застосування датчиків на основі трансформатора струму є відсутність внесених втрат, напруги зсуву і необхідності використання зовнішнього джерела живлення. Але датчики на основі трансформатора струму

дозволяють вимірювати тільки змінні струми і мають невеликий частотний діапазон [11].

Датчики струму на ефекті Холла дозволяють здійснювати вимірювання і контроль постійних, змінних і імпульсних струмів, мають надійну електричну ізоляцію і широкий частотний діапазон, а також не виділяють тепло. Тому в даній системі автоматичного керування електроприводом робота-маніпулятора було обрано застосувати датчик струму на основі ефекту Холла [11].

Ефект Холла полягає в тому що, якщо уздовж пластини пропустити електричний струм  $I$ , а перпендикулярно площині пластинки створити магнітне поле  $B$ , то на бічних площинах пластинки виникне електричне поле, яке називають полем Холла (рис 2.2).

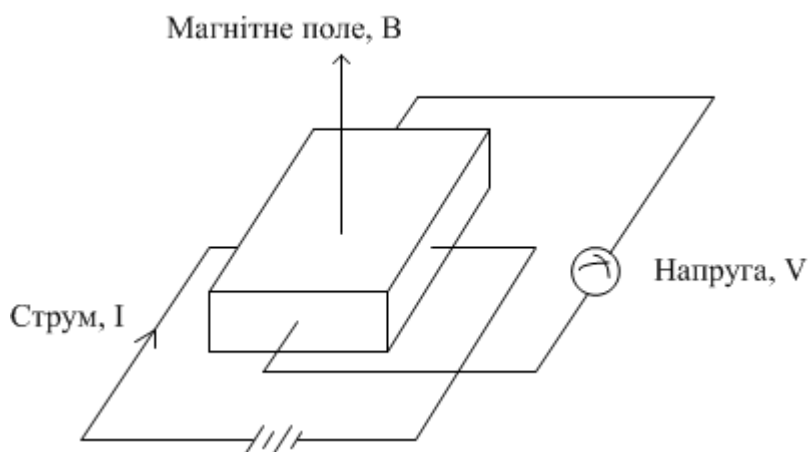
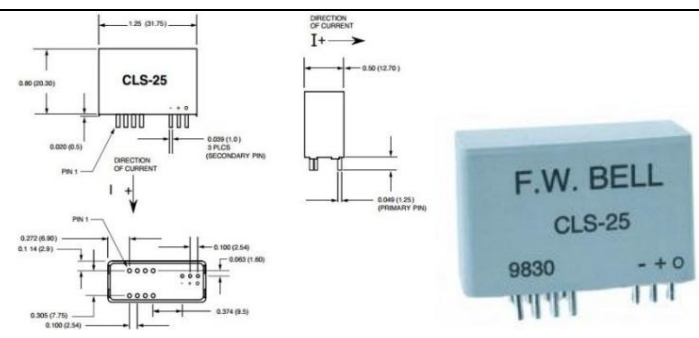


Рис. 2.2. Виникнення ЕРС Холла

Датчики Холла можуть бути нормально замкнутими або нормально розімкнутими. Датчики замкнутого типу струму мають дуже малий час реакції, менше однієї мікросекунди, смуга пропускання петлі близько 100 КГц. Ці датчики відрізняються високою точністю з лінійністю краще 0,1%. Всі ці параметри перевищують ті, які можуть бути отримані в звичайних датчиках розімкненого типу. Також датчики замкнутого типу застосовуються в системах де необхідна висока точність і швидкість.

На основі проведеного аналізу було вирішено обрати датчик струму замкнутого типу з характеристиками, які представлені в таблиці 2.2.

## Основні характеристики датчика струму

Характеристика	Значення
Зовнішній вигляд	
Номінальний струм	25 А
Точність	0,5% (при 25°C)
Робоча напруга	до 15 В
Діапазон температур робочих температур	-40...+90°C
Номінальний струм вихідний	25 мА
Опір	54 Ом
Час реакції системи	1 мкс

Ефект Холла, який використовується в датчиках замкнутого типу забезпечує високу точність в частотному діапазоні до декількох десятків кілогерц з гальванічною розв'язкою вимірювального сигналу від первинного кола.

## 2.2.2. Датчик швидкості

У промисловості для автоматизації багатьох виробничих процесів широко застосовуються датчики та пристрої вимірювання переміщення і положення. Основне завдання таких датчиків полягає у відстеженні лінійного або кутового переміщення контрольованого об'єкта і перетворенні зміни його положення в

відповідний вихідний сигнал, зручний для подальшої обробки або збору інформації. Вихідний сигнал датчика швидкості обертання може бути представлений у вигляді синусоїдальної зміни величини (напруги) або у вигляді послідовності коротких імпульсів.

Датчики швидкості обертання являють собою, так звані, частотні датчики. Їх принцип дії полягає в перетворенні швидкості обертання (кутового переміщення) в частоту змін потоку енергії (електричного струму або напруги). Швидкість обертання в техніці являє собою число оборотів в одиницю часу і носить назву частоти обертання (вимірюється в Гц).

У даній роботі в якості датчика швидкості виступає абсолютний оптичний енкодер. Енкодери призначені для вирішення однієї з найважливіших завдань в області промислової автоматизації – виміру лінійних і кутових переміщень, незамінні при вимірюванні швидкості і прискорення. Інкрементальні енкодери перетворюють механічне обертання валу в набір електронних імпульсів, а абсолютні енкодери дозволяють в будь-який момент часу знати поточний кут повороту осі, в тому числі і після зникнення і відновлення харчування.

Перевагою абсолютного оптичного енкодера є те, що після відключення електроживлення немає необхідності у відновленні вимірювань з нуля. На сигнал не впливають шуми і вібрації, він не потребує точної установки вала. Цей пристрій має найбільший попит в робототехніці та інших високоточних системах.

Від надійності роботи енкодера залежить надійність і якість роботи як вашого комплексного обладнання, так і виробництва в цілому. Отже, обираючи енкодер, необхідно врахувати наступні характеристики:

- кількість імпульсів за один виток (для інкрементальних) або біт (для абсолютних) - чим вищий цей показник, тим точніше вимірювання;
- діаметр вала і отвору під нього – визначає спосіб передачі обертання на пристрій і особливості його кріплення;

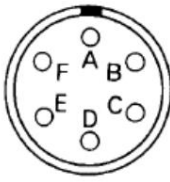



- тип сигналу на виході – впливає на вибір засобу прийому і передачі сигналу;
- напруга живлення – відповідає за стабільне функціонування системи і, відповідно, за точність сигналу;
- особливості роз'єму і довжина проводу – визначають ступінь мобільності конструкції і можливості її монтажу;
- кріпильні елементи – забезпечують надійність системи;
- рівень захисту від пилу і вологи.

Після проведеного аналізу для даної системи було обрано енкодер, основні характеристики якого представлені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

### Основні характеристики датчика швидкості

Характеристика	Значення
Зовнішній вигляд	 <p>Terminal A: A Channel output Terminal B: B Channel output Terminal C: Z Channel output Terminal D: Common Terminal E: +12 VDC Terminal F: 0 V (Terminal C is not used)</p> 
Номінальний струм	0,2 А
Частота	50 кГц
Робоча напруга	до 12 В
Вихідний час відновлення	1 мкс
Вихідний час спаду	0,5 мкс
Число вхідних імпульсів	500 тол/об

Враховуючи, що всі цифрові коди, що генеруються абсолютним енкодером, унікальні, визначити поточну координату лінійного переміщення або кутового положення контрольованого об'єкта (вала), можна відразу ж – після включення абсолютного енкодера. Отже, навіть при швидкому обертанні вала можлива реєстрація положення, хоч і з меншою точністю.

### 2.3. Транзисторний перетворювач

Як регулятор в даній роботі використовується транзисторний перетворювач (ТП), який є основним функціональним вузлом перетворення вхідної напруги постійного струму одного номіналу в ряд постійних напруг різних номіналів і полярностей. Основними достоїнствами транзисторних перетворювачів напруги є: високий коефіцієнт корисної дії, малі габарити і маса, висока питома потужність. Так як транзисторний перетворювач не має рухомих механічних частин, він є надійним і довговічним. Також за допомогою ТП можна розширити діапазон керування швидкістю обертання двигуна. Керування двигунами постійного струму здійснюється за допомогою широтно-імпульсного регулювання напруги (ШІР), що здійснюється шляхом зміни тривалості на півхвилі вихідного напруги [12].

Для створення сучасного, надійного, високоефективного електроприводу в даній роботі використовується транзисторний широтно-імпульсний перетворювач (ШІП). Транзисторні широтно-імпульсні перетворювачі володіють відносно малою потужністю, невеликою перевантажувальною здатністю по струму ( $2-2,5 \times I_{ном}$ ), але вони дозволяють досягти частоти імпульсів до 5 кГц.

В основу роботи транзисторного широтно-імпульсного перетворювача входить використання транзисторів в ключовому режимі, тобто транзистор починає пропускати струм при подачі керуючого сигналу і перестає пропускати струм при його відсутності.

Транзисторні широтно-імпульсні перетворювачі можна вважати ідеальними ланками з нескінченно малою інерційністю і майже нульовим внутрішнім опором.

Спрощена принципова схема такого перетворювача представлена на рис. 2.3. Вона містить чотири ключа ТК1 - ТК4 [10]. У діагональ моста, утвореного силовими ключами, включене навантаження. Навантаженням в приводах постійного струму є ланцюг якоря двигуна постійного струму.

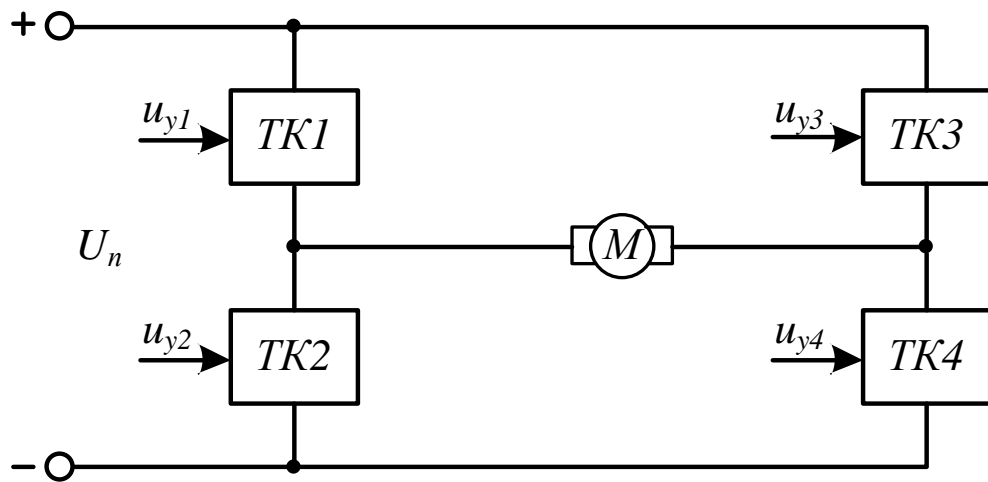


Рис. 2.3. Спрощена схема широтно-імпульсного перетворювача

Керування транзисторним перетворювачем може здійснюватися симетричним або несиметричним способом. Найбільш вживаним і простим способом можна назвати симетричний спосіб керування [1]. При такому керуванні всі транзисторні ключі моста знаходяться в стані перемикання, а напругою на виході широтно-імпульсного перетворювача є знакозмінні імпульси, період яких задається вхідним сигналом. При симетричному керуванні середня напруга якоря на виході ШПІ нульова. Струм при нульовій швидкості відмінний від нуля, тобто з точки зору енергоефективності система не дуже хороша [1]. Найчастіше симетричний спосіб керування застосовується для малопотужних приводів постійного струму [13].

Несиметричний спосіб керування є більш простим, так як в кожному такті включена тільки одна діагональ і відсутня можливість виникнення наскрізних струмів. Тобто в разі однієї полярності вхідного сигналу ключ TK1 постійно відкритий, ключ TK2 – закритий, а ключі фазної групи TK3 і TK4 – перемикаються. Щоб забезпечити протікання струму якоря від протидії ЕРС двигуна, транзисторні ключі TK3 і TK4 переключуються в протифазі [1]. Якщо полярність протилежна, то перемикаються ключі TK1 і TK2. На виході широтно-імпульсного перетворювача формується однополярна напруга, а середня напруга дорівнює нулю, коли відносна тривалість включення прямує до нуля. Регулювання швидкості можливо тільки коли працюють ключ TK1 і

ТК4, або коли працюють ключі ТК2 і ТК3, тому що при такому способі регулювання йде велике навантаження по струму на верхніх транзисторних ключів (ТК1 і ТК3) [1]. При малих моментах виникають зони переривчастих струмів і швидкість двигуна починає наближатись до швидкості холостого ходу [14].

## 2.4. Двигун

Електричний двигун (електродвигун) – електрична машина, за допомогою якої електрична енергія перетворюється в механічну, для приведення в рух різних механізмів. Електродвигун є основним елементом електроприводу. В даному маніпуляторі встановлені серводвигуни [16].

Серводвигун - це двигун, що обертається з датчиком зворотного зв'язку, який дозволяє точно контролювати кутове положення, швидкість і прискорення виконавчого механізму. До електродвигунів, які призначені для використання в сервомеханізмі, зазвичай висуваються жорсткі вимоги. Ключову роль при виборі двигуна грає його механічна характеристика, а так само параметри, що визначають динамічні характеристики, такі як індуктивність обмоток і момент інерції ротора.

По виду серводвигуни діляться на:

- асинхронні серводвигуни;
- синхронні серводвигуни;
- серводвигуни постійного струму;
- синхронні реактивні серводвигуни.

Найбільш поширеним в промисловості є асинхронний електродвигун. Основними перевагами асинхронного серводвигуна є простота конструкції, надійність, низька собівартість, високий термін служби, високий пусковий момент і перевантажувальна здатність. Відсутність необхідності використовувати окремий вузол для кріплення датчика зворотного зв'язку забезпечує компактні розміри. Малі габарити та вага дозволяють

використовувати такий двигун в динамічних системах. Недоліком асинхронного електродвигуна є складність регулювання частоти обертання.

Синхронні двигуни зазвичай використовуються в задачах, де потрібне точне керування швидкістю обертання, або де потрібно максимальне значення таких параметрів як потужність, коефіцієнт корисної дії та ін. Синхронні двигуни здатні задати швидкість обертання електродвигуна з великою точністю, так само як прискорення і кут повороту. Так само вони можуть швидко досягати номінальної швидкості обертання. Синхронні серводвигуни володіють високою швидкодією, добре поєднуються з імпульсними системами програмного керування та ідеальні для застосування в різних галузях промисловості.

В даному маніпуляторі встановлений серводвигун постійного струму незалежного збудження. Вони часто застосовуються в різних промислових системах, в яких необхідно здійснювати плавне регулювання швидкості обертання або витримувати постійність моменту.

Основна перевага двигунів постійного струму – це відносна легкість регулювання частоти обертання. Частоту обертання електродвигуна постійного струму можна регулювати трьома шляхами: зміною потоку збудження електродвигуна, зміною підводиться до електродвигуна напруги і зміною опору в ланцюзі якоря [15].

Найбільш широке застосування отримали перші два способи регулювання, третій спосіб застосовують рідко: він неекономічний, швидкість двигуна при цьому значно залежить від коливань навантаження.

ДПТ складається з трьох основних частин: статора з обмоткою збудження, ротора з якірної обмоткою і щітково-колекторного вузла, необхідного для підведення напруги до обмотки якоря. При цьому щітки нерухомі, а колектор жорстко пов'язаний з якорем.

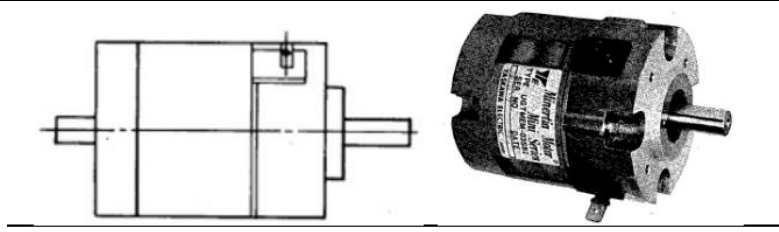
Двигуни незалежного збудження можуть бути розділені на двигуни з електромагнітним збудженням, коли обмотка збудження підключена до стороннього джерела постійного струму або на затискачі двигуна, і на двигуни

з магнітоелектричним збудженням, коли замість обмотки збудження використовуються постійні магніти.

Характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження, що використовується в даній роботі, представлені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Основні характеристики серводвигуна постійного струму незалежного збудження

Характеристика	Значення
Зовнішній вигляд	
Номінальний струм	5,5 А
Корисна потужність	0,095 кВт
Робоча напруга	до 26 В
Номінальна швидкість	4000 об/хв.
Ефективний обертальний момент	0,225 Н·м
Швидкодіючий максимальний момент	0,745 Н·м
Допустима інерція	$1,375 \cdot 10^{-4}$ кг·м <sup>2</sup>

Також їх застосовують в тих випадках, коли важливо, щоб робоча швидкість механізму залишалася приблизно постійною (як при холостому ході, так і навантаженні), адже при зміні навантаження на валу в широких межах вони мало змінюють свою швидкість обертання. Хоча принцип роботи двигуна постійного струму з незалежним збудженням є досить складним внаслідок незалежної роботи двох джерел, проте, його головна перевага – велика економічність.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

#### 3.1. Структурна схема електроприводу

Функціональна схема електроприводу роз'яснює процеси, що протікають в окремих функціональних частинах або в електроприводі в цілому. Ці схеми використовуються для вивчення принципів роботи електроприводу і його складових частин, а також при їх налагодженні, регулюванні, контролі та ремонті. На функціональній схемі зображуються функціональні частини електроприводу (елементи, пристрої, функціональні групи) і зв'язку між ними або конкретні електричні, магнітні і механічні з'єднання (проводи, обмотки, вати) [5]. Функціональні частини, як правило, зображують у вигляді умовних графічних позначень, а окремі з них допускається зображати прямокутниками. Зазвичай двигун, електромашинні перетворювачі, задатчики і датчики зворотних зв'язків зображують їх умовними позначеннями, а складні керовані перетворювачі і пристрої системи управління – прямокутниками. Всі функціональні частини повинні мати найменування, позначення або тип, які вписуються в прямокутники або поміщаються поруч із зображеннями.

Система керування електроприводом здійснюється через керування швидкістю, яка регулюється за рахунок зміни напруги на якорі двигуна. Напруга змінюється за допомогою транзисторного перетворювача при підпорядкованому контурі регулювання струму двигуна. Двигун з незалежним збудженням отримує живлення від транзисторного перетворювача [1].

На рис. 3.1 представлена функціональна схема електроприводу з такими основними елементами:

- регулятор струму, за допомогою якого можна автоматично підтримувати задану силу електричного струму в ланцюзі при зміні навантаження в електричному ланцюзі;

- регулятор швидкості, що призначений для регулювання швидкості під час керування електроприводом;
- транзисторний перетворювач, де відбувається перетворення вхідної напруги постійного струму одного номіналу в інший;
- двигун постійного струму, що перетворює електричну енергію постійного струму в механічну енергію;
- тахогенератор, який призначений для перетворення миттєвого значення частоти обертання валу в однозначно пов'язаний зі швидкістю електричний сигнал;
- датчик струму, який необхідний для вимірювання та контролю постійного струму.

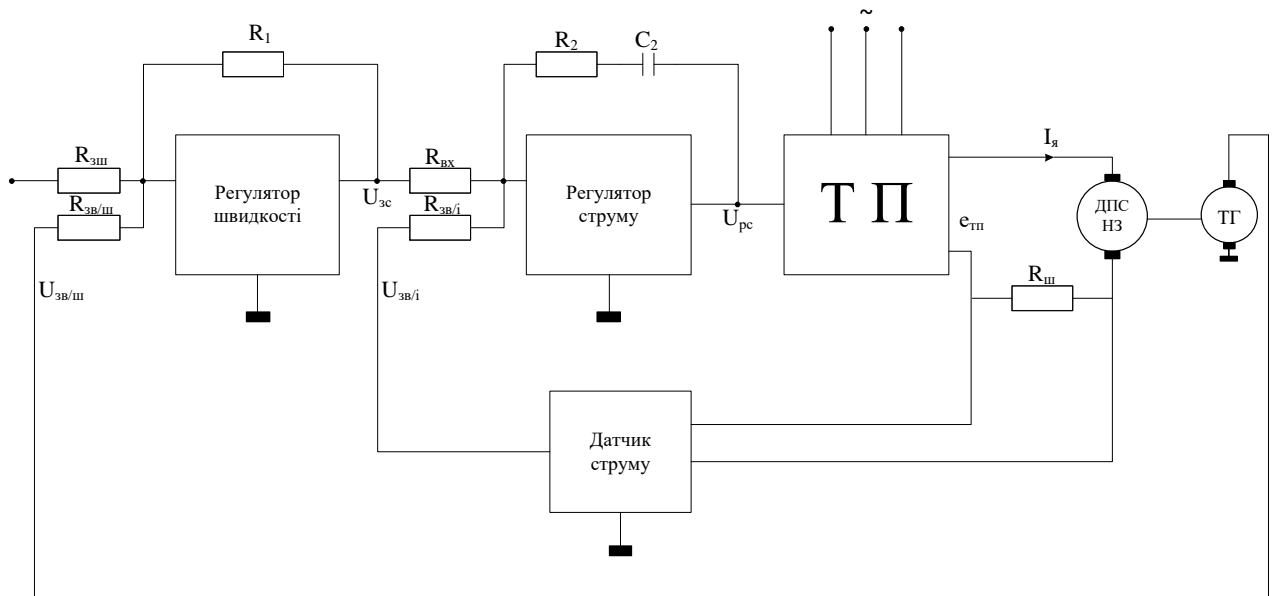


Рис. 3.1. Функціональна схема електроприводу маніпулятора

Система керування електроприводом містить два контури регулювання: внутрішній контур струму (КС) і зовнішній контур швидкості (КШ). Такий принцип полягає в тому, що для кожної з регульованих змінних – струму та швидкості, організовують свій контур регулювання, що містить об'єкт регулювання, регулятор і від'ємний зворотний зв'язок за регульованою координатою [1]. Регулятори контурів з'єднують послідовно, причому вихідний



сигнал регулятора зовнішнього контуру є заданням для внутрішнього контуру. У даній системі електроприводу внутрішнім контуром є контур струму. Задання на струм виробляє регулятор швидкості.

Контур струму включає силову частину електроприводу з виходом по струму якоря, ланцюг від'ємного зворотного зв'язку по струму якоря  $I_{\text{я}}$  і регулятор струму (РС) якоря пропорційно-інтегрального типу.

На вхід РС, через резистор  $R_{\text{вх}}$  подається сигнал задання струму якоря  $U_{\text{зс}}$ , а через резистор  $R_{\text{зв/і}}$  – сигнал від'ємного зворотного зв'язку  $U_{\text{зв/і}}$  по струму якоря двигуна від датчика струму [1].

Регулятор струму призначений для перетворення струму якоря в пропорційну йому напругу зворотного зв'язку по струму  $U_{\text{зв/і}}$ . Вихідна напруга регулятора струму подана на систему керування транзисторного перетворювача, який забезпечує живленням двигун постійного струму.

Контур швидкості двигуна включає в себе замкнутий контур струму, ланцюг від'ємного зворотного зв'язку по швидкості двигуна і регулятор швидкості (РШ). На вхід РШ, через резистор  $R_{\text{зш}}$  подається сигнал задання швидкості  $U_{\text{зш}}$ , а через резистор  $R_{\text{зв/ш}}$  – сигнал від'ємного зворотного зв'язку  $U_{\text{зв/ш}}$  по швидкості двигуна. Датчиком швидкості є тахогенератор (ТГ). Задаючий пристрій формує бажаний закон зміни швидкості електроприводу.

Структурна схема визначає основні функціональні частини електроприводу (елементи, пристрої і функціональні групи), в які об'єднуються окремі електротехнічні пристрої, їх призначення і взаємозв'язки. Вона розробляється на стадії проектування і використовується для загального ознайомлення з електроприводом [3]. Стрілками відзначаються напрямки сигналів управління, зворотних зв'язків і параметрів електроприводу. Найменування функціональних частин вказуються всередині блоків і поза ними. Функціональні частини зображуються у вигляді прямокутників або умовних графічних позначень, з'єднаних лініями зв'язків, що визначають їх взаємозв'язок. На лініях вказуються позначення параметрів системи.

Структурна схема електроприводу, яка відповідає функціональній схемі, представлена на рис. 3.2.

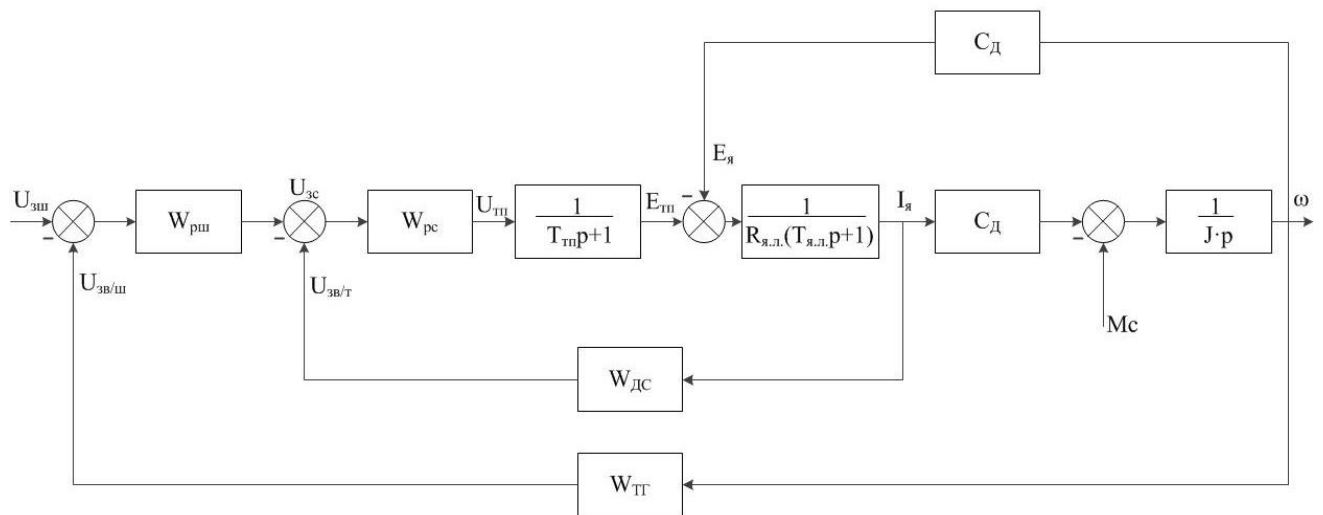


Рис. 3.2. Структурна схема електроприводу

На структурній схемі (рис. 3.2) транзисторний перетворювач представлений аперіодичною ланкою зі сталою часу  $T_{П}$ .

Під час налаштування системи керування вважатимемо, що струм якоря безперервний, а входні впливи досить малі. Тому при розгляді структурної схеми системи можна скористатися лінеаризованим описом двигуна і вважати, що вихідні напруги регулятора швидкості, а, отже, і струм якоря не обмежуються. Також припустимо, що момент інерції, приведений до валу двигуна постійний, а інерційність датчиків струму і швидкості не враховуються, оскільки вони дуже малі.

### 3.2. Розрахунок контуру струму

Контур регулювання струму призначений для обмеження струму якоря при перевантаженнях, а так само для корекції зовнішнього контуру регулювання швидкості. Він включає в себе силову частину електроприводу з виходом по струму якоря  $I_{я}$ , ланцюг від'ємного зворотного зв'язку по струму якоря і регулятор струму якоря (РС) (рис. 3.3). На вході РС порівнюються напруга задання струму якоря  $U_{зс}$  і напруга зворотного зв'язку  $U_{зв/і}$ , що

надходить з датчика струму. На вхід датчика струму подається напруга шунта, що пропорційна струму якірного ланцюга двигуна.

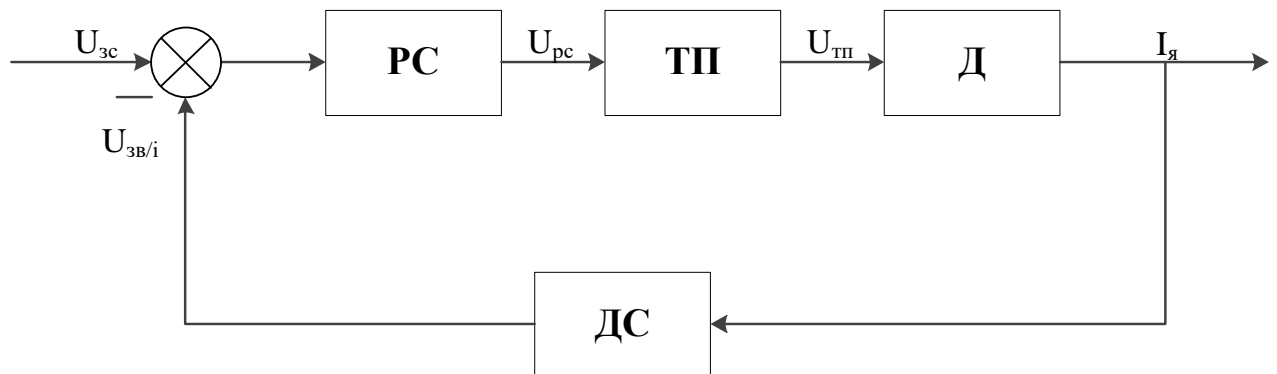


Рис. 3.3. Функціональна схема підпорядкованого контуру струму електроприводу

Основними вимогами до роботи контуру струму є максимальна швидкодія, мале перерегулювання (не більше 10%), а також в електроприводах великої потужності накладається обмеження на максимальне значення швидкості зміни струму якоря.

### 3.2.1. Визначення передавальної функції двигуна постійного струму

Передавальна функція (ПФ) двигуна постійного струму незалежного збудження визначається за формулою:

$$W_{\partial} = \frac{1}{[R_{я.л.}(T_{я.л.}p + 1)]}, \quad (3.1)$$

де  $R_{я.л.}$  – опір якірного ланцюга;

$T_{я.л.}$  – постійна часу якірного ланцюга.

Опір якірного ланцюга і постійна часу якірного ланцюга мають вигляд:

$$R_{я.л.} = \frac{U}{I} = \frac{26}{5,5} = 4,73 \text{ Ом},$$

$$T_{я.л.} = \frac{L_{я.л.}}{R_{я.л.}} \text{ Гн},$$

де  $L_{я.л.}$  – індуктивність якірного ланцюга двигуна постійного струму незалежного збудження.

$$L_{я.л.} = K_L \frac{U_n}{I_n p_n \omega_n} \text{ Гн},$$

де  $K_L$  – конструктивний коефіцієнт, який для компенсованих машин рівний від 0,1 до 0,25, а для некомпенсованих – від 0,5 до 0,6;

$U_n, I_n, \omega_n$  – номінальні напруга, струм якоря і кутова швидкість двигуна;

$p_n$  – число пар полюсів.

$$\omega_n = \frac{pn_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 4000}{30} = 418,67 \text{ рад/с},$$

$$L_{я.л.} = 0,6 \frac{26}{5,5 \cdot 418,67 \cdot 1} = 0,0067 \text{ Гн},$$

$$T_{я.л.} = \frac{0,0067}{4,73} = 0,0014 \text{ с}.$$

Підставимо в формулу (3.1) значення  $R_{я.л.}$  і  $T_{я.л.}$  та отримаємо:

$$W_d = \frac{1}{0,0067 p + 4,73}.$$

### 3.2.2. Визначення передавальної функції транзисторного перетворювача

Для визначення передавальної функції транзисторного перетворювача (ТП), необхідно визначити передавальний коефіцієнт транзисторного перетворювача і постійну часу ТП [1].

Передавальний коефіцієнт ТП дорівнює:

$$k_{TP} = \frac{I}{U} = \frac{5,5}{26} = 0,21.$$

Постійна часу ТП:

$$T_{\text{III}} = \frac{1}{2mf} \text{ с,}$$

де  $f$  – частота мережі живлення;

$m$  – число пульсацій випрямленої напруги.

$$T_{\text{III}} = \frac{1}{2 \cdot 6 \cdot 50} = 0,0067.$$

Передавальна функція ТП має вигляд:

$$W_{\text{ТП}} = \frac{k_{\text{ТП}}}{(T_{\text{ТП}}p + 1)} = \frac{0,21}{0,0067p + 1}.$$

### 3.2.3. Визначення передавальної функції датчика струму

Передавальна функція датчика струму визначається за формулою:

$$W_{\text{ДС}} = \frac{k_{\text{ДС}}}{(T_{\text{ДС}}p + 1)}, \quad (3.2)$$

де  $k_{\text{ДС}}$  – коефіцієнт передачі датчика струму;

$T_{\text{ДС}}$  – постійна часу датчика струму.

Визначимо коефіцієнт датчика струму за формулою:

$$k_{\text{ДС}} = \frac{U_{\text{вих}}}{I_{\text{я}}},$$

де вихідна напруга:

$$U_{\text{вих}} = IR = 25 \cdot 10^{-3} \cdot 54 = 1,35 \text{ В,}$$

Тоді:

$$k_{\text{ДС}} = \frac{1,35}{5,5} = 0,25 \text{ Ом.}$$

Підставивши значення в формулу (3.2), отримаємо:

$$W_{\text{ДТ}} = \frac{0,25}{1 \cdot 10^{-6}p + 1}.$$

Так як постійна часу датчика струму мала нею можна знехтувати, тоді ПФ має вигляд:

$$W_{дт} = 0,25.$$

### 3.2.4. Визначення передавальної функції регулятора контуру струму

Для корекції контуру струму необхідно розрахувати коефіцієнти регулятора, за умови забезпечення оптимального або близького до оптимального перехідного процесу. Налаштування коефіцієнтів регулятора будемо проводити за допомогою модульного оптимуму (МО).

Модульний оптимум забезпечує широку смугу пропускання, обмежену характеристиками регулятора і пропускну здатністю датчиків і перетворювачів [1]. Оптимізація на максимум смуги пропускання також є і оптимізацією за швидкодією, тобто чим ширше смуга пропускання, тим менше необхідно часу для протікання перехідного процесу [9].

Таке налаштування використовується для багатоконтурних систем керування з підпорядкованим регулюванням, коли один з регуляторів виробляє задаючі впливи для другого, який стоїть у внутрішньому контурі. При цьому кожен контур налаштовується індивідуально і параметри регулятора визначаються оптимізацією кожного контуру [1].

Налаштування контуру регулювання для отримання заданих динамічних і статичних характеристик зводиться до визначення структури і параметрів контурного регулятора. Регулятор будується таким чином, щоб він виконував такі дії:

- компенсував дію (і перш за все прояв інерційності) ланки об'єкта регулювання, що потрапляє в даний контур;
- забезпечував астатизм системи по керуючому впливу (тобто рівність нулю встановленої помилки при певному типі керуючого впливу).

Для того, щоб забезпечити налаштування контуру регулювання струму на модульний оптимум, необхідно, щоб передавальна функція розімкненого контуру регулювання струму відповідала передавальній функції розімкненого

контур регулювання струму, налаштованого на МО, тобто, щоб виконувалась рівність:

$$W_{розi}(p) = W_{розМОi}(p),$$

де  $W_{розМОi} = \frac{1}{2T_{ТП}p(T_{ТП} + 1) + 1}$  – передавальна функція розімкненого контуру регулювання з одиничним зворотним зв'язком, налаштованого на модульний оптимум.

Для налаштування коефіцієнтів регулятора визначимо передавальну функцію розімкненого контуру струму [1]:

$$W(p) = W_p(p)W_H(p), \quad (3.3)$$

де  $W_p(p)$  – передавальна функція регулятора;

$W_H(p)$  – передавальна функція незмінної частини системи.

Передавальна функція незмінної частини системи складається з об'єкта управління, перетворювача і датчика струму:

$$W_H = \frac{1}{[R_{я.л.}(T_{я.л.} + 1)]} \frac{k_{ТП}}{(T_{ТП}p + 1)} \frac{k_{ДС}}{(T_{ДС}p + 1)}.$$

Робимо налаштування на модульний оптимум:

$$W_I(p) = W_I^{ОПТ}(p)A(p), \quad (3.4)$$

де  $A(p)$  – співмножник, що відображає вплив зворотного зв'язку по ЕРС.

Передавальна функція контуру струму налаштованого на МО при нехтуванні зворотного зв'язку по ЕРС має вигляд:

$$W_I^{ОПТ} = \frac{1}{2T_{\mu I}p(T_{ТП}p + 1)(T_{ДС}p + 1)}.$$

При розгляді динаміки системи підпорядкованого регулювання часто нехтують впливом зв'язком по ЕРС. Це можна пояснити тим, що контур струму, як будь-яка замкнена система прагне відтворити на виході вхідний сигнал, який в даному випадку є напругою регулятора швидкості. Зміна ЕРС, що виникає через зміну швидкості двигуна, є для нього збуренням і призводить до зміни струму якоря від значення, яке задано вхідним сигналом. Якщо

електромеханічна стала часу  $T_{EM}$  має велике значення, швидкість змінюється повільно, а швидкодія контуру струму визначається частотою зрізу ЛАЧХ, яка дорівнює  $1/(2T_{\mu I})$ ,  $T_{\mu I}$  де – мала постійна часу контуру струму, велика, то струм якоря змінюється відповідно до зміни швидкості незалежно від дії ЕРС.

Електромеханічна стала часу дорівнює:

$$T_{EM} = \frac{JR_{я.л.}}{(c'_D)^2}, \quad (3.5)$$

де  $c'_D = c_D \Phi = c_D \Phi_H$ .

Визначимо конструктивний коефіцієнт двигуна за формулою:

$$c_D = \frac{M_H}{I_H} = \frac{0,225}{5,5} = 0,04 \text{ (В}\cdot\text{с)/рад.}$$

Розрахуємо магнітний потік:

$$\Phi = LI = 0,0067 \cdot 5,5 = 0,03685 \text{ Вб.}$$

Тоді:

$$c'_D = 0,04 \cdot 0,03685 = 0,00147 \text{ Вб}\cdot\text{В}\cdot\text{с.}$$

Підставивши значення в формулу (3.5), отримаємо:

$$T_{EM} = \frac{1,375 \cdot 10^{-4} \cdot 4,73}{(0,00147)^2} = 300,97 \text{ с.}$$

Мала стала часу контуру струму дорівнює:

$$T_{\mu I} = T_{TP} + T_{DC} = 0,0067 \text{ с.}$$

Зворотним зв'язком по ЕРС можна знехтувати, якщо виконується умова  $T_{EM} > 10 \cdot 2T_{\mu I}$ . При цій умові частотні характеристики, відповідні передавальним функціям (3.3) і (3.4), практично не відрізняються.

Для налаштування контуру регулювання якорного струму на МО необхідно, щоб передавальна функція розімкненого контуру регулювання струму дорівнювала передавальній функції розімкненої системи, налаштованої на МО. Тоді передавальна функція регулятора буде дорівнювати:



$$W_p(p) = \frac{R_{я.л.}(T_{я.л.}p + 1)(T_{ТП}p + 1)}{2T_{ТП}p(T_{ТП}p + 1)k_{ТП}k_{ДС}}. \quad (3.6)$$

Перетворивши вираз (3.6), отримаємо:

$$W_p(p) = \frac{R_{я.л.}(T_{я.л.}p + 1)}{2T_{ТП}pk_{ТП}k_{ДС}} = \frac{4,73(0,0014p + 1)}{2 \cdot 0,0067p \cdot 0,21 \cdot 0,25} = \frac{0,0066p + 4,73}{0,0007p}.$$

На рис. 3.4 представлена структурна схема контуру струму.

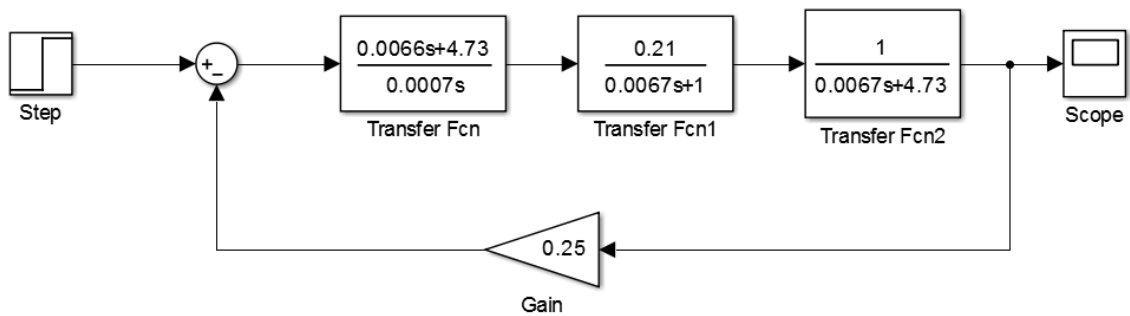


Рис. 3.4. Структурна схема контуру струму електроприводу

Перехідна характеристика контуру струму по керуючому впливу представлена на рис. 3.5.

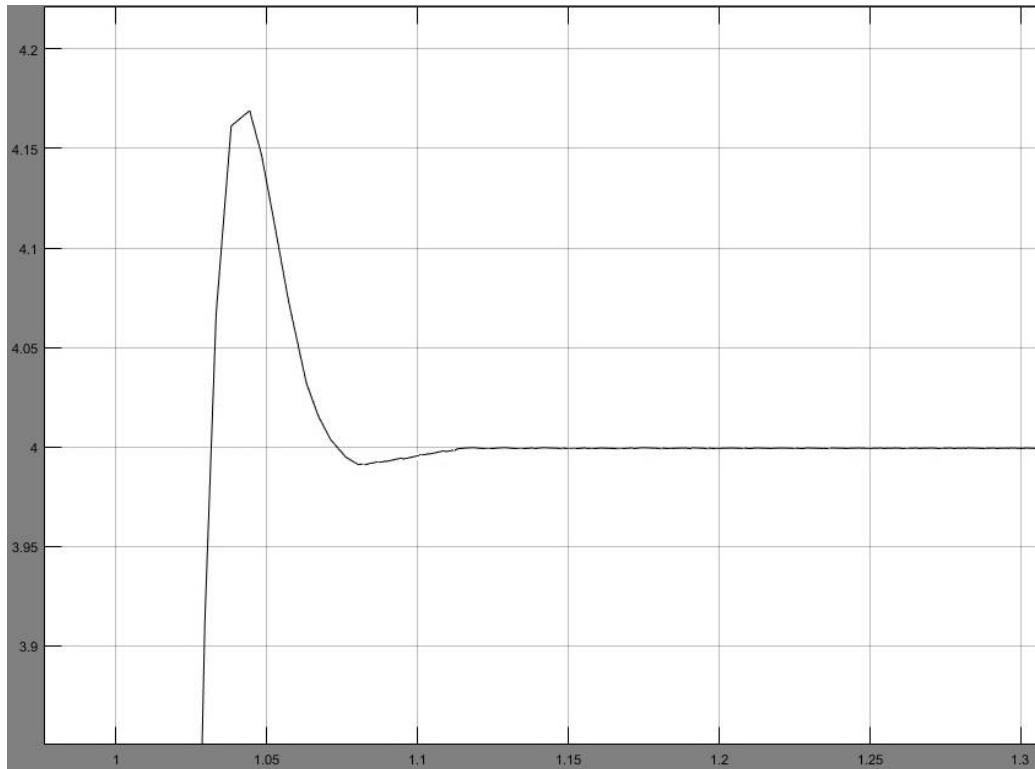


Рис. 3.5. Перехідна характеристика контуру струму по керуючому впливу

Якість процесу регулювання можна визначити візуально по графіку перехідної характеристики, що представляє собою реакцію системи на зовнішні впливи. В даному випадку зовнішнім впливом є одиничний стрибок.

По перехідній характеристиці контуру струму по керуючому впливу (рис. 3.5) можна визначити працездатність системи, тобто перерегулювання – це максимальне відхилення регульованої величини від значення, що встановилось, яке виражається у відсотках [1]. При великому перерегулюванні відбудеться великий стрибок напруги, що призведе до виходу з ладу системи. Для більшості систем перерегулювання до 10% вважається нормою. В даному випадку значення перерегулювання не перебільшує допустиме і складає 4,2%.

### 3.3. Розрахунок контуру швидкості

Контур швидкості включає в себе замкнений контур струму, ланцюг від'ємного зворотного зв'язку по швидкості двигуна і регулятор швидкості (РШ) (рис. 3.6) [1]. На вході РШ порівнюються напруга задання швидкості  $U_{зш}$ , що подається з виходу задаючого пристрою і напруга зворотного зв'язку  $U_{зв/ш}$  за швидкістю двигуна, що надходить від датчика швидкості.

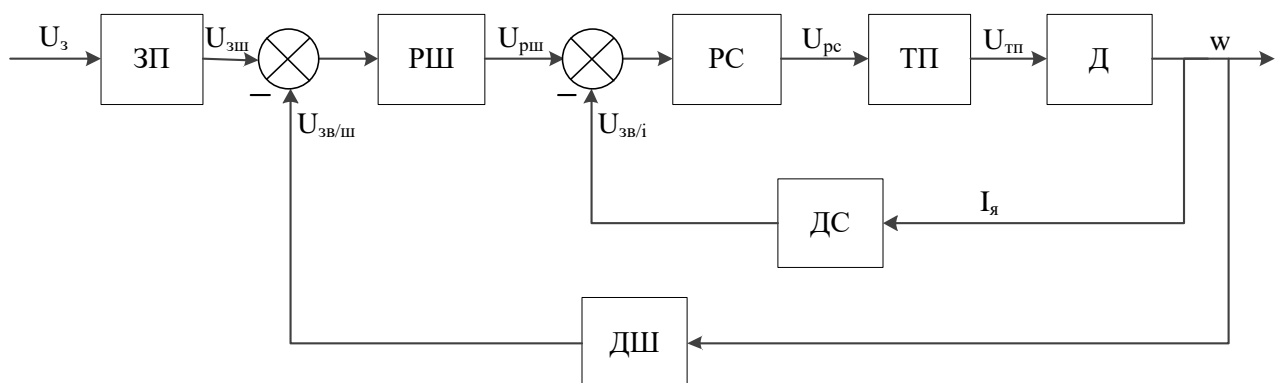


Рис. 3.6. Функціональна схема контуру швидкості електроприводу

Для розрахунку контуру швидкості замінимо контур струму аперіодичною ланкою:

$$W_I(p) = \frac{1}{k_{ДС}} \frac{1}{T_{Ie} p + 1}, \quad (3.7)$$

де  $T_{Ie}$  – еквівалентна постійна часу контуру струму, рівна

$$T_{Ie} = 2T_{\mu I} = 2 \cdot 0,0067 = 0,0134 \text{ с.}$$

Підставимо значення в (3.7) та отримаємо:

$$W_I(p) = \frac{4}{0,0134 p + 1}.$$

Швидкість двигуна пов'язана з керуючим впливом передавальної функції, відповідної інтегруючій ланці:

$$W_J(p) = \frac{1}{Jp},$$

де  $J$  – це приведений до валу двигуна сумарний момент інерції.

$$W_J(p) = \frac{1}{0,0001375 p}.$$

### 3.3.1. Визначення передавальної функції датчика швидкості

Визначимо передавальну функцію датчика швидкості:

$$W_{ДШ}(p) = \frac{k_{ДШ}}{T_{ДШ} p + 1},$$

де  $k_{ДШ}$  – коефіцієнт передачі датчика швидкості;

$T_{ДШ}$  – постійна часу фільтра тахогенератора.

Передавальний коефіцієнт датчика швидкості дорівнює:

$$k_{ДШ} = \frac{U_{ДШ}}{w}.$$

Визначимо кутову швидкість за формулою:

$$w = \frac{\pi n}{30}, \quad (3.8)$$

де швидкість дорівнює:

$$n = \frac{f}{N} \cdot 60 = \frac{50 \cdot 10^3 \cdot 60}{500} = 6000 \text{ об/хв.}$$

Підставимо значення швидкості в формулу (3.8) та отримаємо:

$$w = \frac{3,14 \cdot 6000}{30} = 628 \text{ рад/с.}$$

Передавальний коефіцієнт датчика швидкості дорівнює:

$$k_{ДШ} = \frac{12}{628} = 0,019 \text{ (В} \cdot \text{с)/рад.}$$

Так як  $T_{ДШ}$  дуже мала, нею можна знехтувати. Тоді передавальна функція буде мати вигляд:

$$W_{ДШ} = k_{ДШ} = 0,019.$$

### 3.3.2. Визначення передавальної функції регулятора контуру швидкості

Для корекції контуру швидкості необхідно розрахувати коефіцієнти регулятора, за умови забезпечення оптимального або близького до оптимального перехідного процесу. Налаштування коефіцієнтів регулятора будемо проводити за допомогою модульного оптимуму (МО).

Модульний оптимум забезпечує широку смугу пропускання, обмежену характеристиками регулятора і пропускну здатністю датчиків і перетворювачів. Оптимізація на максимум смуги пропускання також є і оптимізацією за швидкодією, тобто чим ширше смуга пропускання, тим менше необхідно часу для протікання перехідного процесу [1].

Таке налаштування використовується для багатоконтурних систем керування з підпорядкованим регулюванням, коли один з регуляторів виробляє задаючі впливи для другого, який стоїть у внутрішньому контурі. При цьому

кожен контур налаштовується індивідуально і параметри регулятора визначаються оптимізацією кожного контуру.

Налаштування контуру регулювання для отримання заданих динамічних і статичних характеристик зводиться до визначення структури і параметрів контурного регулятора. Регулятор будується таким чином, щоб він виконував такі дії:

- компенсував дію (і перш за все прояв інерційності) ланки об'єкта регулювання, що потрапляє в даний контур;
- забезпечував астатизм системи по керуючому впливу (тобто рівність нулю встановленої помилки при певному типі керуючого впливу).

Для того, щоб забезпечити налаштування контуру регулювання швидкості на модульний оптимум, необхідно, щоб передавальна функція розімкненого контуру регулювання швидкості відповідала передавальній функції розімкненого контуру регулювання швидкості, налаштованого на МО, тобто, щоб виконувалась рівність:

$$W_{розv}(p) = W_{розMOv}(p),$$

де  $W_{розMOv} = \frac{1}{2T_{\mu w}p(T_{ДШ} + 1) + 1}$  – передавальна функція розімкненого контуру

регулювання з одиничним зворотнім зв'язком, налаштованого на модульний оптимум.

Налаштування ПФ контуру швидкості на ОМ має вигляд:

$$W_{ОПГ}(p) = \frac{1}{2T_{\mu w}p(T_{ДШ}p + 1)(T_{Ie}p + 1)},$$

де  $T_{\mu w}$  – сумарна мала постійна часу контуру швидкості, яка дорівнює:

$$T_{\mu w} = T_{ДШ} + T_{Ie} = 1 \cdot 10^{-6} + 0,0134 = 0,0134.$$

Незмінна частина контуру швидкості має вигляд:

$$W_{Hw}(p) = \frac{R_C}{R_{3C}} \frac{1}{k_{ДС}} \frac{1}{T_{Ie}p + 1} \frac{k_{ДШ}}{T_{ДШ}p + 1} \frac{c'_D}{Jp},$$

де  $R_{3C}$  – вхідний опір задає значення струму;

$R_C$  – опір каналу зворотного зв'язку по струму.

Коефіцієнт  $\frac{R_C}{R_{3C}}$  враховує відмінність коефіцієнтів передачі регулятора

швидкості по каналу задання швидкості і каналу зворотного зв'язку.

Визначимо передавальну функцію регулятора швидкості:

$$W_{pU}(p) = \frac{k_{ДС}(T_{Ie}p + 1)(T_{ДШ}p + 1)Jp}{2T_{mw}p(T_{Ie}p + 1)k_{ДШ}c'_Д}$$

Після перетворення отримаємо:

$$W_{pU}(p) = \frac{k_{ДС}J}{2T_{mw}k_{ДШ}c'_Д} = \frac{0,25 \cdot 1,375 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,0134 \cdot 0,019 \cdot 0,00147} = 45,9.$$

Структурна схема контуру швидкості представлена на рис. 3.7.

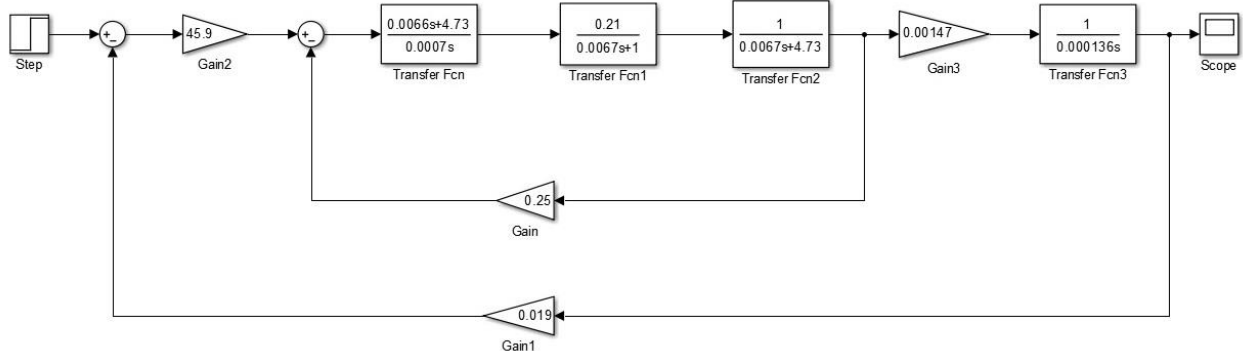


Рис. 3.7. Структурна схема контуру швидкості

Перехідна характеристика представляє собою реакцію системи на зовнішні впливи, яким в даному випадку є одиничний стрибок, і дає змогу оцінити якість процесу регулювання [1].

Перехідна характеристика контуру швидкості по керуючому впливу представлена на рис. 3.8.

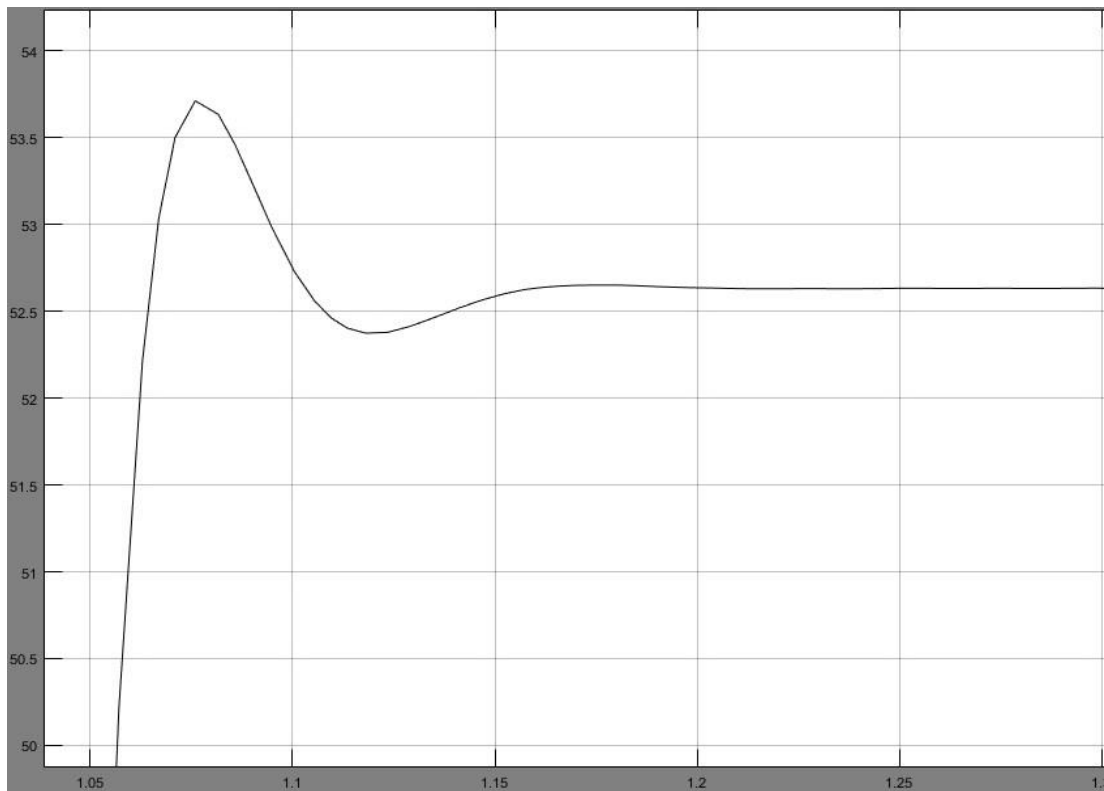


Рис. 3.8. Перехідна характеристика контуру швидкості по керуючому впливу

За допомогою перехідної характеристики контуру швидкості по керуючому впливу (рис. 3.8) визначимо працездатність системи, тобто перерегулювання – це максимальне відхилення регульованої величини від значення, що встановилось, яке виражається у відсотках. Для більшості систем допустимим вважається перерегулювання, значення якого не перевищує 5%, тому що при великому перерегулюванні відбудеться великий стрибок напруги, що може призвести до виходу системи з ладу. В даному випадку значення перерегулювання не перебільшує допустиме і складає 2%.

## ВИСНОВКИ

В даній дипломній роботі була розроблена система керування електроприводом маніпулятора, яка дає змогу керувати першою ланкою робота. Основною метою проведеної роботи була розробка системи керування електроприводом маніпулятора для його реалізації та подальшого використання в реальному часі для досягнення поставлених перед ним цілей.

В ході виконання роботи було проаналізовано вже існуючі системи керування електроприводами маніпуляторів та проведено аналіз приводів, які можуть бути використані в такій системі. Було підібрано елементну базу електроприводу : датчики струму та швидкості, транзисторний перетворювач та двигун постійного струму незалежного збудження. Також було проведено розрахунок контурів струму та швидкості для забезпечення належного функціонування системи, проведено налаштування регулятора струму та регулятора швидкості на модульний оптимум, а також імітаційне моделювання контурів струму та швидкості.

Було проведено аналіз небезпечних та шкідливих факторів, що впливають на суб'єкта під час роботи з електропривідним роботом-маніпулятором. За зібраною статистичною інформацією однією з головних причин електротравматизму є ураження струмом, тому були розглянуті основні групи заходів профілактики уникнення травматизму. Було проведено розрахунок заземлення для ділянки, на якій знаходиться електроустаткування.

Також під час написання роботи було розглянуто проблеми та шкідливі фактори, які мають негативний вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини.

Розроблена система повністю відповідає вимогам технічного завдання на дипломну роботу та може бути використана на підприємствах і в освітніх закладах, для отримання студентами практичного досвіду роботи з маніпулятором та закріплення теоретичних знань.



## СПИСОК БІБЛЮГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Іваницька В.І. «Система керування електроприводом маніпулятора» : дипломний проект на здобуття освітнього ступеню «Бакалавр» зі спеціальності 151«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 2019р. – 46 с.
2. Пістун Є. П. Основи автоматики та автоматизації: навч. посіб. / Є. П. Пістун, І. Д. Стасюк; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів : Вид-во Нац. Ун-ту "Львів. політехніка", 2014. – 333 с.
3. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учеб. пособие. / М.П. Белов , В.А. Новиков , Л.Н. Рассудов – М. : Академия, 2007. – 576 с.
4. Ніколайчук В. М. Основи робототехніки : навч. посіб. / В.М. Ніколайчук. – Рівне : НУВГП, 2008. – 76 с.
5. Система керування електроприводом [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ukrdoc.com.ua/text/19064/index-1.html> (дата звернення 07.10.2020)
6. Проць Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: Навчальний посібник./ Я. І. Проць – Тернопіль : Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. – 232 с.
7. Безвесільна О.М. Автоматизований електропривод : підр. / О.М. Безвесільна, І.В. Коробійчук, Г.С. Тимчик. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – 452 с.
8. Приводи промислових роботів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://studopedia.su/5\\_38569\\_privodi-promislovih-robotiv.html](https://studopedia.su/5_38569_privodi-promislovih-robotiv.html) (дата звернення 13.10.2020)
9. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков І.Б. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навчальний посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, І.Б. Клепиков ; за ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. – К. : «Либідь». – 2005. – 680 с.

10. Каталог FW Bell // Allied Electronics. [Електронний ресурс]. – 2016. Режим доступу : <http://www.alliedelec.com/m/d/ab8457abe0993678032fe3f2ea5c1be6.pdf> (дата звернення: 20.10.2020).

11. Деревенець А.О. Особливості використання датчиків Холла для вимірювання електричних величин / Деревенець А.О., к.т.н. Тугай С.Б. // Матеріали XI-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ. [Електронний ресурс]. – 2017р. Режим доступу : <http://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/conferences/2017/2017-094-097.pdf> (дата звернення 16.10.2020)

12. Герман-Галкин С. Г. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями / Герман-Галкин С. Г., Лебедев В. Д., Марков Б. А., Чичерин Н. И.. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.

13. Транзисторні широтно-імпульсні перетворювачі для керування двигунами постійного струму [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://stud.com.ua/165325/informatika/tranzistorni\\_shirotno\\_impulsni\\_peretvoryuva\\_chi\\_keruvannya\\_dvigunami\\_postiynogo\\_strumu](https://stud.com.ua/165325/informatika/tranzistorni_shirotno_impulsni_peretvoryuva_chi_keruvannya_dvigunami_postiynogo_strumu) (дата звернення 26.10.2020)

14. Транзисторні перетворювачі напруги постійного струму [Електронний ресурс]. – 2018. Режим доступу : [https://life-prog.ru/ukr/1\\_822\\_tranzistorni-peretvoryuvachi-naprugi-postiynogo-strumu.html](https://life-prog.ru/ukr/1_822_tranzistorni-peretvoryuvachi-naprugi-postiynogo-strumu.html) (дата звернення 27.10.2020)

15. D.-J. Kim, R. Hazlett, H. Assistive Robotics [Electronic resource]. – Access mode : <http://eecs.ucf.edu/> (lastaccess 02.11.2020)

16. Загірняк М.В. Електричні машини : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.

17. Винокурова Л.Б., М.В. Васильчик, М.В. Гаман «Основи охорони праці», К. «Факт» 2005р. Жидецький В.П., Джигирей В.С., Мельников О.В. Основи охорони праці. Навч. посібник. – Львів : Афіша, 2000.

18. Правила улаштування електроустановок : ПУЕ-2017. – На заміну ПУЕ-86 ; чинний з 2017-08-21. – К. : Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.

19. Інструкція з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://osvita-docs.com/node/337> (дата звернення: 18.11.2020).

20. Правила пожежної безпеки в Україні : НАПБ А.01.001-14. – На заміну НАПБ А.01.001-04; чинний від 2014-12-30. – К. : МВС України, 2014. – 47 с. – (Нормативний акт пожежної безпеки).

21. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми параметрів мікроклімату у виробничих приміщеннях. – К.: МОЗ України, 2000.

22. Кузнєцова, А. Д. Економічна ефективність впровадження роботів-маніпуляторів в промислове виробництво в розвинених країнах / А. Д. Кузнєцова. // Молодий вчений. - 2019. - № 40 (278). - С. 58-60. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://moluch.ru/archive/278/62770/> (дата звернення: 29.10.2020).

23. Вплив електромагнітних полів на людину [Електронний ресурс]. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <http://zakinppo.org.ua/> (дата звернення: 28.11.2020).

24. Серіков Я.О. Промислова безпека та соціальний захист працівників виробничих підприємств, компаній і корпорацій. Навч. посіб. Харків. ХНУМГ – корпорація ШЕЛЛ. 2015. – 247 с.

25. Зеркалов Д. В. Екологічна безпека : управління, моніторинг, контроль / Д. В. Зеркалов. – К. : КНТ, Дакор, Основа, 2007. – 412 с.