

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри


«02»/червня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

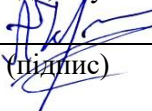
на тему: Комп'ютеризована система керування приводами
промислового маніпулятора

Виконав: студент 4341 групи


(підпис) **Пальмін Ф.Є.**

Керівник роботи:

зав. каф. КСУ, д.т.н., професор
(посада, науковий ступінь, вчене звання)


(підпис) **Черно О.О.**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра	<u>комп'ютеризованих систем управління</u>
Рівень вищої освіти	<u>перший (бакалаврський)</u>
Спеціальність	<u>174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»</u>
ООП	<u>«Комп'ютеризовані системи управління та автоматика»</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ
Гарант освітньої програми
 **Черно О.О.**
«03» лютого 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

Студенту Пальміну Федору Євгеновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Комп'ютеризована система керування приводами промислового маніпулятора
Керівник роботи Черно Олександр Олександрович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом вищого навчального закладу № УЧ-343 від «23» квітня 2025 року

2. Термін подання роботи: 02.06.2025 р.

3. Вихідні дані по роботі: Технічні характеристики робота МП-11, точність позиціонування – 0,1 мм, час підйому (опускання) рук при максимальній величині переміщення – 0,4 с, рук у горизонтальній площині при максимальному куті повороту – 0,5 с, час висунення (втягування) рук при максимальній величині переміщення – 0,2 с.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)
Аналіз принципу побудови, компонування, основні технічні характеристики гнучкого виробничого модуля.
Розрахунок і вибір електрообладнання, розробка функціональної та принципової схеми системи керування роботом.
Моделювання динаміки системи керування електроприводами обраного робота та визначення параметрів цифрових регуляторів.
Охорона праці.

5. Перелік презентаційних матеріалів (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Основні технічні характеристики промислового робота МП-11.
Схема робота МП-11.
Схема керування промислового робота МП-11.
Електрична схема СУ електроприводом робота МП-11.
Структурна схема СУ електроприводом робота МП-11.
Моделювання перехідних процесів у системі керування вертикальним переміщенням схвату.

Моделювання перехідних процесів у системі керування кутовим переміщенням маніпулятора.

Моделювання перехідних процесів у системі керування горизонтальним переміщенням маніпулятора.

Характеристики розробленого керованого електроприводами у порівнянні з пневмоприводом.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Черно О.О., зав. каф. КСУ	03.02.2025	02.06.2025

7. Дата видачі завдання: «03» лютого 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів проектування	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Основні технічні характеристики, принципи побудування й компоновки робота-маніпулятора і постановка задач проектування.	26.02.2025	Виконано
2.	Розрахунок і вибір електрообладнання, розробка функціональної та принципової електричної схеми системи керування роботом.	03.04.2025	Виконано
3.	Моделювання динаміки системи керування електроприводами робота МП-11 та визначення параметрів цифрових регуляторів.	14.05.2025	Виконано
4.	Охорона праці.	02.06.2025	Виконано

Студент


(підпис)

Пальмін Ф.Є.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Черно О.О.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній роботі досліджується заміна пневматичних приводів на безколекторні постійнострумові двигуни (БДПС) у виробничому роботі МП-11. Для моделювання електроприводів окремих ланок робота застосовувалися середовища MATLAB та Simulink.

У роботі виконано: огляд сучасних виробничих роботів, їх конфігурацій та типових рішень; детальний аналіз конструкції та принципів роботи МП-11; обґрунтований вибір безколекторного двигуна; розрахунок основного електрообладнання; розробку функціональної та принципової схем системи керування роботом. Також проведено аналіз питань з організації охорони праці при експлуатації електроустановок та захисту оператора від потенційних небезпек.

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи складається з 70 сторінок, 27 рисунків, 8 таблиць та 19 інформаційних джерел.

Ключові слова: комп'ютеризована система керування, промисловий маніпулятор, електропривод, безколекторний двигун постійного струму (БДПС), пневмопривод, коригуючі пристрої, моделювання.

ABSTRACT

This qualification project explores substituting pneumatic actuators with brushless DC motors in the MP-11 industrial robot. MATLAB and Simulink were utilized to simulate the robot's drive systems.

The work comprises: a survey of industrial robot types and configurations; an in-depth analysis of the MP-11 robot; justification for selecting brushless DC motors; calculation of the requires electrical components; and the design of both the functional and schematic control diagrams. Additionally, a review of labor protection measures during electrical installation operation and operator safety in potential hazard scenarios was conducted.

The accompanying explanatory note spans 70 pages, 27 figures, 8 tables and 19 information sources.

Keywords: computerized control system, industrial manipulator, electric drive, brushless DC motor (BLDC), pneumatic actuator, corrective devices, modeling.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ, КОНСТРУКЦІЯ Й ПОБУДОВА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ПРОЕКТУВАННЯ....	10
1.1. Загальні відомості та класифікація промислових роботів	10
1.2. Основні технічні показники промислового робота	11
1.3. Конструкція маніпулятора промислового робота	13
1.4. Загальні відомості, технічні характеристики та конструкція промислового робота МП-11.....	16
Висновок за розділом 1 і постановка задачі проектування	21
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ, РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ	23
2.1. Розрахунок електропривода руху першої ланки.....	23
2.2. Розрахунок електропривода руху другої ланки	27
2.3. Розрахунок електропривода руху третьої ланки	31
2.4. Розробка принципової схеми системи керування електроприводами робота МП-11.....	34
Висновок за розділом 2.....	37
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ РОБОТА МП-11 ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ.....	38
3.1. Формування динамічної структурної схеми системи керування.....	38
3.2. Побудова динамічних моделей системи керування у програмі Simulink і дослідження перехідних процесів	39
Висновки за розділом 3.....	50
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	52
4.1. Правила безпеки при експлуатації виробничих роботів	53

4.2. небезпечні та шкідливі фактори при експлуатації робота МП-11	57
4.3. Основні заходи по техніці безпеки при експлуатації виробничого робота МП-11.....	60
Висновки за розділом 4.....	66
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	69

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ПР – промисловий робот;

КП – керуючий пристрій;

ЗП – захватний пристрій;

НС – навколишнє середовище;

ОМ – об'єкт маніпулювання;

ТО – технічне обладнання;

ВПП – вузол підготовки повітря;

СК – система керування;

РТК – роботизований технологічний комплекс;

СУОП – система управління охороною праці.

ВСТУП

Робототехніка – це галузь науки, що займається розробкою, програмуванням, створенням та експлуатацією роботів – автономних машин, здатних орієнтуватися в навколишньому середовищі та виконувати визначений спектр завдань і маніпуляцій. Важко повірити, що слово «робот», яке вперше використав чеський письменник Карел Чапек у п'єсі «Россумські універсальні роботи» (1920), у XXI столітті набуло реального втілення та широкого розповсюдження.

Роботи поділяються на різні типи залежно від їх функціонального призначення: промислові, побутові, медичні, дослідницькі, безпекові та інші.

Сучасне виробництво практично неможливе без використання хоча б мінімальної кількості роботизованих систем. Автоматизація виробничих процесів має низку значних переваг, зокрема підвищення прибутковості, зростання продуктивності, скорочення потреби у робочій силі та підвищення рівня безпеки на виробництві. Однак навіть за сучасного рівня технологій роботи не можуть виконувати абсолютно всі завдання, а їхнє технічне обслуговування залишається важливим аспектом.

Одним із ключових завдань робототехніки є модернізація вже існуючих роботизованих систем, зокрема оновлення їхніх компонентів для досягнення необхідних виробничих параметрів, зменшення зносу механізмів та забезпечення відповідності сучасним технічним вимогам.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ, КОНСТРУКЦІЯ Й ПОБУДОВА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ПРОЕКТУВАННЯ

1.1. Загальні відомості та класифікація промислових роботів

Промисловий робот (ПР) – це багатофункціональний механізм, призначений для виконання переміщень, маніпуляцій та керування в межах виробничого процесу відповідно до заданої програми. Він виконує певні операції як під контролем оператора, так і в автономному режимі.

Широке застосування ПР у промисловості пояснюється низкою переваг, зокрема підвищення продуктивності, зручністю в експлуатації, мінімальними потребами в обслуговуванні, покращенням якості кінцевої продукції, а також їхньою універсальністю та гнучкістю.

Основне призначення промислових роботів – заміна людей на потенційно небезпечних ділянках виробництва, зокрема при виконанні робіт у вогнебезпечному, токсичному, радіоактивному середовищі, а також випадках монотонної ручної праці чи роботи з верстатами, що мають числове програмне керування.

ПР можуть об'єднуватися в автономні роботизовано-технічні комплекси, що забезпечують їхню взаємодію для ефективної роботи в специфічних виробничих умовах.

Загальноприйнята система класифікації промислових роботів наведена у табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Класифікація промислових роботів

Класифікаційна ознака	Вид промислового робота
За характером виконавчих операцій	Технологічні (виробничі) Допоміжні (підйомно-транспортні) Універсальні
За спеціалізацією	Багатоцільові (універсальні) Цільові (спеціалізовані) Спеціальні

Класифікаційна ознака	Вид промислового робота
За призначенням	Зварювальні Складальні Ковальсько-пресові Для механічної обробки Для термообробки Для нанесення покриття Транспортно-складські Ливарні Пресові
За системою координатних переміщень	Декартова Полярна проста Полярна складна
За числом ступенів рухомості	З одним ступенем З двома ступенями З n ступенями
За вантажопідйомністю	Надважкі Тяжкі Середні Легкі Надлегкі
За мобільністю	Стаціонарні Пересувні
За типом привода	Електричний Гідравлічний Пневматичний Пневмо-гідравлічний
За характером працювання програми	Жорсткопрограмовані Адаптивні Гнучкопрограмовані
За характером програмування швидкостей і дискретності переміщень	Позитивні Контурні Комбіновані

1.2. Основні технічні показники промислового робота

До основних технічних характеристик промислових роботів (ПР) належать [3]:

- вантажопідйомність;
- кількість ступенів рухливості;
- похибка позиціонування;

- робочий простір ПР;
- розмір робочої зони;
- швидкість переміщення елементів конструкції;
- відносна похибка позиціонування.

Вантажопідйомність визначає максимальну сумарну масу робочого органу (ОМ) та захватного пристрою (ЗП) [3, 5]. Для деяких типів ПР також важливим показником є момент, що крутить (іншими словами – зусилля), який роз'єднує виконавчий механізм за певних умов. До цих параметрів належать зусилля затиску або крутний момент ротації (обертання) ЗП.

Кількість ступенів рухливості визначає можливу кількість переміщень ОМ у координатній площині відносно робочого органа або опорної системи [4]. Для окремих типів ПР також визначають ступені рухливості ЗП [5]. Залежно від цього параметра ПР поділяються на три групи:

- низькорухомі (3 ступені рухливості);
- середньої рухливості (від 4 до 6 ступенів);
- високорухомі (понад 6 ступенів).

Швидкість переміщення елементів конструкції визначає оперативність роботи ПР, що дає змогу розрахувати час обслуговування технічного об'єкта [6]. У більшості моделей швидкість переміщення приблизно дорівнює максимальній швидкості руху людини, яка становить від 0,1 до 1 м/с [3]. При цьому середні значення кутової швидкості маніпулятора складають 90 – 180 градусів за секунду, а лінійна швидкість – від 0,5 до 1 м/с.

Робоча зона ПР – це область, у якій розташовується робот під час експлуатації [3].

Робоча зона ЗП – це простір, у межах якого здійснюється рух робочого органа [4]. Вона характеризується максимальним радіусом обслуговування, а також переміщеннями корпусу, маніпулятора та ЗП. Радіусом обслуговування вважають найбільшу відстань від осі симетрії корпусу ПР до ЗП, за якої можливе захоплення та утримання ОМ із масою, що відповідає вантажопідйомності [3].

Похибка позиціонування – це відхилення робочого органа ПР від заданої програмою позиції [5].

Відносна похибка позиціонування визначає точність роботи ПР, оснащеною двома типами програмного керування (цикловим та позиційним) [3]. Ця величина розраховується як відношення абсолютної похибки позиціонування до максимальної відстані від найближчої до основи робота кінематичної пари до межі робочої зони і виражається у відсотках.

1.3. Конструкція маніпулятора промислового робота

Промисловий робот (ПР) складається з програмного контролера (ПК) та виконавчого пристрою, або маніпулятора – автоматизованого механізму, що відтворює поступальні та обертальні рухи людської руки. Основне призначення маніпулятора – заміна людини в потенційно небезпечних і шкідливих умовах виробництва.

Зазвичай маніпулятор ПР включає наступні компоненти [7]:

- несуча конструкція;
- виконавчий механізм;
- захватний пристрій;
- привід із передавальними механізмами;
- система пересування.

Конструкція промислового робота показана на рис. 1.1.

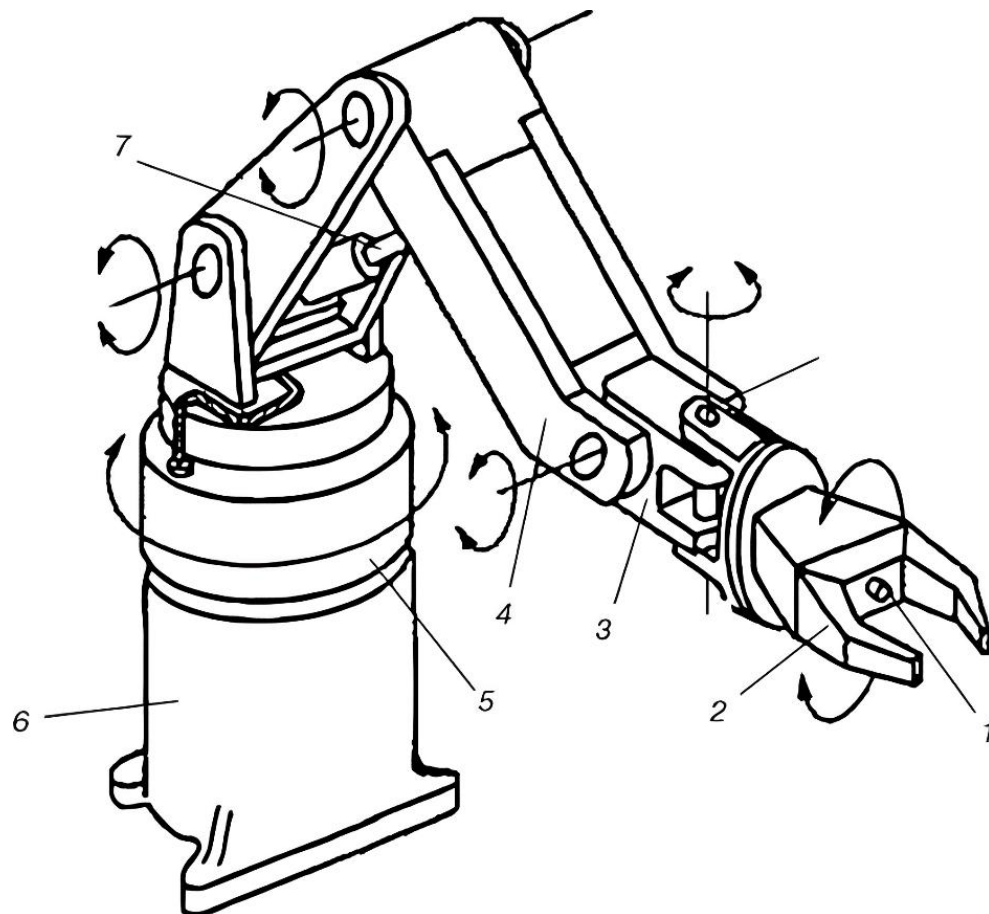


Рис. 1.1. Схема конструкції промислового робота (1 – датчик зворотного зв’язку; 2 – захватний пристрій; 3 – пензель; 4 – рука маніпулятора; 5 – колона; 6 – несуча конструкція; 7 – привід руки)

На рис. 1.1 наведено загальну схему конструкції промислового робота. Датчик зворотного зв’язку 1 забезпечує контроль положення маніпулятора, захватний пристрій 2 виконує функцію утримання та переміщення об’єкта, а робочий інструмент – «пензель» 3 реалізує технологічні операції. Рука маніпулятора 4 складається з кількох ланок і за допомогою приводу 7 здійснює як обертальні, так і поступальні рухи. Колона 5 слугує опорною основою, а несуча конструкція 6 фіксує всі вузли та гарантує необхідну жорсткість системи.

Несуча конструкція – це основа, на якій розміщуються всі агрегати та пристрої промислового робота (ПР) [7]. Вона забезпечує необхідну жорсткість і міцність маніпулятора, а також слугує платформою для розташування всіх технічних компонентів ПР. Зазвичай такі конструкції виконуються у вигляді рам, стійок, корпусів, візків, порталів тощо [8].

Виконавчий механізм являє собою систему рухомих і взаємопов'язаних ланок маніпулятора, призначених для впливу на об'єкт маніпулювання або середовище, що обробляється [7].

Робочий орган – це частина виконавчого пристрою маніпулятора, що безпосередньо виконує технологічні операції або забезпечує допоміжні переміщення [7].

Захватний пристрій використовується для фіксації та утримання об'єкта маніпуляції в певному положенні [8].

Привод із передавальними механізмами – це сукупність пристроїв, які забезпечують рух ланок виконавчого механізму відповідно до сигналів, що надходять від програмного контролера (ПК) [7].

Пристрій пересування – це механізм, який забезпечує переміщення маніпулятора або всього ПР у потрібне місце робочого простору [7]. До його складу входять ходова частина та привідний пристрій [8].

Пристрій керування ПР необхідний для формування та передачі маніпулятору команд, що надходять із керуючої програми [7].

Система керування ПР – це впорядкований комплекс засобів, призначених для генерації та передачі керуючих сигналів виконавчого пристрою відповідно до програми [7]. Вона включає обчислювальні та запам'ятовуючі пристрої, систему технічного обслуговування (ТО), блок керування приводами маніпулятора, пульт керування та електронно-обчислювальну машину (ЕОМ). У деяких випадках керування може здійснюватися механічними або електромеханічними системами, такими як реле, крокові комутатори тощо [8].

Перепрограмованість ПР – це здатність робота змінювати свої функції автоматично або за участю оператора [7]. За допомогою пульта керування можна налаштовувати алгоритми роботи, змінювати порядок дій та коригувати параметри переміщення відповідно до ступенів рухливості [8].

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) – це комплекс обладнання та датчиків, що забезпечує зворотний зв'язок та аналізує сигнали [7]. Її основна функція – збір та обробка інформації про стан навколишнього середовища, а

також про роботу елементів і механізмів ПР. ІВС є частиною системи керування [8].

Система зв'язку відповідає за обмін інформацією між оператором, ПР та системами технічного обслуговування. Вона забезпечує контроль роботи всіх компонентів, діагностику несправностей та передачу необхідних команд [8].

1.4. Загальні відомості, технічні характеристики та конструкція промислового робота МП-11

Основним завданням промислового робота МП-11 є виконання операцій переміщення та орієнтації компонентів у просторі під час автоматизованих технологічних процесів, таких як складання та металообробка. Паралельно з цим він передає команди керування до технічного обладнання (ТО), а також приймає і аналізує необхідні сигнали [9].

Цей робот являє собою систему, що включає маніпулятор, підключений до вузла підготовки повітря через пневматичні трубопроводи, також до програмного контролера через кабельні з'єднання [9]. Маніпулятор призначений для автоматизованого транспортування та орієнтації деталей (заготовок) відповідно до команд ПК. Конструктивно він виконаний у модульному варіанті та оснащений двома ланками, механізмом зсуву і ротаційним захоплювачем.

Живлення пневмосистеми здійснюється ВПП, який відповідає за регулювання тиску та очищення повітря [9]. Керування електропневматичними роздільниками маніпулятора виконується програмним контролером відповідно до запрограмованих команд, які надходять на їх котушки. Кількість і послідовність рухів визначається програмними перемичками ПК.

Сигнал про завершення запрограмованого переміщення (окрім операцій захоплення) генерується датчиками, що працюють за принципом траєкторного стеження, або формується в ПК на основі часових алгоритмів. Якщо підтверджуючий сигнал не надходить, маніпулятор автоматично зупиняється.

Програмний контролер також здійснює керування технічним обладнанням, яке взаємодіє з промисловим роботом, а також приймає та обробляє необхідні сигнали.

Технічні характеристики промислового робота наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Технічні характеристики робота МП-11

Характеристика	Позначення	Одиниці виміру	Числове значення
Маса вантажа	m_{gr}	кг	1
Радіус обертання рук	R	м	0,7
Момент інерції схвата відносно осі обертання	J	кг·м ²	3
Максимальна величина вертикального переміщення	y_{max}	м	0,065
Максимальна величина горизонтального переміщення	x_{max}	м	0,09
Маса ланки №1	m_1	кг	4
Маса ланки №2	m_2	кг	7
Маса ланки №3	m_3	кг	3
Максимальний кут повороту в горизонтальній площині	φ_{max}	рад	$\frac{2\pi}{3}$
Час підйому (опускання) рук при максимальній величині переміщення	T_y	с	0,4
Час повороту рук в горизонтальній площині при максимальному куту	T_φ	с	0,5
Час висунення (втягування) рук при максимальній величині переміщення	T_x	с	0,2
Максимальна похибка позиціонування	δ_{max}	м	$1 \cdot 10^{-4}$

Програмний контролер (ПК) виконує функцію генерації сигналів для керування маніпулятором і технічним обладнанням (ТО) відповідно до встановленої програми [9]. Крім того, він отримує сигнали від датчиків і ТО, обробляючи їх на логічному рівні.

Маніпулятор МП-11 має модульну конструкцію, що дає можливість змінювати конфігурацію вузлів та модулів [9]. У разі необхідності модулі ротації

та зсуву можуть бути вилучені або переміщені. Для спрощеної версії можливо використовувати однорукий маніпулятор, аналогічний до МП-9С.

При демонтажі зайвих модулів слід також видалити відповідні пневматичні трубки та електропроводи, ізолювати їх і компактно розмістити в корпусі маніпулятора.

Схематична компоновка промислового робота представлена на рис. 1.2.

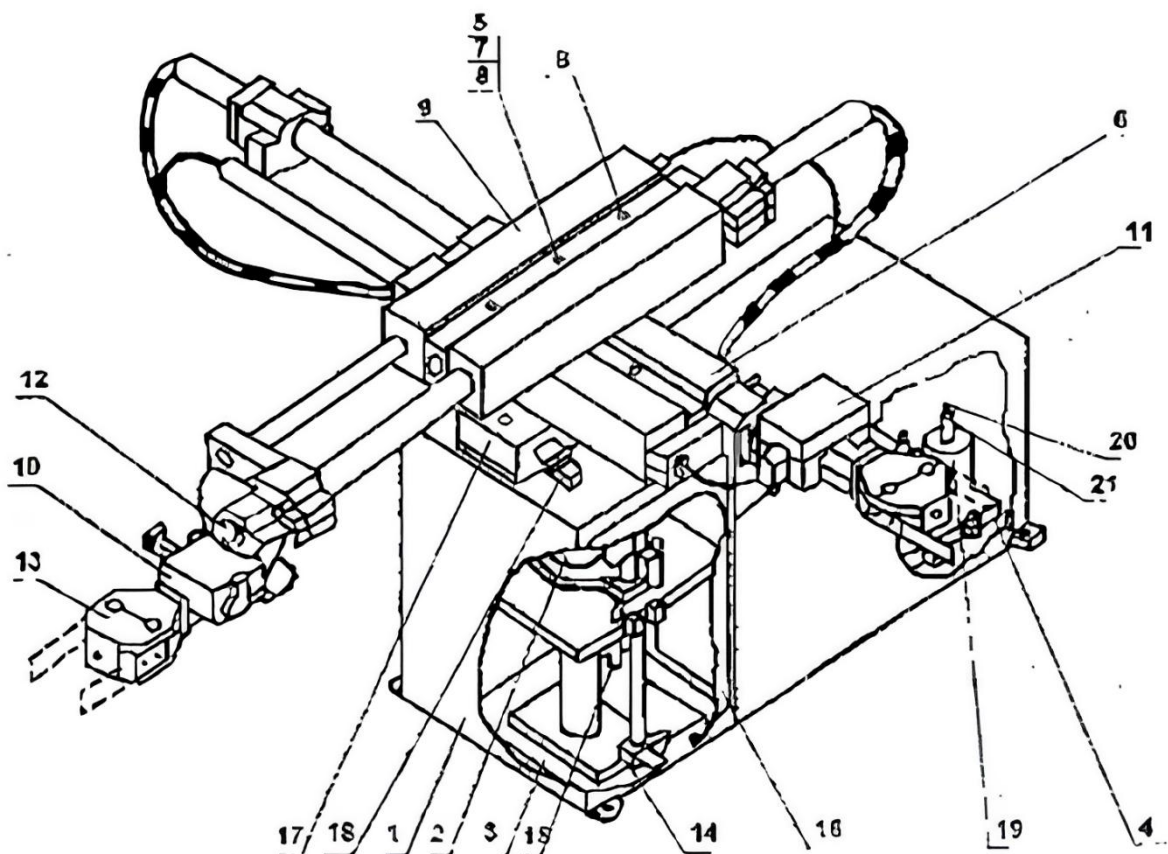


Рис. 1.2. Маніпулятор МП-11: 1 – каркас; 2 – механізм підйому; 3 – механізм повороту; 4 – вузол розподілу повітря; 5 – муфта; 6 – рука; 7 – фланець; 8 – гвинти; 9 – рука; 10 – модуль зсуву схвату; 11 – модуль обертання схвата; 12 – кронштейн; 13 – схват; 14 – упор; 15 – демпфер; 16 – кришка; 17 – амортизатор повороту; 18 – перемикач; 19 – електроклапан; 20 – голка; 21 – гайка

У стандартному варіанті компонування маніпулятора його руки пневматично з'єднані паралельно, тобто при надходженні сигналу всі руки

одночасно висуваються або втягуються [9]. Для забезпечення незалежного руху кожної руки можна виключити окремі ступені рухливості та використовувати звільнені розподільники для індивідуального керування кожною рукою. Крім того, можливе паралельне керування модулями ротації та зсуву захватів.

Каркас маніпулятора 1 виконує функцію силової та несучої конструкції (рис. 1.2) [9]. На ньому розміщені механізми підйому 2 і повороту 3 з відповідними демпферами, а також вузол розподілу повітря 4.

Поступальні модулі рук 1 і 2 закріплюються на муфті 5 механізму підйому за допомогою кріпильних гвинтів. Регулювання кута між руками здійснюється шляхом послаблення гвинтів 8, повороту рук до потрібного положення та їх подальшого фіксування затягуванням гвинтів 8.

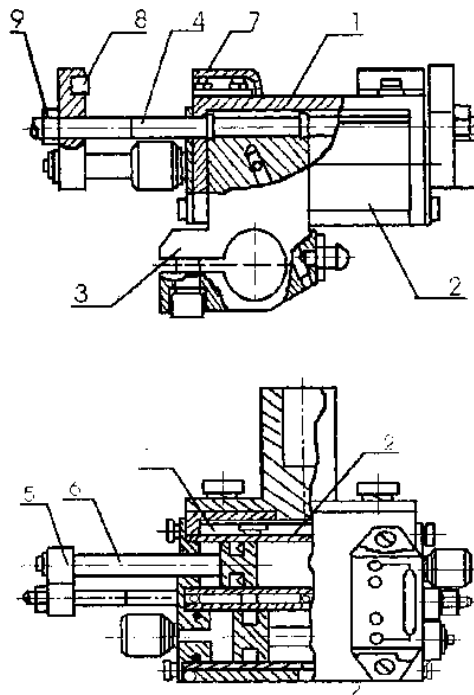


Рис. 1.3. Модуль зсуву схвата: 1 – корпус; 2 – циліндр; 3 – каретка; 4 – шток;
5 – упор; 6 – шток; 7 – КЕМ; 8 – магніт; 9 – гайка

Модулі зсуву 10 та ротації 11 кріпляться до рук маніпулятора 1 і 2 за допомогою кронштейнів 12 [9]. Захвати 13 можуть бути встановлені в затискачах модулів ротації та зсуву або безпосередньо в кронштейні 12, якщо ці модулі не

передбачені. Вирівнювання захватів на одній висотній площині здійснюється шляхом регулювання положення кронштейнів 12.

Обслуговування упорів 14 механізму підйому та демпферів 15 виконується через спеціальний сервісний отвір у корпусі, закритий кришкою 16 [9]. На кронштейні механізму підйому встановлені амортизатор 17 та перемикачі 18, які сигналізують про завершення повороту. На корпусі маніпулятора розташовані роз'єми для підключення до ПК, заземлюючий болт і штуцер для з'єднання з пневматичною системою.

Конструкції механізмів підйому, повороту та висування рук аналогічні тим, що використовуються у промисловому роботі МП-9С [9]. Механізм зсуву захвата призначений для його переміщення на 25 мм і складається з корпусу 1 із двома циліндрами 2 та каретки 3, яка через упор 5 з'єднана із штоком 4 і штоком 6 (рис. 1.3).

На корпусі 1 розташовані кінцеві електромеханічні вимикачі 7, а на упорах 5 встановлені відповідні магніти 8. Захват фіксується в затискачі каретки 3, що переміщується по зовнішніх поверхнях циліндрів 2.

При подачі повітря в одну з порожнин пневмоциліндра, шток 6 переміщує каретку 3 разом з іншим штоком до упору [9]. Зворотний рух каретки здійснюється аналогічно, при подачі повітря в протилежну порожнину. Регулювання величини зсуву здійснюється зміною положення упорів 5. Для цього необхідно послабити затягування гайок 9, обертаючи шток 4, виставити потрібну величину переміщення, після чого гайка 9 слід знову затягнути.

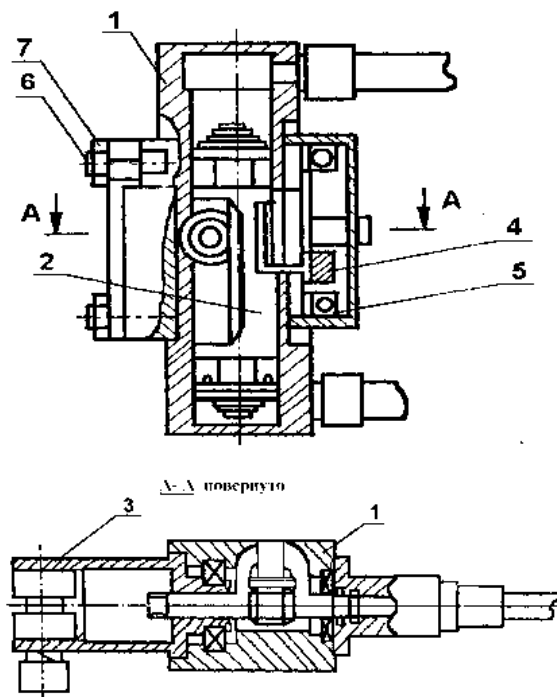


Рис. 1.4. Модуль ротації схвата: 1 – корпус; 2 – шток-рейка; 3 – вал-шестерня;
4 – магніт; 5 – КЕМ; 6 – мікрогвинт; 7 – гайка

Механізм ротації схвата забезпечує його обертання на кут до 180° і складається з корпусу 1, штока-рейки 2 та вала-шестерні 3 (рис. 1.4) [9]. На штоку-рейці розташований магніт 4, який взаємодіє з кінцевими електромеханічними вимикачами 5.

Схват закріплений у затискачі вала-шестерні 3, який містить спеціальний отвір для подачі повітря до захватного пристрою. При подачі повітря шток-рейка 2 переміщується, приводячи в рух вал-шестерню 3 і здійснюючи обертання схвата. Кут обертання можна регулювати за допомогою мікрогвинтів 6.

Висновки за розділом 1 і постановка задачі проектування

Дослідження підтвердило, що робот МП-11 спеціалізується на виконанні операцій із переміщення та орієнтації деталей у процесі автоматизованого складання. Крім того, встановлено, що даний робот оснащений двома маніпуляторами, кожен із яких має шість ступенів свободи.

Водночас МП-11 має певні недоліки, серед яких: використання релейних схем для реалізації алгоритмів керування, складна конструкція керуючого пристрою, труднощі при підключенні КП до персонального комп'ютера, а також відсутність можливості змінювати алгоритм роботи в процесі виконання технологічних операцій.

Зважаючи на виявлені недоліки, доцільною є заміна електродвигунів постійного струму на безколекторні (вентильні) двигуни. Вони мають низку переваг, зокрема: високий ресурс роботи, можливість зміни частоти обертання, підвищену точність позиціонування, надійний рівень захисту для роботи в агресивному середовищі, здатність витримувати значні навантаження, високу енергоефективність (ККД понад 90%) та тривалий термін експлуатації.

З огляду на зазначене, метою даної роботи є розробка системи автоматичного керування електроприводами промислового робота МП-11.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- вибрати безколекторні двигуни для приводів рухомих частин маніпулятора та виконати розрахунок навантаження;
- розробити принципову електричну схему системи автоматичного керування;
- створити динамічну модель системи автоматичного керування та визначити параметри регулятора;
- здійснити розрахунок перехідних процесів, що виникають при керуванні рухом ланок маніпулятора;
- проаналізувати ключові аспекти з питань охорони праці.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ, РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ

2.1. Розрахунок електропривода руху першої ланки

Максимальне прискорення вертикального руху:

$$a_{y.\max} = 4 \cdot \frac{y_{\max}}{T_y^2} = 4 \cdot \frac{0,065}{0,4^2} = 1,625 \text{ м/с}^2. \quad (2.1)$$

Максимальна швидкість вертикального руху:

$$v_{y.\max} = a_{y.\max} \cdot \frac{T_y}{2} = 1,625 \cdot \frac{0,4}{2} = 0,325 \text{ м/с}. \quad (2.2)$$

Прискорення вільного падіння приймаємо рівним $g = 9,8 \text{ (м/с}^2\text{)}$.

На наступному етапі обчислюємо максимальну навантажувальну силу, позначену як $F_{H_{\max1}}$:

$$\begin{aligned} F_{H_{\max1}} &= (g + a_{y.\max}) \cdot (m_{gr} + m_1 + m_2 + m_3) = \\ &= (9,8 + 1,625) \cdot (1 + 4 + 7 + 3) = 171,4 \text{ Н}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Орієнтовна потужність привода:

$$P_1 = v_{y.\max} \cdot F_{H_{\max1}} = 0,325 \cdot 171,4 = 55,7 \text{ Вт}. \quad (2.4)$$

Орієнтовна потужність двигуна:

$$P_{m1} = \frac{P_1}{\eta_r} = \frac{55,7}{0,9} = 61,9 \text{ Вт}, \quad (2.5)$$

де ККД передавального механізму $\eta_r = 0,9$.

Виходячи з розрахунків було обрано двигун серії QB01701 серії Quantum NEMA 17. Характеристики обраного двигуна подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

Характеристика двигуна серії QB01701

Характеристика	Числове значення
Номінальна напруга, В	40
Номінальна сила струму/піковий, А	4,6/17
Опір/фаза до фази, Ом	1,04
Індуктивність/фаза до фази, мГн	0,49
Номінальний/піковий крутний моменти, Н·м	0,12/0,59
Коефіцієнт моменту, (Н·м)/А	0,036
Коефіцієнт проти-ЕРС, В/(рад/с)	0,036
Номінальна потужність, Вт	111
Номінальна швидкість, об/хв	9100
Інерція ротора, кг·м ²	$2,00 \cdot 10^{-6}$
Маса, кг	0,35
Електромеханічна постійна часу, мс	1,55
Електромагнітна постійна часу, мс	0,47

Визначаємо номінальну кутову швидкість обертання у рад/с:

$$\omega_{d1} = \frac{\pi \cdot n_{vr1}}{30} = \frac{\pi \cdot 9100}{30} = 952,95 \text{ рад/с}. \quad (2.6)$$

Частота обертання холостого ходу:

$$\omega_{0,1} = \frac{\omega_{d1}}{1 - \frac{1}{k_3}} = \frac{952,95}{1 - \frac{1}{5}} = 1191,2 \text{ рад/с}. \quad (2.7)$$

Коефіцієнт механічної передачі:

$$k_{mp1} = \frac{v_{y.max}}{\omega_{d1}} = \frac{0,325}{952,95} = 0,000341 \text{ м.} \quad (2.8)$$

Електромеханічна постійна часу привода:

$$\begin{aligned} T_{m1} &= \frac{J_{d1} + (m_{gr} + m_1 + m_2 + m_3) \cdot k_{mp1}^2}{c_{E1} \cdot c_{M1}} \cdot R_{a1} = \\ &= \frac{2 \cdot 10^{-6} + (1 + 4 + 7 + 3) \cdot 0,000341^2}{0,036 \cdot 0,036} \cdot 1,04 = 0,003 \text{ с.} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Коефіцієнт моменту:

$$c_{M1} = 0,036 \text{ (Н·м)/А.} \quad (2.10)$$

Коефіцієнт проти-ЕРС:

$$c_{E1} = 0,036 \text{ В/(рад/с).} \quad (2.11)$$

Коефіцієнт передачі двигуна за напругою:

$$k_{d1} = \frac{1}{c_{E1}} = \frac{1}{0,036} = 27,78 \text{ 1/(В·с).} \quad (2.12)$$

Коефіцієнт передачі двигуна за моментом:

$$k_{M1} = \frac{R_{a1}}{c_{E1} \cdot c_{M1}} = \frac{1,04}{0,036 \cdot 0,036} = 802,47 \approx 802 \text{ 1/(Н·м·с).} \quad (2.13)$$

Електромеханічна постійна часу:

$$T_{m1} = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \quad (2.14)$$

Електромагнітна постійна часу:

$$T_{e1} = 0,47 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (2.15)$$

$$T_{m1} \cdot T_{e1} = 1,55 \cdot 10^{-3} \cdot 0,47 \cdot 10^{-3} = 7,285 \cdot 10^{-7} \text{ с}^2. \quad (2.16)$$

Момент, створюваний вагою ланок:

$$M_{w1} = g \cdot (m_1 + m_2 + m_3) \cdot k_{mp1} = 9,8 \cdot (4 + 7 + 3) \cdot 0,00341 = 0,0468 \text{ Н·м.} \quad (2.17)$$

Вибір коефіцієнта струмового регулятора здійснюється так, щоб його значення було приблизно в десять разів більшим за активний опір обмотки якоря:

$$k_{c1} = 10 \cdot R_{a1} = 10 \cdot 1,04 = 10,4 \text{ Ом.} \quad (2.18)$$

Сигнал для кореляції моментної компоненти похибки:

$$I_{comp} = \frac{M_{w1} \cdot k_{M1} \cdot (k_{c1} + R_{a1})}{k_{c1} \cdot R_{a1} \cdot k_{d1}} = \frac{0,0468 \cdot 802 \cdot (10,4 + 1,04)}{10,4 \cdot 1,04 \cdot 27,78} = 1,429 \text{ А.} \quad (2.19)$$

Параметри ПД-регулятора визначаються шляхом імітаційного моделювання динаміки системи з такими вимогами: для невеликого ступінчастого впливу повне усунення перерегулювання, а при максимальному впливі – приведення помилки кутового переміщення до допустимого рівня в час, що не перевищує заданий 0,4 с: $k_{p1} = 1 \cdot 10^3$, а $k_{d1} = 20$.

2.2. Розрахунок електропривода руху другої ланки

При розрахунку другого електропривода розрахуємо максимальне кутове прискорення:

$$\varepsilon_{\max} = 4 \cdot \frac{\varphi_{\max}}{T_{\varphi}^2} = 4 \cdot \frac{\frac{2\pi}{3}}{0,5^2} = 33,51 \text{ рад/с}^2. \quad (2.20)$$

Максимальна кутова швидкість:

$$\omega_{\max} = \varepsilon_{\max} \cdot \frac{T_{\varphi}}{2} = 33,51 \cdot \frac{0,5}{2} = 8,4 \text{ рад/с}. \quad (2.21)$$

Максимальний динамічний момент:

$$M_{\text{dyn_max}} = J \cdot \varepsilon_{\max} = 3 \cdot 33,51 = 100,5 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (2.22)$$

Орієнтована потужність привода:

$$P_2 = M_{\text{dyn_max}} \cdot \omega_{\max} = 100,5 \cdot 8,4 = 844,2 \text{ Вт}. \quad (2.23)$$

Орієнтована потужність двигуна:

$$P_{\text{m2}} = \frac{P_2}{0,9} = \frac{844,2}{0,9} = 938 \text{ Вт}, \quad (2.24)$$

де ККД редуктора $\eta_r = 0,9$.

Виходячи з розрахунків було обрано двигун серії QB05600 серії Quantum NEMA 56. Характеристики обраного двигуна подано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

Характеристики двигуна серії QB05600

Характеристика	Числове значення
Номінальна напруга, В	40
Номінальна сила струму/піковий, А	37,8/227
Опір/фаза до фази, Ом	0,03
Індуктивність/фаза до фази, мГн	0,29
Номінальний/піковий крутний моменти, Н·м	3,6/30,1
Коефіцієнт моменту, (Н·м)/А	0,133
Коефіцієнт проти-ЕРС, В/(рад/с)	0,133
Номінальна потужність, Вт	957
Номінальна швидкість, об/хв	2521
Інерція ротора, кг·м ²	6,33·10 ⁻⁴
Маса, кг	5,34
Електромеханічна постійна часу, мс	1,83
Електромагнітна постійна часу, мс	5,21

Визначаємо номінальну кутову швидкість обертання у рад/с:

$$\omega_{d2} = \frac{\pi \cdot n_{vr2}}{30} = \frac{\pi \cdot 2521}{30} = 263,999 \approx 264 \text{ рад/с.} \quad (2.25)$$

Частота обертання холостого ходу:

$$\omega_{0,2} = \frac{\omega_{d2}}{1 - \frac{1}{k_3}} = \frac{264}{1 - \frac{1}{5}} = 330 \text{ рад/с.} \quad (2.26)$$

Коефіцієнт моменту:

$$c_{M2} = 0,133 \text{ (Н·м)/А.} \quad (2.27)$$

Коефіцієнт проти-ЕРС:

$$c_{E2} = 0,133 \text{ В/(рад/с).} \quad (2.28)$$

Розраховуємо параметри редуктора, а саме визначаємо його передаточне число:

$$i_{p2} = \text{round}\left(\frac{\omega_{d2}}{\omega_{\max}}\right) = \text{round}\left(\frac{264}{8,4}\right) = 31. \quad (2.29)$$

Момент інерції редуктора, перерахований на вал двигуна:

$$J''_{p2} = 0,1 \cdot J_{d2} = 0,1 \cdot 6,33 \cdot 10^{-4} = 6,33 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.30)$$

Оцінюємо відповідність двигуна вимогам за необхідним значенням крутного моменту:

$$\begin{aligned} M_{tr2} &= (J''_{p2} + J_{d2}) \cdot i_{p2} \cdot \varepsilon_{\max} + \frac{1}{i_{p2} \cdot \eta_r} \cdot M_{\text{dyn_max}} = \\ &= (6,33 \cdot 10^{-5} + 6,33 \cdot 10^{-4}) \cdot 31 \cdot 33,51 + \frac{1}{31 \cdot 0,9} \cdot 100,5 = 4,325 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Електромеханічна постійна часу з навантаженням:

$$\begin{aligned} T_{m2} &= \frac{J_{d2} + J''_{p2} + \left(\frac{J}{i_{p2}^2}\right)^2}{c_{M2} \cdot c_{E2}} \cdot R_{a2} = \\ &= \frac{6,33 \cdot 10^{-4} + 6,33 \cdot 10^{-5} + \left(\frac{3}{31^2}\right)^2}{0,133 \cdot 0,133} \cdot 0,06 = 0,00239 \text{ с}. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Електромеханічна постійна часу:

$$T_{m2} = 1,83 \cdot 10^{-3} \text{ с}. \quad (2.33)$$

Електромагнітна постійна часу:

$$T_{e2} = 5,21 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (2.34)$$

$$T_{m2} \cdot T_{e2} = 1,83 \cdot 10^{-3} \cdot 5,21 \cdot 10^{-3} = 9,534 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2. \quad (2.35)$$

Вибір коефіцієнта струмового регулятора здійснюємо так, щоб його значення було приблизно в десять разів більш за активний опір обмотки якоря:

$$k_{c2} = 10 \cdot R_{a2} = 10 \cdot 0,06 = 0,6 \text{ Ом}. \quad (2.36)$$

Коефіцієнт передачі двигуна за напругою:

$$k_{d2} = \frac{1}{c_{E2}} = \frac{1}{0,133} = 7,52 \text{ 1/(В/(рад/с))}. \quad (2.37)$$

Коефіцієнт передачі двигуна за моментом:

$$k_{M2} = \frac{R_{a2}}{c_{M2} \cdot c_{E2}} = \frac{0,06}{0,133 \cdot 0,133} = 3,4 \text{ 1/(Н·м·с)}. \quad (2.38)$$

Допустима помилка кутового переміщення:

$$\Delta\varphi_{\max} = \frac{\delta_{\max}}{R} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{0,7} = 1,429 \cdot 10^{-4} \text{ рад}. \quad (2.39)$$

Параметри ПД-регулятора визначаються шляхом імітаційного моделювання динаміки системи з такими вимогами: для невеликого ступінчастого впливу повне усунення перерегулювання, а при максимальному впливі – приведення помилки кутового переміщення до допустимого рівня в час, що не перевищує заданий 0,5 с: $k_{p2} = 1,5 \cdot 10^3$, а $k_{d2} = 30$.

2.3. Розрахунок електропривода руху третьої ланки

Максимальне прискорення горизонтального руху:

$$a_{x,\max} = 4 \cdot \frac{x_{\max}}{T_x^2} = 4 \cdot \frac{0,09}{0,2^2} = 9 \text{ м/с}^2. \quad (2.40)$$

Максимальна швидкість горизонтального руху:

$$v_{x,\max} = a_{x,\max} \cdot \frac{T_x}{2} = 9 \cdot \frac{0,2}{2} = 0,9 \text{ м/с}. \quad (2.41)$$

Наступним кроком визначаємо максимальну силу навантаження $F_{H_{\max 3}}$:

$$F_{H_{\max 3}} = a_{x,\max} \cdot (m_{gr} + m_3) = 9 \cdot (1 + 3) = 36 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.42)$$

Орієнтована потужність привода:

$$P_3 = v_{x,\max} \cdot F_{H_{\max 3}} = 0,9 \cdot 36 = 32,4 \text{ Вт}. \quad (2.43)$$

Орієнтована максимальна потужність двигуна:

$$P_{m3} = \frac{P_3}{\eta_r} = \frac{32,4}{0,9} = 36 \text{ Вт}, \quad (2.44)$$

де ККД гвинтової передачі $\eta_r = 0,9$.

Виходячи з розрахунків було обрано двигун серії QB01700 серії Quantum NEMA 17. Характеристика обраного двигуна подано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3.

Характеристика двигуна серії QB01700

Характеристика	Числове значення
Номінальна напруга, В	24
Номінальна сила струму/піковий, А	5,3/24
Опір/фаза до фази, Ом	0,59
Індуктивність/фаза до фази, мГн	0,25
Номінальний/піковий крутний моменти, Н·м	0,06/0,39
Коефіцієнт моменту, (Н·м)/А	0,016
Коефіцієнт проти-ЕРС, В/(рад/с)	0,016
Номінальна потужність, Вт	72
Номінальна швидкість, об/хв	11700
Інерція ротора, кг·м ²	1,0·10 ⁻⁶
Маса, кг	0,24
Електромеханічна постійна часу, мс	2,10
Електромагнітна постійна часу, мс	0,43

Визначаємо номінальну кутову швидкість обертання у рад/с:

$$\omega_{d3} = \frac{\pi \cdot n_{вр3}}{30} = \frac{\pi \cdot 11700}{30} = 1225,2 \text{ рад/с.} \quad (2.45)$$

Частота обертання холостого ходу:

$$\omega_{0_3} = \frac{\omega_{d3}}{1 - \frac{1}{k_3}} = \frac{1225,2}{1 - \frac{1}{5}} = 1531,5 \text{ рад/с.} \quad (2.46)$$

Коефіцієнт механічної передачі:

$$k_{мп3} = \frac{v_{x,max}}{\omega_{d3}} = \frac{0,9}{1225,2} = 0,000735 \text{ м.} \quad (2.47)$$

Електро механічна постійна часу:

$$\begin{aligned} T_{m3} &= \frac{J_{d3} + (m_{gr} + m_1 + m_2 + m_3) \cdot k_{mp3}^2}{c_{M3} \cdot c_{E3}} \cdot R_{a3} = \\ &= \frac{1 \cdot 10^{-6} + (1 + 4 + 7 + 3) \cdot 0,000735^2}{0,016 \cdot 0,016} \cdot 0,59 = 0,021 \text{ с.} \end{aligned} \quad (2.48)$$

Коефіцієнт моменту:

$$c_{M3} = 0,016 \text{ (Н·м)/А.} \quad (2.49)$$

Коефіцієнт проти-ЕРС:

$$c_{E3} = 0,016 \text{ В/(рад/с).} \quad (2.50)$$

Коефіцієнт передачі двигуна за напругою:

$$k_{d3} = \frac{1}{c_{E3}} = \frac{1}{0,016} = 62,5 \text{ 1/(В/(рад/с)).} \quad (2.51)$$

Коефіцієнт передачі двигуна за моментом:

$$k_{M3} = \frac{R_{a3}}{c_{M3} \cdot c_{E3}} = \frac{0,59}{0,016 \cdot 0,016} = 2304,7 \approx 2305 \text{ 1/(Н·м·с).} \quad (2.52)$$

Електромагнітна постійної часу:

$$T_{m3} = 2,10 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \quad (2.53)$$

Електромеханічна постійна часу:

$$T_{e3} = 0,43 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (2.54)$$

$$T_{m3} \cdot T_{e3} = 2,10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,43 \cdot 10^{-3} = 9,03 \cdot 10^{-7} \text{ с}^2. \quad (2.55)$$

Вибір коефіцієнта струмового регулятора здійснюється так, щоб його значення було приблизно в десять разів більшим за активний опір обмотки якоря:

$$k_{c3} = 10 \cdot R_{a3} = 10 \cdot 0,59 = 5,9 \text{ Ом}. \quad (2.56)$$

Параметри ПД-регулятора визначаються шляхом імітаційного моделювання динаміки системи з такими вимогами: для невеликого ступінчастого впливу повне усунення перерегулювання, а при максимальному впливі – приведення помилки кутового переміщення до допустимого рівня в час, що не перевищує заданий 0,2 с: $k_{p3} = 7 \cdot 10^3$, а $k_{d3} = 150$.

2.4. Розробка принципової схеми системи керування електроприводами робота МП-11

В систему керування інтегровано такі компоненти: багатоканальний контролер руху серії МХС із вбудованими драйверами, оптичні енкодери Series 21 та датчики струму ACS712-20A.

Основні технічні характеристики багатоосьового контролера серії МХС наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4.

Технічні характеристики багатоосьового контролера руху серії МХС

Характеристика	Опис
Архітектура	Система оснащена такими складовими: джерело постійного живлення, модульний багатоосьовий контролер руху з головним та підлеглим приводними модулями, а також за потреби розширювальний модуль вводу/виводу

Характеристика	Опис
Вхідна потужність постійного струму	Діапазон живлення становить від 12 до 80 В постійного струму, при цьому сумарний безперервний струм на стійку контролера не перевищує 40 А
Вхід живлення Keep-Alive	Живлення в діапазоні 12-80 В постійного струму, що застосовується для підтримки логічних ланцюгів під час відключення основного джерела живлення
Приводи осі	Система допускає встановлення від одного до шести приводних модулів осі на основну платформу
Струм осі	Струм приводу може досягати до 15 А у безперервному режимі та до 15 А у піковому режимі, за умови дотримання загального обмеження для системної стійки – не більше 40 А у безперервному режимі
Зв'язок	RS232, Ethernet
Моделі приводу осі вихідного струму	Доступні варіанти з безперервним струмом 5 А або 15 А
Максимальна вхідна потужність осі	Безперервна вхідна потужність становить 340 Вт для приводу осі з струмом 5 А та 1000 Вт для приводу з 15 А. Загальна сумарна потужність для всіх осей не повинна перевищувати 2900 Вт

Технічні характеристики датчика струму ACS712-20A наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5.

Технічні характеристики датчика струму ACS712-20A

Характеристика	Числове значення
Оптимізований діапазон точності	20 А
Чутливість	100 мВ/А
Наруга шуму	11 мВ
Загальна помилка виведення	±1,5%

Схематичне зображення принципової електричної схеми системи керування електроприводами робота МП-11 наведена на рис. 2.1.

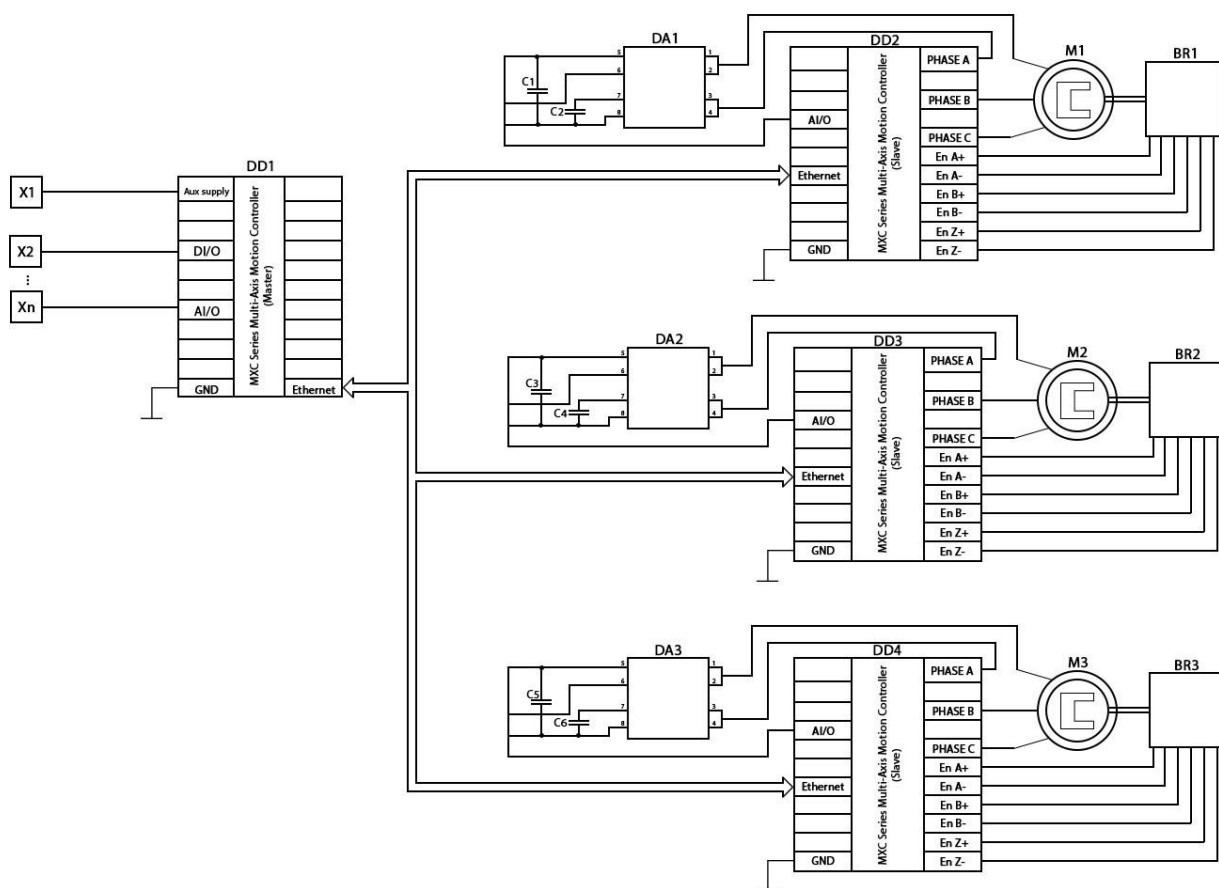


Рис. 2.1. Принципова електрична схема СУ робота МП-11

Позначення та найменування елементів електричної схеми наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6.

Позначення та найменування елементів схеми СУ

Позначення	Найменування	Кількість
X1	Живлення	1
X2,...,Xn	Датчик зовнішнього стану	Від 1 до n
DD1	Модульний багатоосевий контролер руху з головним модулем	1
DD2, DD3, DD4	Підлеглий приводний модуль	3
DA1, DA2, DA3	Датчик струму	3
M1, M2, M3	Вентильний двигун	3
BR1, BR2, BR3	Оптичний енкодер	3

Висновки за розділом 2

У цьому розділі виконано такі основні завдання:

1. Розраховано кінематичні та динамічні параметри руху ланок маніпулятора та здійснено підбір приводних двигунів. Для трьох осей руху обрано безколекторні вентильні двигуни моделей QB01701 (вісь 1), QB05600 (вісь 2) та QB01700 (вісь 3).

2. Розроблено принципову електричну схему системи керування електроприводами промислового робота МП-11 та підібрано її базові компоненти:

- багатоканальний контролер руху серії МХС із вбудованими драйверами;
- оптичні енкодери Series 21 для високоточних вимірювань кута повороту;
- модулі вимірювання струму ACS712-20А для моніторингу навантаження.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ РОБОТА МП-11 ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ

3.1. Формування динамічної структурної схеми системи керування

У складі системи використовуються безколекторні двигуни постійного струму, які характеризуються тим, що можуть бути описані за допомогою таких передавальних функцій:

$$\text{– за напругою: } W_{\text{дн}}(p) = \frac{K_{\text{д}}}{T_{\text{е}} \cdot T_{\text{м}} \cdot p^2 + T_{\text{м}} \cdot p + 1};$$

$$\text{– за моментом: } W_{\text{дм}}(p) = \frac{K_{\text{м}} \cdot (T_{\text{е}} \cdot p + 1)}{T_{\text{е}} \cdot T_{\text{м}} \cdot p^2 + T_{\text{м}} \cdot p + 1}.$$

Так як кут повороту ротора двигуна у часі $\theta(t)$ є інтервалом від частоти обертання, передавальні функції $W_{\text{дн}}(p)$ і $W_{\text{дм}}(p)$ слід помножити на $\frac{1}{p}$.

Інтеграл у цифровому регуляторі розраховується за методом трапецій.

Беручи до уваги дані передавальні функції, складаємо структурну схему цифрової системи автоматичного керування (рис. 3.1). На схемі 3.1 враховані наступні позначення: $y_{\text{пр}}(p)$ – вхідний сигнал, $k_{\text{р}}$ – коефіцієнт пропорційного регулятора, $k_{\text{д}}$ – коефіцієнт диференціального регулятора, $k_{\text{м}}$ – коефіцієнт передачі двигуна за моментом, $T_{\text{е}}$ – електромагнітна постійна часу двигуна, $T_{\text{м}}$ – електромеханічна постійна часу двигуна, $k_{\text{д}}$ – коефіцієнт передачі двигуна за вхідною напругою, $y(p)$ – вихідний сигнал.

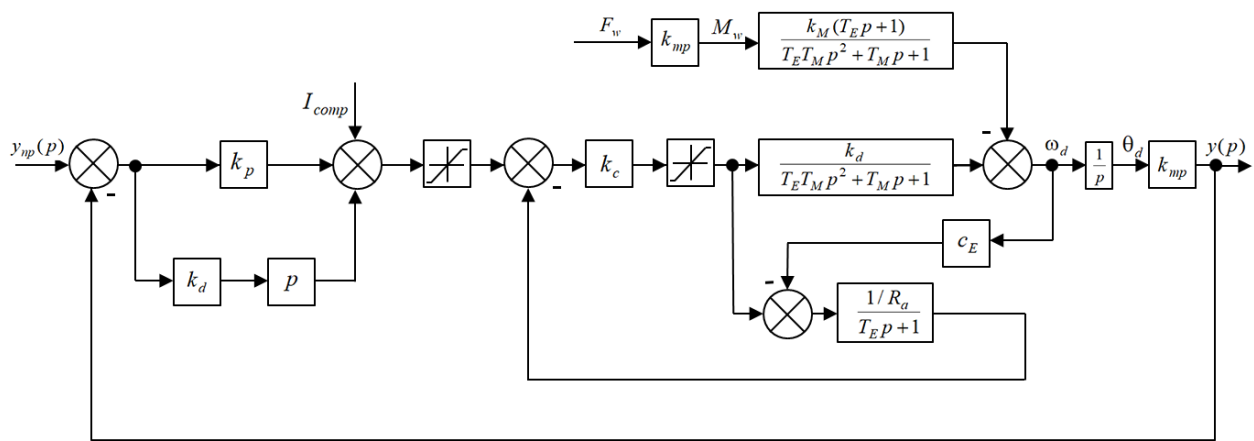


Рис. 3.1. Структурна схема СУ електроприводом робота МП-11

Період дискретизації сигналів у мікроконтролері є щонайменше на порядок меншим за найменшу постійну часу двигуна, що дозволяє розглядати ці процеси як такі, що відбуваються у безперервному режимі.

3.2. Побудова динамічних моделей системи керування у програмі Simulink і дослідження перехідних процесів

Використовуючи динамічну схему (рис. 3.1) створюємо у Simulink динамічну модель першого електропривода (рис. 3.2).

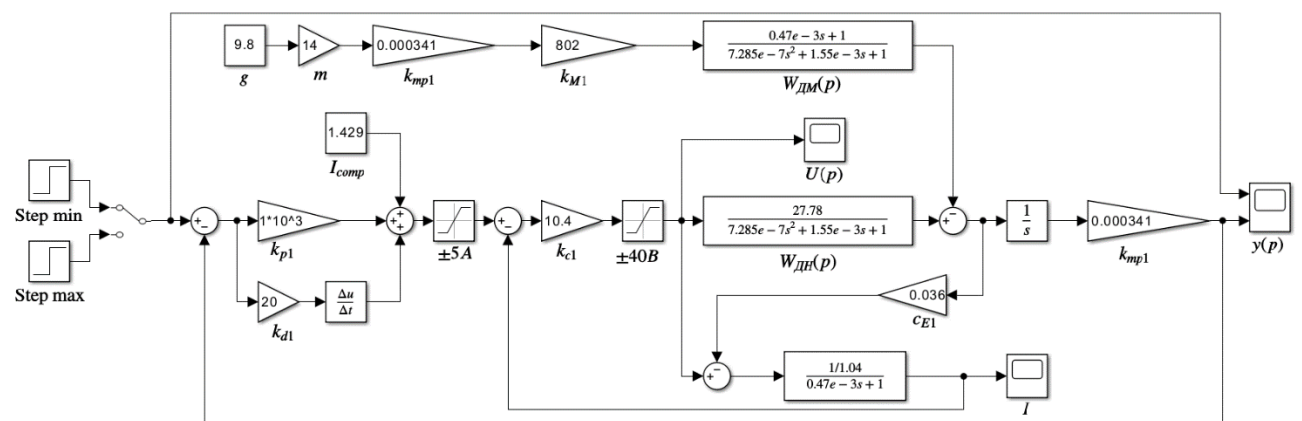


Рис. 3.2. Принципова схема системи керування для першого електропривода

Встановлюємо обмеження струму на ± 5 А, а напруги – у межах ± 40 В.

Згідно з динамічною моделлю СК, в результаті моделювання отримано графіки перехідних процесів для двох різних значень напруги.

На вхід системи подається невеликий ступінчастий сигнал, амплітуду якого обираємо таким чином, щоб напруга на обмотці двигуна не перевищувала встановлених меж ± 40 В. У результаті отримано перехідну характеристику лінійної системи, що зображено на рис. 3.3.

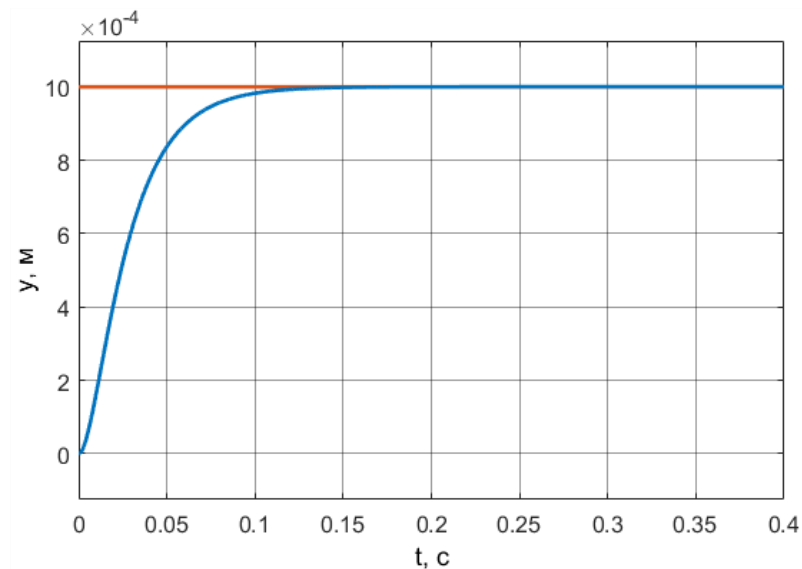


Рис. 3.3. Відгук системи на найменший ступінчастий вхідний імпульс

Зі спостережень кривої видно, що система не має перерегулювання. На рис. 3.4 зображено часову залежність напруги на обмотці двигуна, з якого видно, що її амплітуда не перевищує ± 40 В.

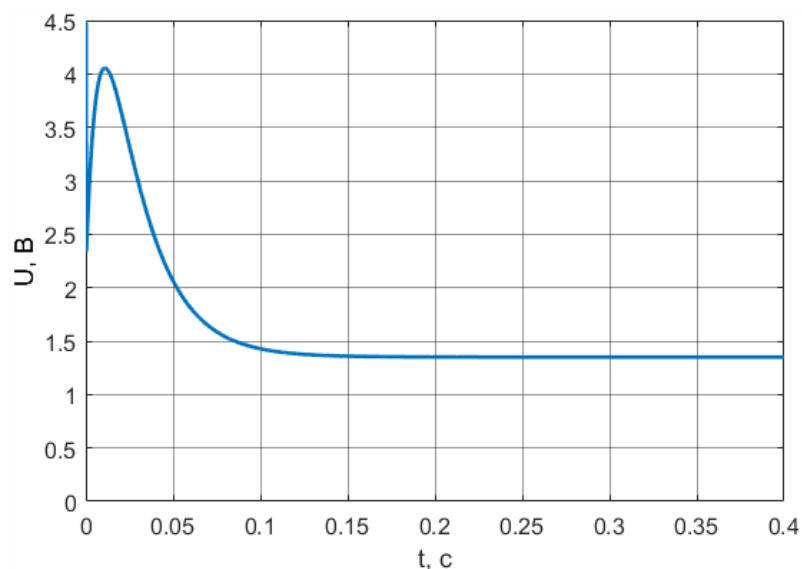


Рис. 3.4. Характеристика напруги при найменшому ступінчастому імпульсі

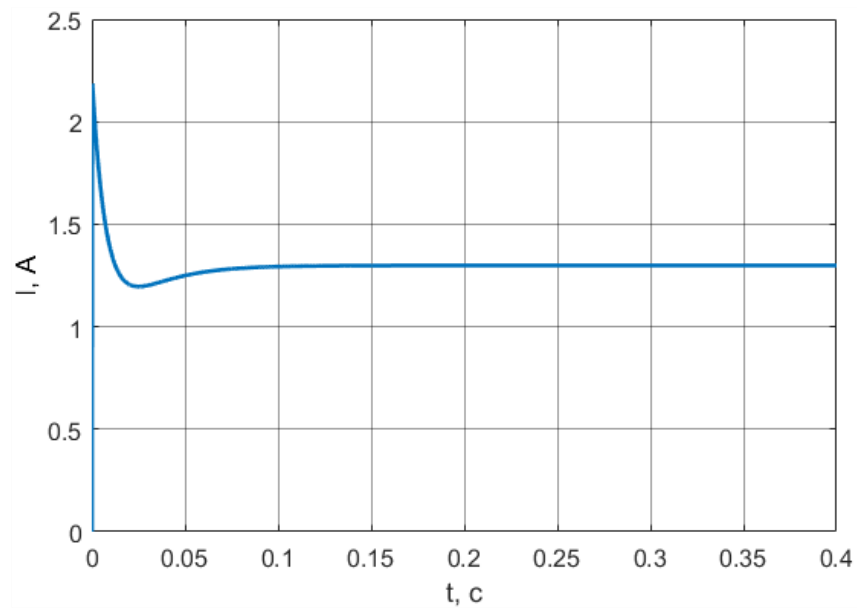


Рис. 3.5. Характеристика струму при найменшому ступінчастому імпульсі

Подаємо на вхід системи сходи́нковий сигнал, що відповідає максимальному вертикальному переміщенню $y_{\max}$. Отримані графіки перехідних процесів наведені на рис. 3.6, 3.7 та 3.8.

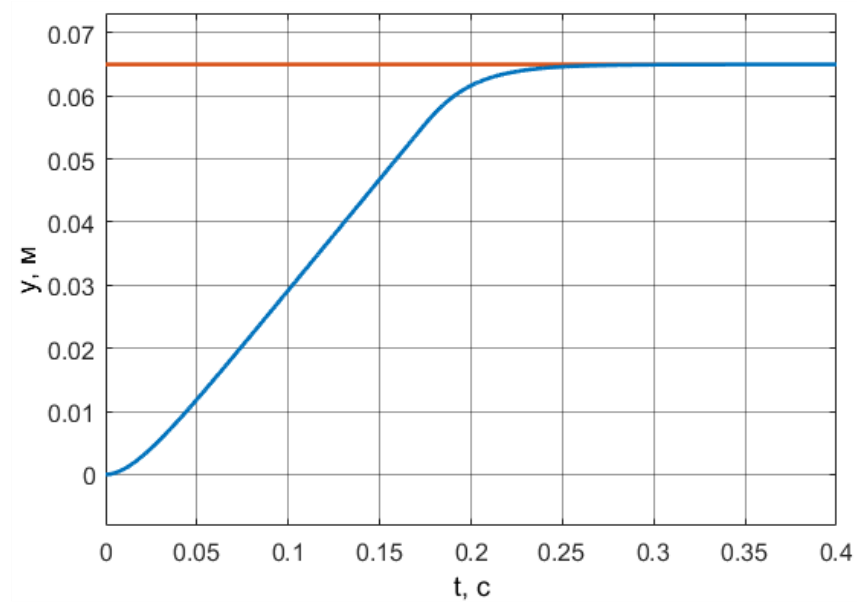


Рис. 3.6. Відповідь системи на найбільший ступінчастий вхідний імпульс

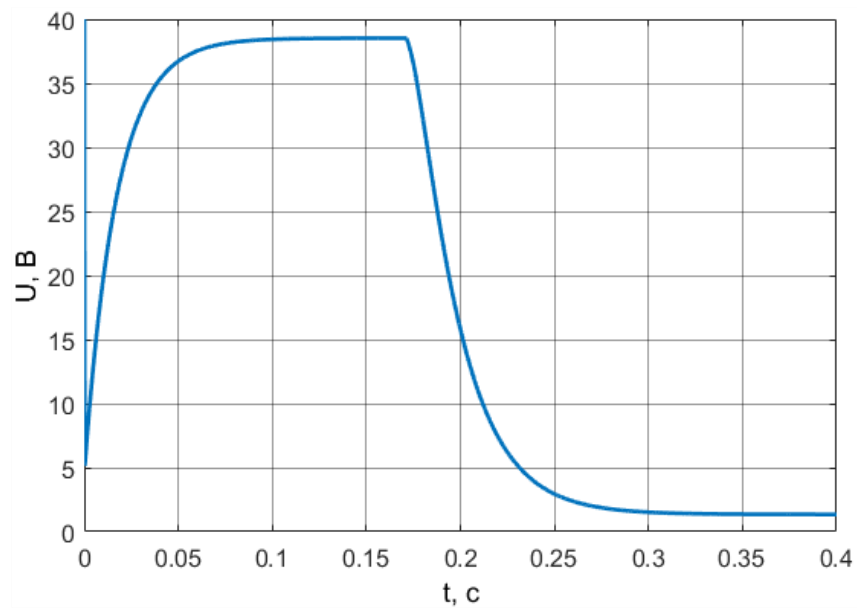


Рис. 3.7. Часова крива напруги під впливом максимальної ступінчастої дії

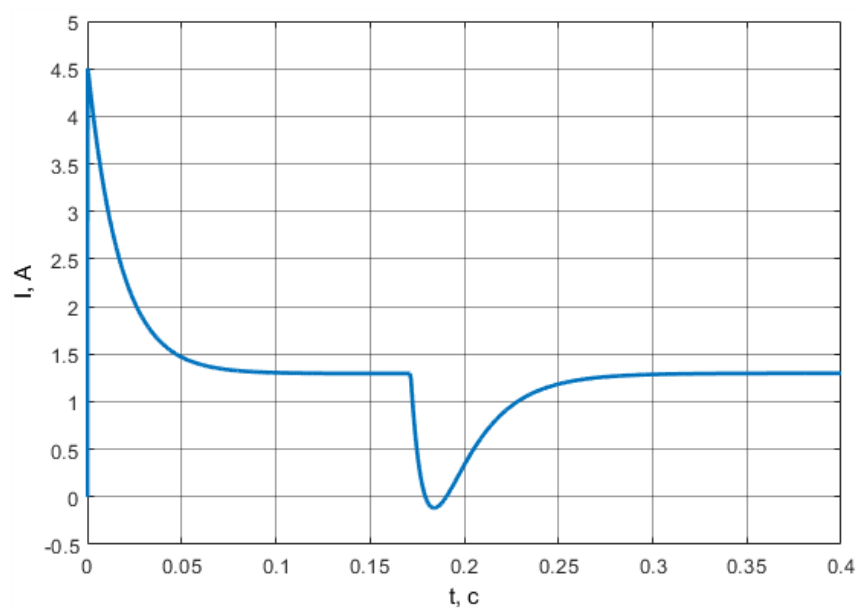


Рис. 3.8. Часова крива струму під дією максимальної ступінчастої вхідної дії

За графіком зміни координати переміщення $y(t)$ (рис. 3.6) визначаємо час перехідного процесу як час, за який помилка в системі досягає величини $1 \cdot 10^{-4}$ м (максимальна помилка позиціонування). Цей час дорівнює 0,279 с.

За графіком ми бачимо, що на обмотку двигуна подається максимальна напруга живлення +40 В (рис. 3.7), потім вона зменшується до величини $I_{\text{comp}} = 1,429 \text{ А}$, що компенсує моментну складову помилки.

Побудуємо динамічну модель системи керування другим електропривода (рис. 3.9).

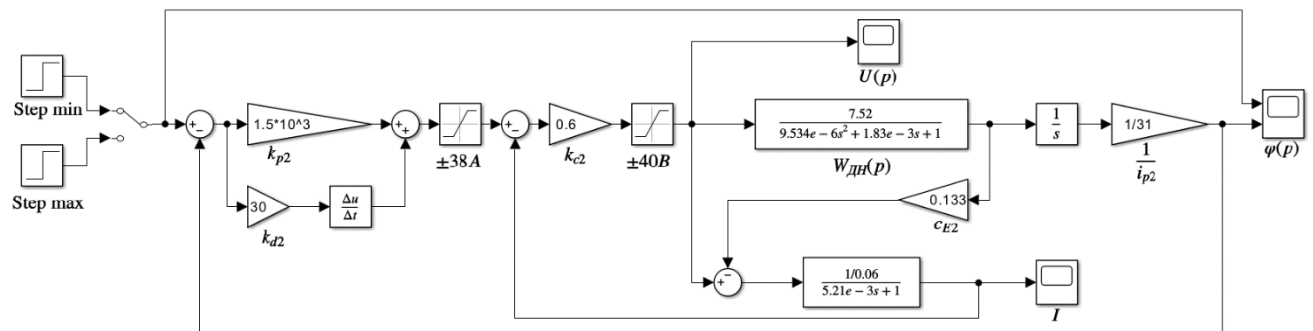


Рис. 3.9. Принципова схема системи керування для другого електропривода

Задаємо обмеження струму на $\pm 38 \text{ А}$, а обмеження напруги на $\pm 40 \text{ В}$.

Систему стимулюють невеликим ступінчастим сигналом, величину якого вибирають так, щоб напруга на обмотці двигуна залишалася в межах $\pm 40 \text{ В}$. Відповідна перехідна характеристика лінійного контуру показана на рис. 3.10, і з неї видно відсутність перерегулювання.

На рис. 3.11 наведено часову траєкторію напруги на обмотці двигуна, яка підтверджує, що її амплітуда не перевищує +40 В.

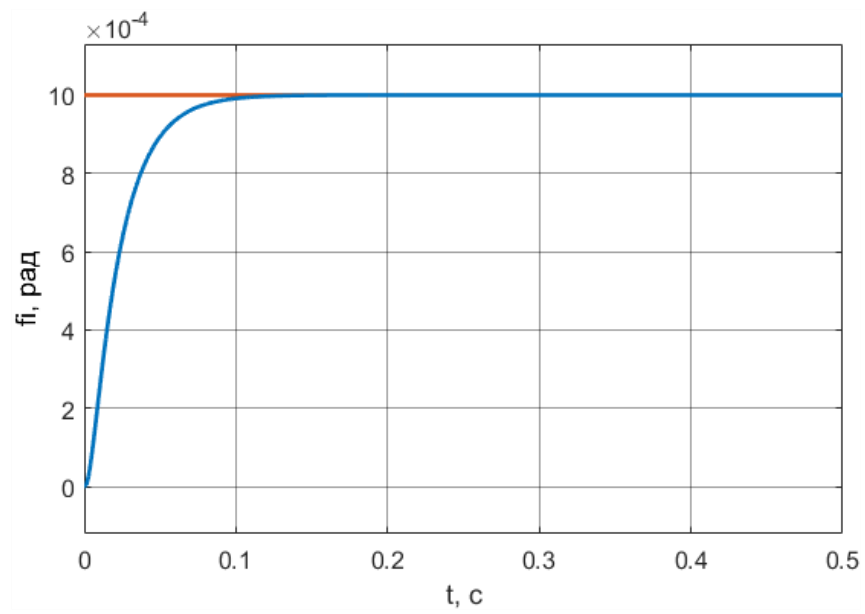


Рис. 3.10. Відгук системи на найменший ступінчастий вхідний імпульс

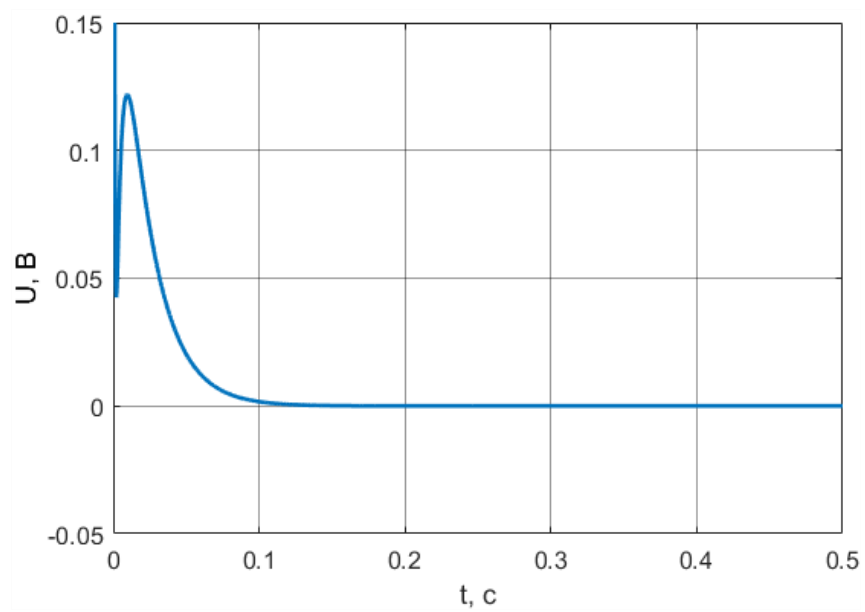


Рис. 3.11. Характеристика напруги при найменшому ступінчастому імпульсі

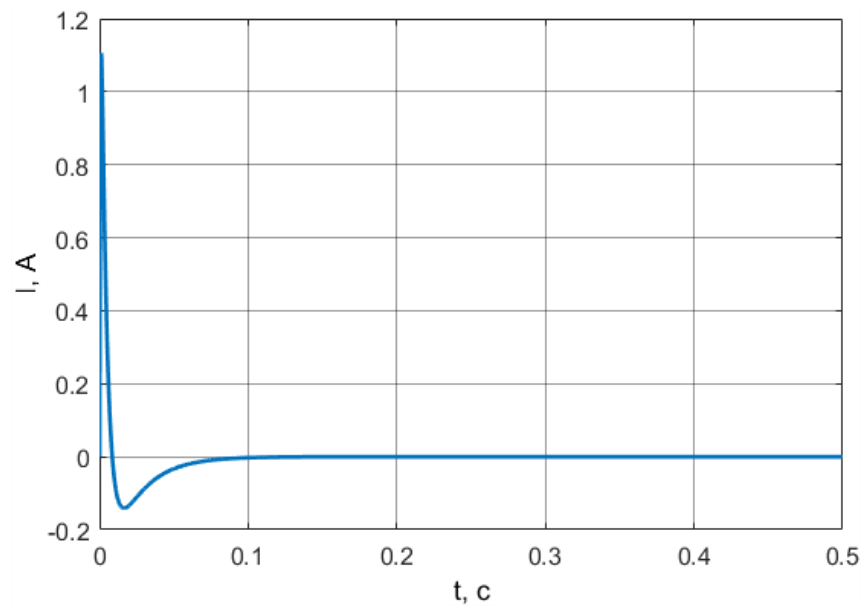


Рис. 3.12. Характеристика струму при найменшому ступінчастому імпульсі

Подаємо на вхід системи сходячковий сигнал, який дорівнює максимальному кутовому переміщенню $\varphi_{\max}$. Одержані графіки перехідних процесів наведені на рис. 3.13, 3.14 та 3.15. За графіком зміни координати переміщення $\varphi(t)$ з'ясовуємо час перехідного процесу як час, за який помилка в системі досягає величини $1,429 \cdot 10^{-4}$ рад (максимальна помилка позиціонування при кутовому переміщенні). Цей час дорівнює 0,42 с.

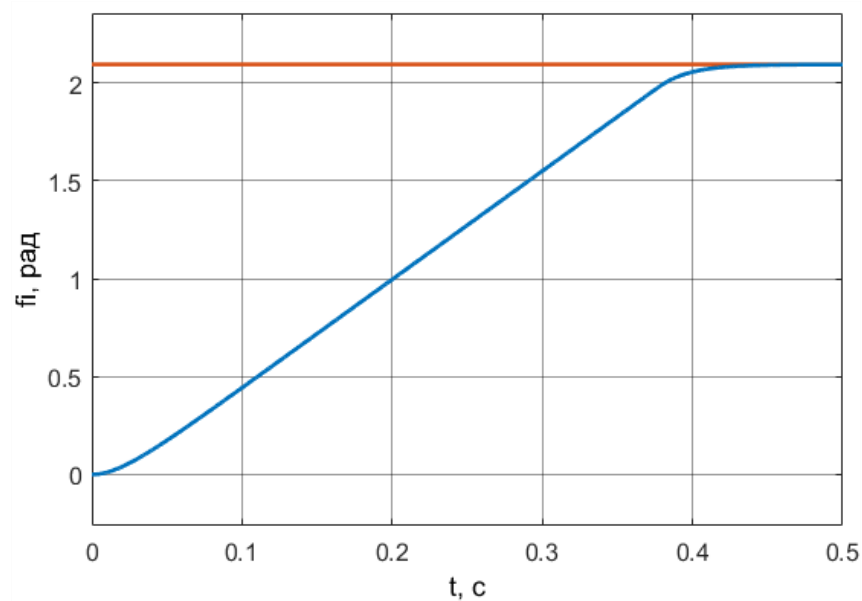


Рис. 3.13. Відповідь системи на найбільший ступінчастий вхідний імпульс

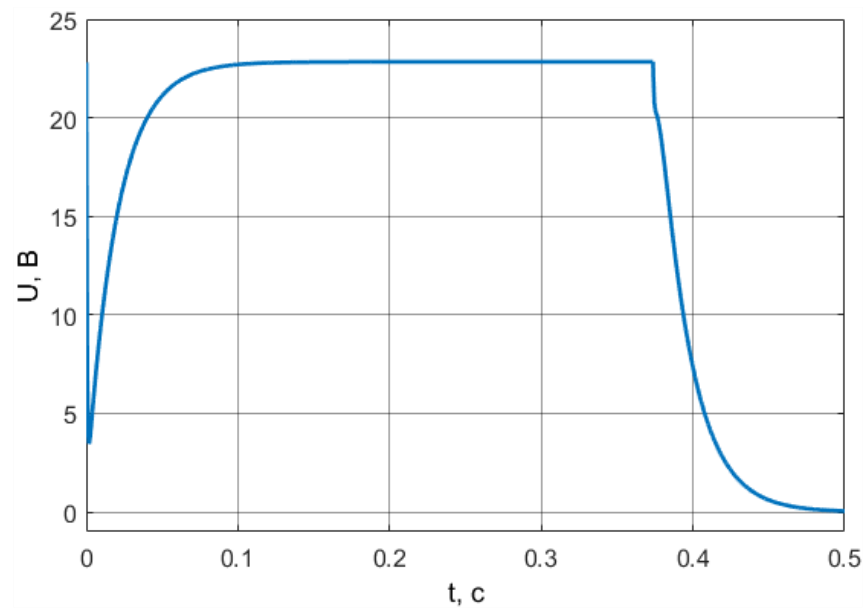


Рис. 3.14. Часова крива напруги під впливом максимальної ступінчастої дії

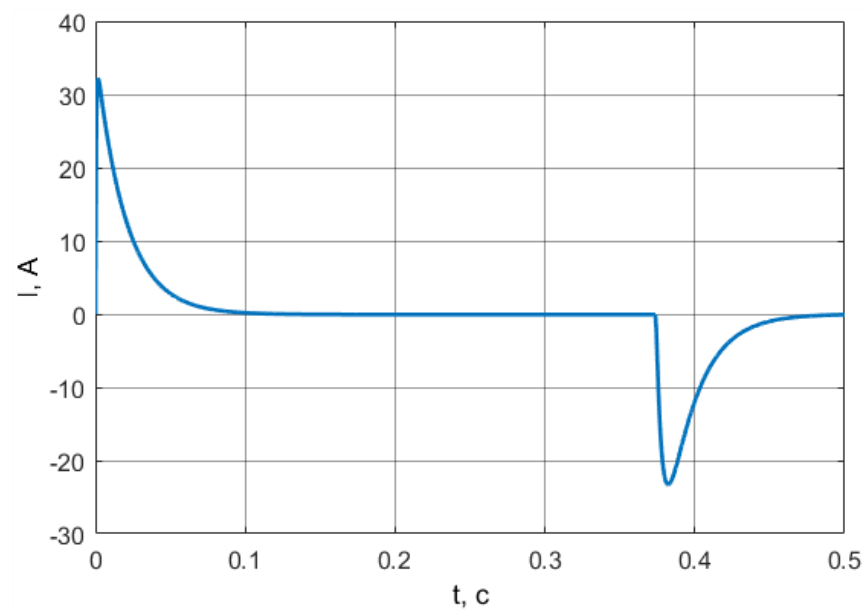


Рис. 3.15. Часова крива струму під дією максимальної ступінчастої вхідної дії

Формуємо динамічну модель системи керування третьою віссю електропривода (рис. 3.16).

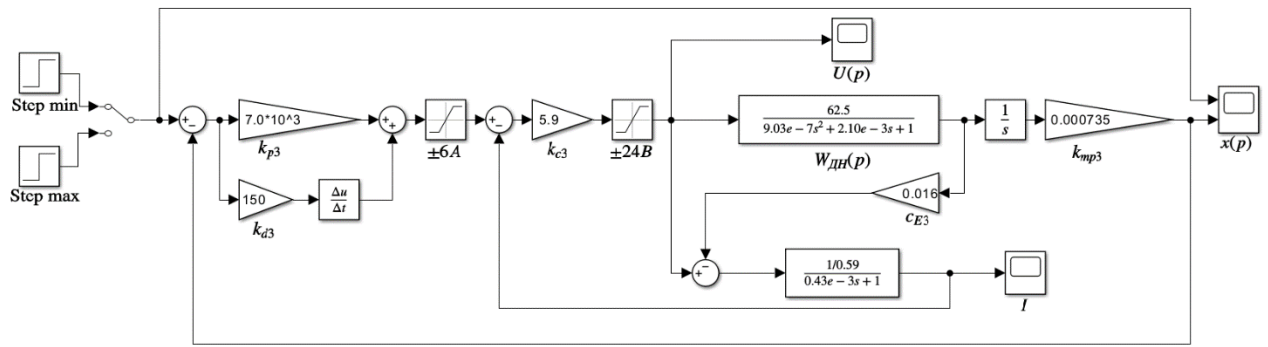


Рис. 3.16. Принципова схема системи керування для третього електропривода

Встановлюємо граничні значення струму в межах ± 6 А, та напруги в ± 24 В.

Систему стимулюємо невеликим ступінчастим імпульсом, так щоб напруга на обмотці двигуна залишалась нижче ± 24 В. Відповідна перехідна характеристика лінійної системи зображена на рис. 3.17.

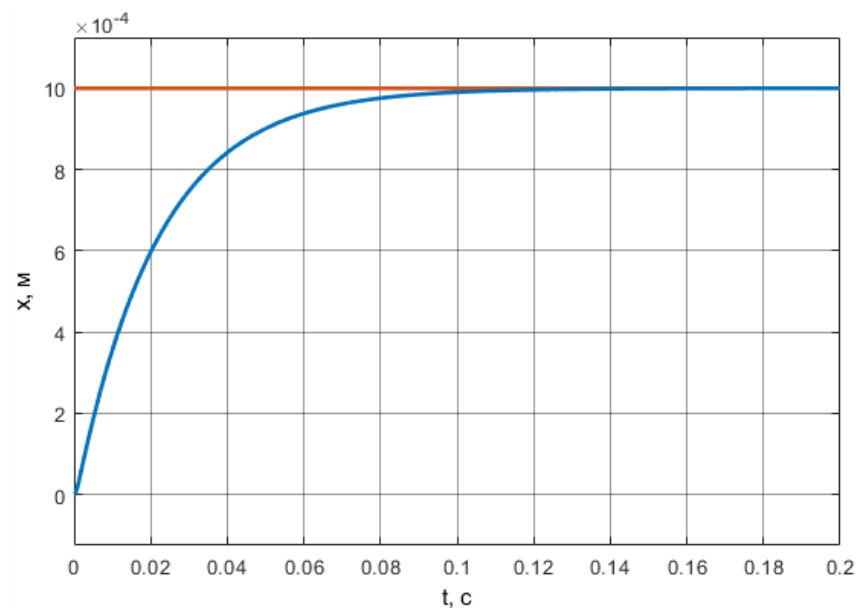


Рис. 3.17. Відгук системи на найменший ступінчастий вхідний імпульс

З аналізу кривої видно, що система не демонструє жодного перерегулювання. На рис. 3.18 відображена часова залежність напруги на обмотці двигуна, з якої видно, що її амплітуда не перевищує $+24$ В.

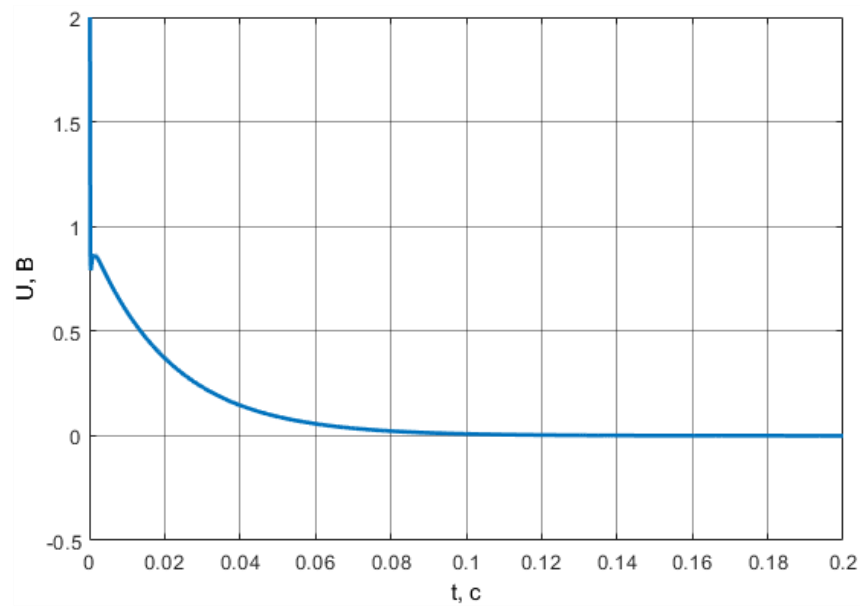


Рис. 3.18. Характеристика напруги при найменшому ступінчастому імпульсі

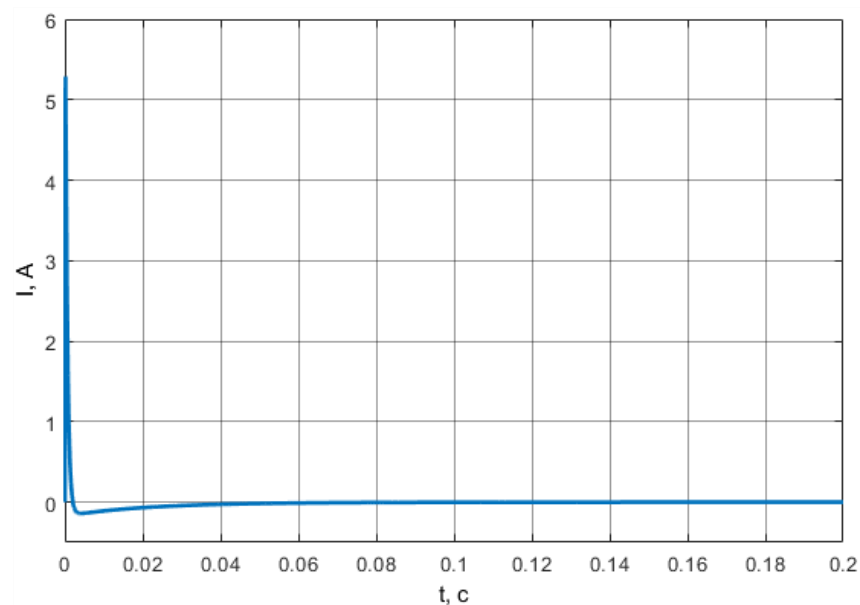


Рис. 3.19. Характеристика струму при найменшому ступінчастому імпульсі

Подаємо на вхід системи сходи́нковий сигнал, що дорівнює максимальному горизонтальному переміщенню $x_{\max}$. Отримані графіки перехідних процесів приведені на рис. 3.20, 3.21 та 3.22. За графіком зміни координати переміщення $x(t)$ з'ясовуємо час перехідного процесу як час, за який помилка в системі досягає величини $1 \cdot 10^{-4}$ (максимальна помилка позиціонування). Цей час дорівнює 0,18 с.

Із кривої на рис. 3.21 видно, що на обмотку двигуна спочатку подається напруга +24 В, після чого вона поступово спадає до нуля.

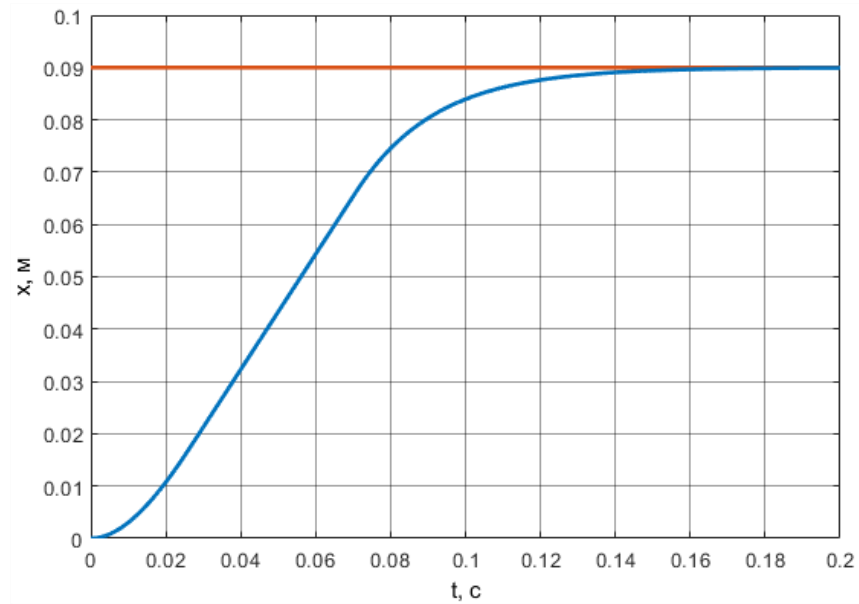


Рис. 3.20. Відповідь системи на найбільший ступінчастий вхідний імпульс

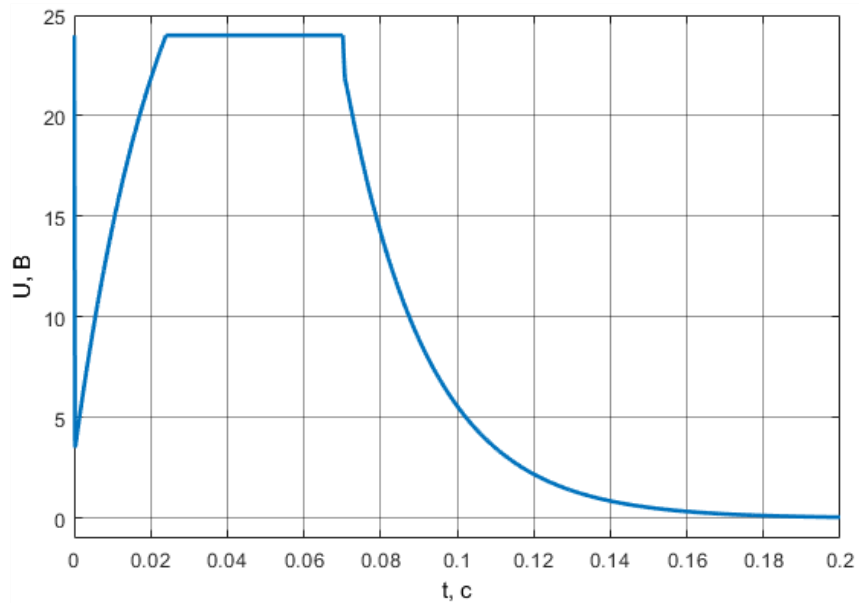


Рис. 3.21. Часова крива напруги під впливом максимальної ступінчастої дії

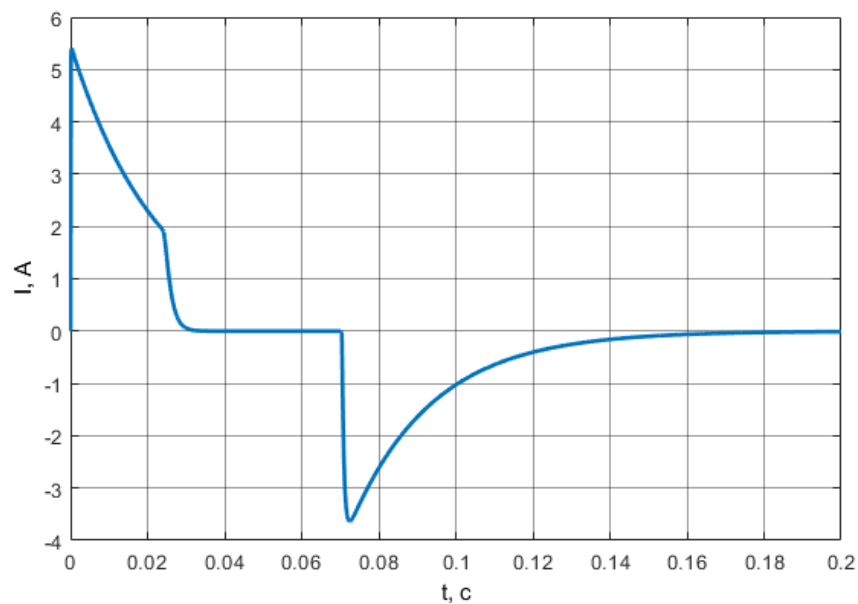


Рис. 3.22. Часова крива струму під дією максимальної ступінчастої вхідної дії

Проаналізувавши криві перехідних процесів, розраховано показники якості керування, що характеризують швидкодію системи з впровадженням електроприводом.

Висновки за розділом 3

У цьому розділі було побудовано динамічну модель системи керування трьома електроприводами робота МП-11 у графічному середовищі Simulink, а також створено відповідну математичну модель системи. Модель побудована на основі розробленої структурної схеми, при цьому задано обмеження на струм і напругу живлення двигунів. Для кожного привода проведено моделювання перехідних процесів при подачі малих та максимальних ступінчастих вхідних сигналів. Отримані перехідні характеристики системи забезпечують відсутність перерегулювання та дозволяють обчислити ключові показники якості керування.

Перший електропривод: при малому ступінчастому вході система реагує стабільно, перерегулювання відсутнє. При подачі максимального сигналу час переходу становить 0,279 с, а максимальна помилка позиціонування $1 \cdot 10^{-4}$ м. Графік реакції системи відображає оптимальний лінійний характер переходу без коливань.

Другий електропривод: модель аналогічно забезпечує відсутність перерегулювання на малому вході. Напруга на обмотці не перевищує ± 40 В, що гарантує безпечну роботу в заданих межах. Перехідний процес становить 0,42 с та відрізняється плавністю без перевищення амплітуди заданих сигналів при помилки $1,429 \cdot 10^{-4}$.

Третій електропривод: при мінімальному ступінчастому сигналі також не спостерігається перерегулювання. Для максимального горизонтального сигналу час перехідного процесу складає 0,18 с, помилка позиціонування дорівнює $1 \cdot 10^{-4}$ м. Динаміка системи демонструє швидке встановлення вихідної координати на заданому рівні без затримок.

Проведене моделювання показало, що впровадження електроприводів значно підвищує швидкодію системи керування у порівнянні з пневмоприводами. Набагато менші перехідні часи (порядку десятих долей секунди) і точність регулювання забезпечує суттєве прискорення відгуку робота. Таким чином, заміна пневмоприводів на безколекторні електродвигуни істотно покращує оперативні характеристики системи керування.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Одним із ключових завдань будь-якого підприємства є створення безпечних і комфортних умов праці, що сприяє підвищенню продуктивності та зменшенню собівартості продукції. Зниження собівартості досягається, зокрема, завдяки скороченню витрат та компенсації втрат робочого часу через тимчасову або стійку непрацездатність працівників, а також зменшенню витрат на оплату пільг за роботу в шкідливих або небезпечних умовах.

Охорона праці – це наука, що займається виявленням, оцінкою та запобіганням небезпекам, пов'язаним із робочим процесом, які можуть негативно вплинути на здоров'я працівника, навколишнє середовище та інших осіб. Це широка сфера, яка охоплює багато дисциплін і вимагає комплексного підходу, значення різнопрофільних знань, умінь та організаційних навичок для забезпечення ефективного функціонування всієї системи охорони праці.

Закон України «Про охорону праці» № 2694-12 визначає основи реалізації конституційного права працівників на безпечні та здорові умови праці. Закон регламентує взаємовідносини між роботодавцем і працівником у сфері безпеки праці, гігієни виробництва та охорони трудового середовища, а також визначає порядок організації охорони праці за участю відповідних органів державної влади.

Обмеження на виконання певних видів трудової діяльності можуть застосовуватися як на етапі прийому на роботу, так і в процесі трудової діяльності (наприклад, за результатами медичних оглядів окремих категорій працівників).

Для зменшення фізичного та психологічного навантаження необхідно впроваджувати раціональний режим праці й відпочинку, знижувати виробничі норми, а також обмежувати залучення працівників до нічних змін, понаднормових робіт і роботи у вихідні дні.

Таким чином, охорона праці є комплексною системою нормованих положень із різних сфер права, що забезпечують спеціальні заходи для захисту здоров'я працівників від шкідливих впливів виробничого середовища.

4.1. Правила безпеки при експлуатації виробничих роботів

Ефективність роботи промислових роботів значною мірою залежить від їхньої надійності та безаварійної експлуатації [14]. Одним із важливих аспектів, з яким стикається оператор під час використання ПР, є потенційна загроза як для електрообладнання, так і для самого оператора. Крім типових ризиків, характерних для будь-якого виробничого обладнання (наприклад, травми від рухомих частин конструкції чи ураження електричним струмом), існує низка специфічних небезпек, пов'язаних із роботою роботизованих систем:

1. Маніпулятор ПР є багатоланковим механізмом значних габаритів із кількома ступенями свободи, що здатний рухатись на високій швидкості. Він може несподівано опинитися в будь-якій точці робочої зони, створюючи ризик важких, а іноді й смертельних травм для оператора.

2. Через складний характер рухів та дій промислового робота (особливо за наявності сенсорних пристроїв) оператор не завжди може передбачити подальші дії машини. Наприклад, на вигляд «нерухомий» робот може раптово активувати захват.

3. Поведінка робота, яка залежить від програмного забезпечення та якості керуючих елементів, у разі помилок у програмі чи збоїв у мікросхемах, може стати повністю неконтрольованою та непередбаченою.

4. Робот, що оперує важкими предметами на високих швидкостях, становить загрозу травмування, якщо об'єкт випадково вислизне з захватного пристрою внаслідок помилки або недостатньої фіксації.

5. Необхідність присутності обслуговуючого персоналу в безпосередній близькості до робота під час навчання або технічного обслуговування суттєво підвищує рівень небезпеки.

Дослідження свідчать, що понад половину аварій, пов'язаних із використанням промислових роботів, спричиняють збої в електронних колах систем керування (СК) [15]. При цьому на людський фактор припадає менше 20% таких інцидентів. Це означає, що багато небезпек, які виникають внаслідок технічних збоїв, не можуть бути усунені лише за допомогою належної поведінки персоналу. Відтак, розробникам і операторам необхідно впроваджувати ефективні технічні заходи безпеки на етапах проектування та експлуатації.

Перші випадки нещасливих випадків із летальними наслідками під час роботи з роботизованими системами були зафіксовані ще у 1980-х роках [15]. Аналіз інцидентів показав, що більшість із них траплялися не під час стандартного виконання завдань у автоматичному режимі, а під час таких специфічних режимів, як введення в експлуатацію, налаштування, програмування, тестування, перевірка, діагностика несправностей або технічне обслуговування. Саме в ці періоди персонал часто знаходиться безпосередньо в зоні дії робота, що значно підвищує ризики. Тому система безпеки повинна гарантувати надійний захист працівників у таких умовах.

Європейська директива 89/392/ЕЕС від 1989 року щодо машин і механізмів встановлює основні вимоги щодо безпечної експлуатації обладнання. У ній зазначається, що машина – це сукупність взаємопов'язаних елементів, принаймні один з яких має рух і виконує певні функції. У випадку з промисловими роботами необхідно розуміти, що це не лише механічна система, а комплексна структура, яка має відповідати всім вимогам безпеки та бути оснащеною відповідними засобами захисту.

Забезпечення безпеки персоналу, який обслуговує робототехнічні комплекси, базується на дотриманні чітких інструкцій та профілактичних заходів, які спрямовані на запобігання аваріям. Найбільш поширені причини надзвичайних ситуацій включають:

- відхилення ПР від заданої програми або виникнення неконтрольованих дій під час навчання чи роботи в автоматичному режимі;
- збої в роботі суміжного технологічного обладнання;

- неправильній дії оператора під час налаштування, навчання або ремонту;
- присутність людей у зоні дії ПР під час його автоматичної роботи;
- використання робота в умовах, що перевищують його технічні характеристики (наприклад, перевантаження);
- незручне або нераціональне розміщення обладнання, пультів керування та транспортних засобів у межах комплексу;
- розташування елементів керування всередині робочої зони ПР без захисного огороження;
- недостатня інформованість оператора про стан системи, хід процесу та причини виникнення помилок.

На безпечність експлуатації промислових роботів (ПР) значно впливають умови їхнього використання, а також навколишнє середовище, в якому вони функціонують. Ці чинники обов'язково мають враховуватись як при конструюванні самого робота, так і під час планування виробничої ділянки, її оснащення додатковими захисними пристроями тощо. Наприклад, для роботи в агресивних середовищах робот повинен мати спеціальні захисні елементи, а при можливості відключення живлення – система має бути побудована так, щоб уникати створення небезпечних ситуацій.

Безпечна експлуатація ПР передбачає, з одного боку, суворе дотримання загальних норм техніки безпеки, а з іншого – обладнання роботів і суміжного обладнання спеціальними запобіжними, блокувальними і сигнальними засобами.

Відповідно до діючих стандартів, до промислових роботів висуваються такі основні вимоги:

- наявність сигнального забарвлення та відповідних знаків безпеки. Перевага має надаватися звуковим сигналам для аварійного та попереджувального сповіщення;
- пульт керування має бути винесений за межі робочої зони та розміщений у зручному місці для спостереження за роботою ПР і технологічного обладнання;

- для робіт, що працюють у складних умовах, необхідно спеціальне захисне виконання, а захватний механізм має забезпечувати утримання об'єкта навіть при знеструмленні;

- у режимах навчання та налагодження передбачене зменшення швидкості руху виконавчих механізмів до безпечного рівня – не більше 0,3 м/с;

- пульт керування повинен інформувати оператора про поточний режим роботи, спрацювання блокувань, стан обладнання, початок руху маніпулятора тощо;

- у разі керування ПР із декількох пультів має бути реалізована система блокування, яка виключає можливість одночасного керування;

- для пересувних робіт необхідно передбачити заходи, що унеможливають їх небезпечне переміщення над робочими зонами, проходами та проїздами – шляхом встановлення захисних екранів, сіток тощо.

Особлива увага у питаннях безпеки приділяється організації робочих місць: вони мають забезпечувати вільний, зручний і безпечний доступ до обладнання, органів керування та аварійного відключення. Блоки аварійного зупинення бажано встановлювати безпосередньо на пульті керування робототехнічним комплексом, а також дублювати їх вздовж всієї лінії пересування персоналу з інтервалом не більш 4 м.

Особливо ретельно слід проектувати всі варіанти використання робота, коли є ймовірність присутності людини у робочій зоні. Як показує статистика, більшість нещасних випадків відбувається саме під час налагоджувальних, навчальних та ремонтних робіт, коли персонал перебуває поруч із діючим обладнанням. Тому одним із ключових принципів є: **«людина у робочій зоні – завжди потенційна небезпека»**.

Насамперед слід забезпечити чітке зонування та огороження небезпечних зон. Вхід до робочої області має здійснюватися лише через спеціальні двері з блокувальним замком, який автоматично вимикає живлення активних елементів комплексу. Якщо ж присутність людини в зоні роботи є необхідною (наприклад, під час навчання або налагодження), мають бути застосовані всі можливі засоби

для мінімізації ризиків: запуск системи слід проводити на знижених швидкостях, а роботи з безпосереднім контактом – виконувати в парі. Один працівник виконує дії з системою, а інший слідкує за процесом і, у разі небезпеки, негайно активує аварійну зупину та вживає необхідних заходів.

Роботи з експлуатації, обслуговування та ремонту ПР можуть виконувати лише спеціально підготовлені працівники. Контроль за їх діяльністю повинна здійснювати служба охорони праці підприємства.

Однак для досягнення максимальної безпеки недостатньо лише дотримуватися стандартів. Необхідно постійно вдосконалювати підходи до організації роботи з ПР, враховуючи розвиток технологій і нові потенційні ризики.

4.2. Небезпечні та шкідливі фактори при експлуатації робота МП-11

Небезпечний виробничий фактор – це чинник, який за певних умов може завдати шкоди працівнику, спричинивши травму або раптове погіршення здоров'я [17]. **Травма** – це порушення цілісності або функціонування тканин і органів людини, зазвичай викликане впливом небезпечного або шкідливого чинника.

Шкідливий виробничий фактор – це чинник, що сприяє розвитку професійного захворювання або зниженню працездатності. Наслідок тривалого впливу таких чинників можуть стати хронічні чи гострі професійні хвороби.

Під час експлуатації електроустановок можуть діяти **шкідливі та небезпечні виробничі фактори**:

1. Підвищена вологість

Волога сприяє корозії струмоведучих елементів, що може призвести до несправності з'єднань, зростання перехідного опору та перегрівання контактів.

2. Підвищена температура

При температурі понад +35°C відбувається висихання ізоляційних матеріалів, що знижує електробезпеку обладнання.

3. Струмопровідний пил

Пил здатний порушити вентиляцію, засмітити радіатори охолодження та викликати перегрів. Найбільш небезпечні – вугільний, цементний, графітний пил тощо.

4. Біологічні фактори

До них належать пліснява, грибки, бактерії, гризуни, які можуть пошкоджувати обладнання або спричиняти інфекції у працівників.

5. Агресивні пари та кислоти

Пара або випари хімічних речовин спричиняють роз’їдання ізоляційних матеріалів, що може призвести до короткого замикання.

6. Електричний струм

Хоча електротравми становлять лише близько 1% усіх виробничих травм, їхня частка у смертельних випадках – від 20% до 40%. Щороку в Україні приблизно 1500 осіб гинуть від ураження струмом.

Основні причини електротравматизму на виробництві:

- випадковий контакт з неізольованими струмоведучими частинами;
- використання несправного ручного електроінструменту;
- експлуатація пошкоджених переносних світильників;
- робота без застосування засобів захисту;
- порушення правил експлуатації електрообладнання та ігнорування електрозахисного спорядження.

Фактори небезпечного впливу, пов’язані з використанням електроенергії

У процесі експлуатації електрообладнання на людину можуть впливати наступні небезпечні чинники:

- **електричний струм**, який безпосередньо проходить крізь тіло людини;
- **електрична дуга**, що викликає термічні та світлові ураження;
- **електростатичне поле**, здатне спричинити порушення функцій нервової системи;
- **вплив електромагнітного випромінювання**;
- **характер та параметри струму** (сила, напруга, частота, рід струму);

– **фізіологічний стан людини** на момент впливу.

Результатом дії цих факторів можуть стати **електротравми, механічні ураження та професійні захворювання** [17].

Електротравми

Залежно від сили струму, тривалості впливу та шляху його проходження через тіло, електротравми класифікуються на такі стадії:

1. **I стадія** – мимовільне скорочення м'язів;
2. **II стадія** – короточасна втрата свідомості;
3. **III стадія** – порушення функцій дихальної серцевої систем;
4. **IV стадія** – зупинка серцевої діяльності та дихання.

Також можливі **механічні травми**, що виникають опосередковано – наприклад, падіння з висоти внаслідок скорочення м'язів під дією струму.

Професійні захворювання

Тривалий вплив електромагнітного, електростатичного або магнітного поля може спричинити:

- порушення в роботі серцево-судинної та нервової системи;
- головні болі, дратівливість, розлади сну, втрата апетиту;
- у окремих випадках – безпліддя, зниження зору, онкозахворювання крові.

Пожежі, спричинені електроенергією

Основними причинами виникнення пожеж під час експлуатації електроустановок є:

- короткі замикання в проводці та обладнанні (близько 69% випадків);
- залишення електронагрівальних пристроїв без нагляду (21%);
- поганий контакт, що викликає перегрів (6%);
- перевантаження електромережі (3%) [17].

Іншими чинниками є порушення правил пожежної безпеки під час електрозварювальних робіт, а також недотримання мінімально допустимих відстаней від джерел тепла до легкозаймистих об'єктів.

У разі загорання електроустановок на людину можуть впливати наступні небезпечні фактори:

- полум'я та висока температура;
- токсичні продукти горіння (особливо від синтетичних матеріалів);
- задимлення, що ускладнює евакуацію;
- зниження рівня кисню;
- ураження електричним струмом;
- обвалення конструкцій.

Необхідність впровадження СУОП

Для забезпечення безпеки праці та попередження нещасних випадків необхідно впроваджувати **систему управління охороною праці (СУОП)** на всіх підприємствах, незалежно від форми власності та кількості працівників. Це передбачено ст. 13 Закону України «Про охорону праці» [17].

СУОП має забезпечити:

- створення безпечних умов праці на кожному робочому місці;
- регулярну оцінку стану виробничого обладнання;
- атестацію робочих місць на відповідність вимогам охорони праці;
- усунення або мінімізацію впливу шкідливих та небезпечних факторів.

Власник підприємства несе відповідальність за ефективне функціонування СУОП, зокрема – за організацію контролю умов праці, аудитів безпеки та впровадження профілактичних заходів.

4.3. Основні заходи по техніці безпеки при експлуатації виробничого робота МП-11

Засоби зниження ризиків від небезпечних виробничих факторів

Підвищена температура.

Для зменшення негативного впливу високих температур передбачено встановлення систем додаткової вентиляції та кондиціонування повітря. Також рекомендується заміна електрообладнання на термостійке [17].

Підвищена вологість.

Боротьба з підвищеною вологістю здійснюється шляхом встановлення вологопоглинаючих фільтрів, своєчасно очищення контактів з'єднань та їх затягування. Обладнання повинно мати належний вологозахист.

Струмопровідний пил.

Для мінімізації впливу пилу слід удосконалити вентиляційні системи шляхом встановлення фільтрів-пиловловлювачів, регулярно очищати ізоляційні проміжки, а також своєчасно обслуговувати й відновлювати пилозахисні елементи обладнання.

Пари та кислоти.

Агресивні пари та кислоти необхідно оперативно видаляти з робочих приміщень. Доцільною є заміна обладнання на таке, що виготовлене з кислотостійких матеріалів.

Електрична дія.

Електробезпека на підприємстві забезпечується через дотримання чинних нормативно-правових актів, зокрема:

- Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС), затверджені наказом Держнаглядохоронпраці № 4 від 09.01.1998 р. – регламентують вимоги до обслуговування електроустановок напругою до 220 кВ включно [18];

- Правила безпечної експлуатації електроустановок працівниками енергетичної галузі, затверджені наказом Держнаглядохоронпраці № 257 від 06.10.1997 р. [18];

- Вимоги до технічного використання електрообладнання споживачів, наказ Мінпаливенерго № 258 від 25.07.2006 р. (в редакції від 21.02.2017 р.) – регламентують організаційні та технічні вимоги [18];

- Вимоги до використання електрозахисного обладнання, наказ Мінпраці № 253 від 05.06.2001 р. – визначають номенклатуру засобів захисту, норми випробувань, правила зберігання та використання [18];

– Вимоги до влаштування електрообладнання, затверджені наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 476 від 24.07.2017 р. – охоплюють питання проектування, монтажу, експлуатації та обслуговування електрообладнання [18];

– ДСТУ 2843-94 – встановлює термінологію та основні поняття у сфері електробезпеки [18];

– Вимоги пожежної безпеки, затверджені наказом МВС № 1417 від 30.12.2014 р. (у редакції від 08.04.2022 р.) [18].

Використання побутових електроприладів у виробничих умовах допускається лише відповідно до технічної документації виробника та відповідно до Правил технічної експлуатації електроустановок споживача (ПТЕЕП), зокрема, розділ I, пункту 1.5 [16].

Вимоги до роботодавців щодо організації безпечної експлуатації електрообладнання

Власник підприємства зобов'язаний забезпечити експлуатацію, обслуговування та утримання електротехнічного обладнання відповідно до чинних нормативних актів та технічної документації [16].

Для реалізації цього завдання необхідно:

– призначити відповідальну особу за технічний стан і безпечну експлуатацію електрообладнання;

– сформувати електротехнічну службу з фахівців, які досягли 18-річного віку, мають відповідну освіту та не мають медичних протипоказань до виконання електротехнічних робіт;

– розробити, затвердити та впровадити посадові інструкції, а також інструкції з охорони праці для працівників відповідного профілю;

– організувати навчання, перевірку знань, технічні огляди, профілактичні та приймально-здавальні випробування електрообладнання;

– встановити чіткий порядок моніторингу стану обладнання персоналом, відповідальним за його обслуговування;

– впроваджувати заходи з модернізації та вдосконалення виробничих процесів.

Відповідальність за організацію безпечного функціонування електрообладнання покладається на керівництво підприємства згідно з вимогами Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС).

Для безпосереднього виконання обов'язків з управління електрогосподарством підприємства керівник повинен призначити відповідальну особу.

Класифікація персоналу, що працює з електроустановками

Відповідно до функціонального призначення, персонал, який залучений до роботи з електроустановками, поділяється на три категорії:

1. Електротехнічний персонал

Це працівники, які безпосередньо обслуговують електроустановки: виконують їх монтаж, налагодження, ремонт, оперативне керування та технічне обслуговування.

До складу електротехнічного персоналу належать:

- Адміністративно-технічний персонал – керівники та спеціалісти, що організовують електротехнічні роботи;
- Оперативний персонал – працівники, які здійснюють огляд, допуск до робіт, технічне обслуговування електроустановок;
- Ремонтний персонал – фахівці, що відповідають за технічне обслуговування, ремонт, випробування і налагодження електрообладнання;
- Оперативно-ремонтний персонал – універсальні спеціалісти, які можуть виконувати як оперативне обслуговування, так і ремонт електроустановок.

2. Електротехнологічний персонал

Це працівники, які обслуговують електротехнологічне обладнання, що використовується у процесах електрозварювання, електролізу, електротермії тощо. До їх обов'язків входить контроль і регулювання електрообладнання та електроприводів у процесі експлуатації.

Зокрема, електротехнологічний персонал працює з:

- електротехнологічними установками;
- системами з безперервним регулюванням електроприводів;
- пересувними електроприймачами.

3. Неелектротехнічний персонал

Це працівники, які виконують загальновиробничі функції та можуть використовувати електрифіковане обладнання (електроінструменти, побутові прилади тощо). До цієї категорії належать, зокрема, слюсарі, прибиральниці, інші працівники, що мають побічний контакт з електроустановками.

Вимоги щодо електробезпеки для електротехнічного персоналу

Перелік посад і професій працівників, які належать до електротехнічного персоналу та зобов'язані мати відповідну групу з електробезпеки, затверджується роботодавцем.

Усі працівники цієї категорії при прийомі на роботу, а також впродовж трудової діяльності зобов'язані проходити первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктаж з електробезпеки, а також відповідне навчання. Фінансування навчального процесу здійснюється за рахунок роботодавця.

Працівники, чия діяльність класифікується як така, що пов'язана з підвищеною небезпекою, повинні щорічно проходити спеціальне навчання та складати іспити на знання нормативно-правових актів з охорони праці, зокрема з електробезпеки [17].

Пожежна безпека електроустановок

Під час технічного огляду електроустановок особливу увагу необхідно приділяти стану контактних з'єднань. Іскріння у вимикачах, штепсельних роз'ємах чи болтових з'єднаннях є потенційно небезпечним та може призвести до займання.

Ослаблення контактів спричиняє надмірне нагрівання струмопровідних елементів, що є неприпустимим. У разі виявлення нагріву необхідно вжити заходів для зменшення навантаження або відключення відповідної установки. Відновлення контактів (очищення, затягування гвинтових з'єднань) слід проводити з дотриманням заходів електробезпеки.

Кабельні канали повинні підтримуватись у чистоті та не повинні перекриватися сторонніми предметами, особливо горючими матеріалами.

Профілактика пилонакопичення

Світильники, електродвигуни, електропроводка та розподільні пристрої повинні регулярно очищуватись від пилу:

- не менше двох разів на місяць – у звичайних умовах;
- не рідше одного разу на тиждень – у приміщеннях із значним пиловиділенням [17].

Електричне навантаження і фазне балансування

Під час експлуатації однофазних електроприймачів необхідно стежити за рівномірністю навантаження між фазами. У таких системах по робочому нульовому провіднику може протікати струм, еквівалентний фазному. Тому в освітлювальних установках з газорозрядними лампами переріз нульового провідника повинен відповідати перерізу фазного [17].

Захист електроустановок від аварійних режимів

Усі електроустановки мають бути оснащені засобами захисту від короткого замикання та інших аномальних режимів роботи. Зокрема, використовуються:

- плавкі запобіжники;
- пристрої захисту від перенапруги;
- автоматичні вимикачі.

Тип і номінал запобіжників чи автоматичних вимикачів мають відповідати перерізу проводів і допустимому навантаженню. Застосування так званих «жучків» або перемичок замість згорілих запобіжників заборонено, навіть тимчасово.

На кожному електричному щитку мають бути вказані номінальні значення струмів захисту для кожної лінії, а також забезпечено наявність запасу каліброваних запобіжників [17].

З'єднання, розгалуження та оконцювання проводів повинні виконуватись капітально – методом опресування, паяння, зварювання або затиску під болт.

Заборонено при експлуатації електрообладнання:

- використовувати електродвигуни та інші установки, температура яких під час роботи перевищує температуру навколишнього середовища на понад +40°C;
- експлуатувати проводи та кабелі з пошкодженою ізоляцією, а також електронагрівальні прилади без вогнетривких підкладок або залишати їх увімкненими без нагляду;
- застосувати саморобні електронагрівальні пристрої для обігріву приміщень;
- залишати відкриті, неізольовані кінці проводів під напругою.

Висновки за розділом 4

У цьому розділі було проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі чинники, що виникають під час експлуатації промислового робота МП-11. До основних з них належать: підвищена вологість і температура, наявність струмопровідного пилу, вплив електричного струму, а також ризик виникнення займання.

Також було розглянуто комплекс технічних та організаційних заходів безпеки системи керування робота МП-11. Зокрема, до них належать: облаштування робочих приміщень додатковою вентиляцією; модернізація пилозахисного обладнання; забезпечення елементів системи належною ізоляцією, захистом від вологи, кислотного середовища та перегріву; реалізація заходів щодо захисного відключення електроживлення; дотримання вимог щодо розміщення, експлуатації, технічного обслуговування та ремонту електроустановок.

ВИСНОВКИ

У межах виконання бакалаврської роботи було досліджено принципи побудови, компоновки та основні технічні характеристики промислового робота МП-11, призначеного для реалізації операцій транспортування та орієнтації деталей у виробничих процесах. Було сформовано та розв'язано низку інженерних задач, що забезпечили досягнення поставленої мети дослідження.

На основі проведених розрахунків орієнтовної потужності та моментів, що діють на виконавчі ланки, для кожного електропривода було обґрунтовано вибір безколекторних двигунів постійного струму: QB01701 – для першого привода, QB05600 – для другого, QB01700 – для третього.

Було розроблено принципову електричну схему системи керування електроприводами, зокрема із застосуванням багатоканального контролера руху серії МХС, оптичних енкодерів Series 21 та датчиків струму ACS712-20A. Відповідно до цієї схеми побудовано динамічну модель системи у середовищі Simulink, що дозволило дослідити її поведінку та перехідні процеси.

У результаті моделювання було встановлено, що для першого електропривода швидкодія системи становить 0,279 с, похибка за швидкістю не перевищує $1 \cdot 10^{-4}$ м, перерегулювання відсутнє. Для другого привода – 0,42 с та похибка $1,429 \cdot 10^{-4}$ рад. Для третього – 0,18 с та похибка не більше $1 \cdot 10^{-4}$ м. У всіх випадках перехідні процеси протікають стабільно, без коливань і перевищення заданого рівня.

Порівняльний аналіз показав, що розроблена електроприводна система демонструє підвищення швидкодії першої ланки на 30,25% (вертикальне переміщення), підвищення швидкодії другої ланки на 16% (кутове переміщення) та підвищення швидкодії третьої ланки на 10% (горизонтальне переміщення) у порівнянні з базовим варіантом, який використовував пневматичні приводи.

Крім того, у роботі було розглянуто питання охорони праці. Проаналізовано шкідливі та небезпечні виробничі фактори, які виникають при експлуатації робота МП-11, зокрема: підвищена температура та вологість,

струмопровідний пил та вплив електричного струму. Запропоновано комплекс технічних і організаційних заходів для підвищення рівня безпеки: облаштування приміщень вентиляцією, модернізація пилозахисного обладнання, ізоляція компонентів, захист від кислот і вологи, а також правильна організація розміщення, експлуатації та ремонту електроустановок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Климчук А.А. Роботи-маніпулятори в автоматизованих системах: навчальний посібник. – Київ: КНУ, 2018. – 216 с.
2. Мороз В.Ф., Бойко А.С. Промислові роботи: навчальний посібник. – Харків: НТУ «ХП», 2020. – 248 с.
3. Черно О.О. Промислові роботи: конструювання, керування, застосування: монографія. – Миколаїв: НУК, 2021. – 312 с.
4. Касьян С.М. Основи робототехніки: технічні характеристики промислових роботів. – Київ: Наука і освіта, 2017. – 188 с.
5. Ігнатенко П.В. Промислова робототехніка: підручник. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2019. – 224 с.
6. Петренко Ю.О. Робототехнічні системи в машинобудуванні: навчальний посібник. – Київ: Арістей, 2020. – 230 с.
7. Левченко І.В. Вступ до робототехніки: навчальний посібник. – Дніпро: Видавництво ДНУ, 2021. – 200 с.
8. Титаренко В.М. Основи побудови промислових роботів: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 175 с.
9. Методичні матеріали кафедри комп'ютеризованих систем управління. – Миколаїв: НУК, 2024.
10. MATLAB & Simulink Documentation (Електронний ресурс). – Режим доступу: <https://www.mathworks.com>.
11. Quantum Motors. Двигун QB01701 серії Quantum NEMA 17: технічний паспорт.
12. Quantum Motors. Двигун QB05600 серії Quantum NEMA 56: технічний паспорт.
13. Quantum Motors. Двигун QB01700 серії Quantum NEMA 17: технічний паспорт.
14. MXC Motion Controller Series: технічна документація виробника.
15. Allegro MicroSystems. Датчик струму ACS712-20A: технічний паспорт.

16. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ (зі змінами). – Відомості Верховної Ради України.

17. Батеньков О.Л. Основи охорони праці. Електробезпека: навчальний посібник. – Житомир: ЖДТУ, 2020. – 134 с.

18. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – Київ: Мінпаливенерго України, 2006.

19. ДСТУ EN ISO 10218-1:2017. Роботи промислові. Вимоги до безпеки. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 21 с.