

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

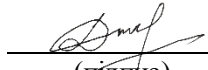
 **Черно О.О.**
«12» червня 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

на тему: Система керування приводами промислового
маніпулятора

Виконав: студент 4341 групи

 **Александров Д.Ю.**
(підпис)

Керівник роботи:

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

 **Черно О.О.**
(підпис)

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>151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»</u>
ОПП	<u>«Комп'ютерно-інтегровані технології та системи автоматизації»</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри КСУ
 **Черно О.О.**
«29» квітня 2026 р.

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

Студенту Александрову Данілу Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: 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 № 286-уч від «22» квітня 2026 року

2. Термін подання роботи: 12.06.2026 р.

3. Вихідні дані по роботі: Технічні характеристики робота МП-11, точність позиціонування – 0,1 мм, час підйому (опускання) рук при максимальній величині переміщення – 0,5 с, рук у горизонтальній площині при максимальному куті повороту – 0,6 с, час висунення (втягування) рук при максимальній величині переміщення – 0,25 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 схвата.
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

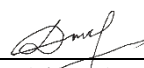
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Черно О.О., зав. каф. КСУ	09.02.2026 	05.06.2026 

7. Дата видачі завдання: «09» лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів проектування	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Основні технічні характеристики, принципи побудовання й компоновки робота-маніпулятора і постановка задач проектування.	27.02.2026	Виконано
2.	Розрахунок і вибір електрообладнання, розробка функціональної та принципової електричної схеми системи керування роботом.	27.03.2026	Виконано
3.	Моделювання динаміки системи керування електроприводами робота МП-11 та визначення параметрів цифрових регуляторів.	29.05.2026	Виконано
4.	Охорона праці.	05.06.2026	Виконано

Студент


(підпис)

Александров Д.Ю.
(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 68 сторінок, 27 рисунків, 8 таблиць та 26 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 required 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 68 pages, 27 figures, 8 tables and 26 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 робітів	10
1.2. Основні технічні показники промислового робота.....	10
1.3. Складові частини й конструкції промислових робітів	12
1.4. Загальні відомості, технічні характеристики та конструкція промислового робота МП-11	15
Висновок за розділом 1 і постановка задачі проектування	19
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ, РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ	21
2.1. Розрахунок електропривода руху першої ланки.....	21
2.2. Розрахунок електропривода руху другої ланки	24
2.3. Розрахунок електропривода руху третьої ланки.....	28
2.4. Розробка принципової схеми системи керування електроприводами робота МП-11	31
Висновок за розділом 2	33
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ РОБОТА МП-11 ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ.....	34
3.1. Формування динамічної структурної схеми системи керування.....	34
3.2. Побудова динамічних моделей системи керування у програмі Simulink і дослідження перехідних процесів	35
Висновки за розділом 3	47
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	49

4.1. Нормативно-правова база охорони праці при експлуатації промислових робіт.....	50
4.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при експлуатації робота МП11.....	52
4.3. Оцінювання ризиків та визначення захищеного простору	55
4.4. Технічні заходи безпеки при експлуатації робота МП11	56
4.5. Електробезпека системи керування електроприводами	58
4.6. Виробнича санітарія та заходи зниження впливу шкідливих факторів	59
4.7. Пожежна безпека	60
4.8. Організація охорони праці та надання першої допомоги	61
4.9. Ергономічні вимоги до організації робочого місця оператора	62
Висновки за розділом 4	63
ВИСНОВКИ	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ПР – промисловий робот;

М – маніпулятор;

КП – керуючий пристрій;

ЗП – захватний пристрій;

ОМ – об'єкт маніпулювання;

ТО – технічне обладнання;

СК – система керування;

РТК – роботизований технологічний комплекс;

СУОП – система управління охороною праці.

ВСТУП

Робототехніка — галузь науки й техніки, що вивчає створення роботів, тобто автономних машин, здатних самостійно виконувати різноманітні дії, які зазвичай покладаються на людину.

Сьогодні роботи застосовують практично в усіх сферах — від наукових досліджень і транспорту до медицини та промислового виробництва.

Сьогодні майже всі виробництва користуються хоча б мінімальною кількістю роботизованих комплексів. Автоматизація виробничих процесів дає вагомі переваги: підвищує продуктивність, зменшує витрати й поліпшує безпеку праці. Водночас сучасні технології поки що не здатні замінити людину в усіх без винятку задачах, а технічне обслуговування лишається важливою складовою експлуатації.

Одним з актуальних напрямів робототехніки є вдосконалення вже наявних роботизованих систем шляхом модернізації їхніх вузлів. Це дає змогу не лише отримати потрібні виробничі показники, а й зменшити знос механізмів та привести обладнання у відповідність до сучасних технічних вимог.

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 автоматизований механічний пристрій, який за заданою програмою виконує певні операції технологічного процесу: переміщення, маніпуляції тощо. Працювати він може як у повністю автоматичному режимі, так і під контролем оператора.

Використання ПР на виробництві має чимало переваг: воно збільшує продуктивність, скорочує витрати, робить працю безпечнішою, надає виробництву гнучкості та підвищує якість продукції.

Головна мета впровадження промислових роботів — звільнити людину від небезпечних операцій, таких як переміщення важких вантажів, робота за високих температур чи з токсичними матеріалами.

1.2. Основні технічні показники промислового робота

Ключові технічні показники ПР залежать від того, де й за яких умов його планують застосовувати [1]. Тому функціональні, конструктивні та експлуатаційні параметри робота слід узгоджувати з характеристиками решти обладнання виробничої системи.

До функціональних характеристик ПР належать число, тип і взаємне розміщення ступенів рухомості; кількість та діапазон точок позиціонування для кожного ступеня; а також форма, габарити й положення робочої зони — множини всіх точок простору, доступних робочому органу ПР [1].

Конструктивні характеристики ПР описують спосіб монтажу (підлоговий, порталний, вбудований тощо); форму, розміри й положення робочого простору — множини точок, де можуть перебувати елементи конструкції; способи й межі регулювання взаємного розташування ступенів рухомості; а також систематичні та випадкові (статичні й динамічні) похибки позиціонування [1].

Експлуатаційні характеристики ПР охоплюють форму, розміри й розташування зони обслуговування (ділянки робочої зони, де виконується певна операція), а також показники надійності та ремонтпридатності [1].

Робоча зона ПР — це простір, доступний для його робочого органа. Коли в комплексі одночасно діє кілька роботів, для опису комплексу використовують зону спільного обслуговування — ділянку, у якій об'єкт маніпулювання можуть переміщувати відразу кілька ПР [3].

Вантажопідйомність ПР — це найбільша маса об'єкта маніпулювання разом із захватним пристроєм, за якої гарантовано надійне захоплення й утримання об'єкта в межах заданих експлуатаційних параметрів [2].

Вантажопідйомність руки ПР визначається найбільшою масою об'єктів (з урахуванням маси захоплювача), яку рука може переміщувати за певних умов — наприклад, за найбільшої чи найменшої швидкості або за максимально висунутого положення [1].

Для деяких типів ПР суттєвим параметром є зусилля або крутний момент, що його створює виконавчий механізм. До них відносять зусилля затискання об'єкта захоплювальним пристроєм (ЗП), робоче зусилля руки вздовж її осі та момент під час обертання захоплювача [3].

Схему ПР добирають так, щоб кількість ступенів рухомості, потрібних для технологічного завдання, була мінімальною. Вибір залежить від розмірів, форми й розташування робочих зон, а також від кількості та розміщення роботизованих позицій; до того ж у межах руху однієї ланки доцільно поєднувати орієнтувальні, транспортні та координатні переміщення [2].

Число ступенів рухомості ПР дорівнює загальній кількості можливих координатних переміщень об'єкта маніпулювання відносно опорної бази (стійки, основи) робота [3].

Похибкою позиціонування називають відхилення дійсного положення виконавчого механізму від заданого при багаторазовому відтворенні руху; її виражають у лінійних чи кутових одиницях [2].

За швидкодією ПР загального застосування поділяють на три групи [7]:

- низька — за лінійних швидкостей окремих ступенів рухомості до 0,5 м/с;
- середня — за лінійних швидкостей понад 0,5 до 1 м/с;
- висока — за лінійних швидкостей понад 1 м/с.

Точність ПР здебільшого оцінюють абсолютною похибкою. За цим критерієм роботи загального призначення поділяють на три групи [7]:

- низька — за лінійної похибки від 1 мм і вище;
- середня — від 0,1 до 1 мм;
- висока — менш як 0,1 мм.

1.3. Складові частини й конструкції промислових роботів

Промисловий робот складається з виконавчого пристрою — власне маніпулятора — та пристрою керування. Маніпулятор відповідає за виконання всіх рухових функцій робота.

До його складу входять опорні конструкції, маніпуляційна система, робочі органи, привід і пристрій пересування [5].

На рис. 1.1. показана структурна схема промислового робота



Рис. 1.1. Структурна схема промислового робота

Пристрій керування ПР формує та подає на маніпулятор керувальні впливи згідно з програмою. До нього входять система керування, інформаційно-вимірювальна система з пристроями зворотного зв'язку та система зв'язку [5].

Робочий орган маніпулятора, який безпосередньо діє на об'єкт під час технологічних чи допоміжних переходів, є захопним пристроєм або робочим інструментом [6].

Маніпуляційна система переміщує й орієнтує робочий орган чи об'єкт у потрібній точці робочої зони; це багатоланковий просторовий механізм із розімкненим кінематичним ланцюгом [5].

Опорні конструкції слугують основою для всіх вузлів та агрегатів ПР і надають маніпулятору потрібної міцності та жорсткості. Їх виготовляють як підставки, корпуси, стійки, рами візків, портали тощо [5].

Привод перетворює підведену енергію на механічний рух ланок маніпулятора за командами системи керування. Загалом він охоплює енергоустановку, двигуни та передавальні механізми [7].

Пристрій пересування доставляє маніпулятор чи робот загалом у потрібну точку робочого простору й містить ходову частину та приводні елементи [5].

Система керування безпосередньо формує й видає керувальні сигнали. До неї входять пульт керування, запам'ятовувач, обчислювальний пристрій і блоки керування приводами маніпулятора та технологічним обладнанням [7].

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) — це сукупність обладнання й датчиків, що реалізує зворотний зв'язок та обробляє сигнали [7]. Її головне призначення — збирати й опрацьовувати дані про стан середовища та роботу вузлів і механізмів ПР; ІВС входить до складу системи керування [7].

Система зв'язку забезпечує обмін даними між оператором, роботом і службами обслуговування. Вона дає змогу контролювати роботу всіх компонентів, діагностувати несправності й передавати потрібні команди [7].

На рис. 1.2 представлено конструкцію промислового робота

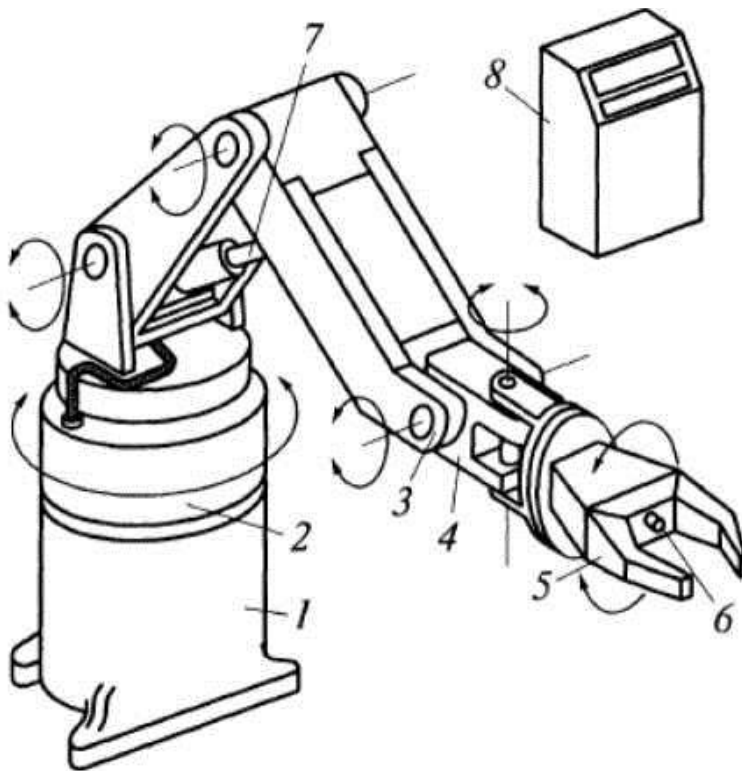


Рис. 1.2. Конструкція промислового робота (1 – опорна конструкція (основа); 2 – колона; 3 – рука маніпулятора; 4 – кисть; 5 – робочий орган (захват); 6 – датчик зворотного зв’язку; 7 – привод руки; 8 – блок керувального пристрою з пультом)

Маніпулятори промислових роботів будують за розімкненими (відкритими) кінематичними схемами: початкові ланки (стійки) утворюють корпус маніпулятора, а кінцеві несуть робочі органи [8].

З кінематичними схемами пов’язаний ще один принцип, що не ввійшов до наведеної класифікації. В його основі — характер переміщень, які маніпулятор здійснює переносними ступенями рухливості відносно певної системи координат [8]; цей характер визначається типами відповідних кінематичних пар [8].

За таким принципом і маніпулятори, і роботи розподіляють на чотири групи [8]:

- працюючі в прямокутній системі координат;
- працюючі в циліндричній системі координат;

- працюючі у сферичній системі координат;
- працюючі в комбінованій системі координат.

Схему та робочу зону маніпулятора, що діє в прямокутній системі координат, наведено на рис. 1.3, а для маніпулятора в циліндричній системі координат — на рис. 1.4.

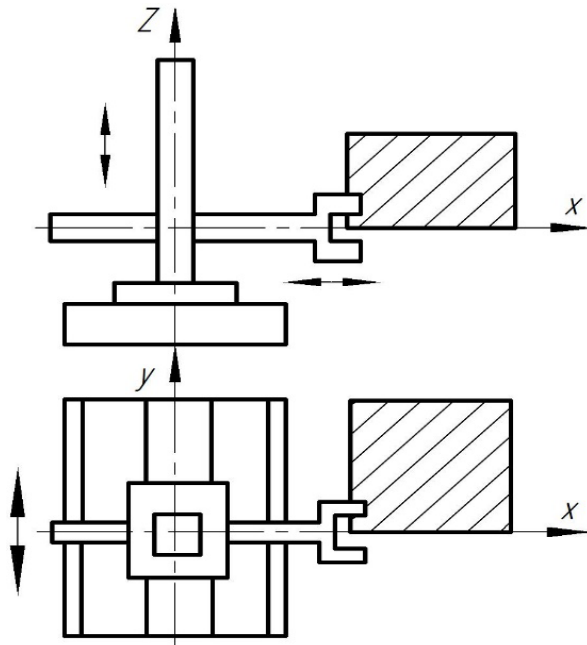


Рисунок 1.3 – Маніпулятор, який працює в прямокутній системі координат

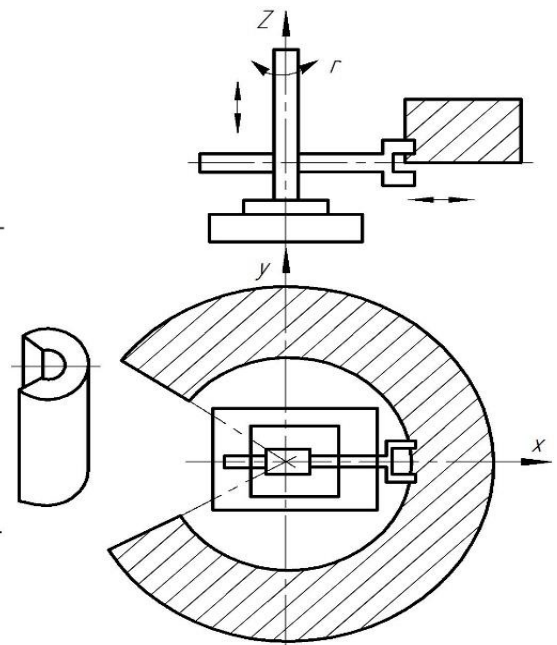


Рисунок 1.4 – Робоча зона маніпулятора

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

Робот МП-11 використовують для транспортування й орієнтації деталей під час автоматизації складальних, штампувальних та інших технологічних операцій.

Робот працює стаціонарно в закритих опалюваних приміщеннях за таких умов [9]:

- температура від $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- відносна вологість до 80 % за температури $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ і нижчих температур, без конденсації вологи;

- атмосферний тиск 84,0–106,7 кПа (630–800 мм рт. ст.);
- вплив вібрації частотою 25 Гц з амплітудою до 0,1 мм.

Робот функціонує разом із вузлом підготовки повітря, що видаляє з нього механічні домішки розміром понад 80 мкм [9].

Маніпулятор робота має шість ступенів рухливості та два механічні універсальні схвати кліщового типу [9]. Його кінематичну схему з позначеними ступенями рухливості показано на рис. 1.5.

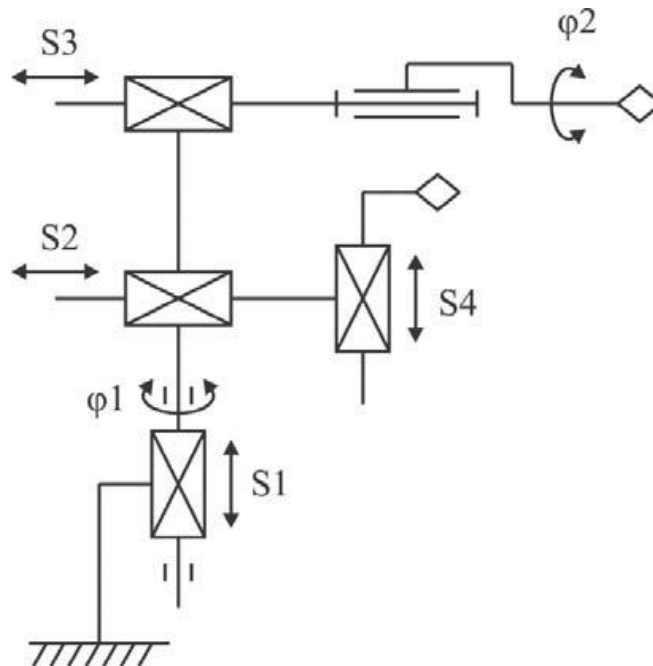


Рис. 1.5 – Кінематична схема маніпулятора

Виріб приєднують до пневмережі. Живильне повітря подається від установки підготовки повітря (УПВ), яка підтримує потрібний тиск, очищає повітря від вологи та твердих частинок і змащує пневмоциліндри ступенів рухливості [9].

Електропневморозподільники виробу перемикає за програмою пристрій керування (ПП), подаючи команди на їхні котушки. Кожний клапан має дросель, регулюванням якого змінюють швидкість руху відповідного ступеня рухливості [9].

Маніпулятор позиціонується за кінцевими регульованими упорами. Про завершення кожного руху (крім рухів схватів) сигналізує спрацювання

електронно-магнітного контакту (КЕМ, геркона) при наближенні постійних магнітів, закріплених на рухомих частинах [9].

Удари в кінці ходу при висуванні-втягуванні та поворотах руки гасяться гідравлічними амортизаторами, а при підйомі-опусканні — дроселюванням повітря на вході й виході пневмоциліндра механізму підйому [9].

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	0,5
Час повороту рук в горизонтальній площині при максимальному куту	T_φ	с	0,6
Час висунення (втягування) рук при максимальній величині переміщення	T_x	с	0,25
Максимальна похибка позиціонування	δ_{max}	м	$1 \cdot 10^{-4}$

Схематична компоновка промислового робота представлена на рис. 1.6.

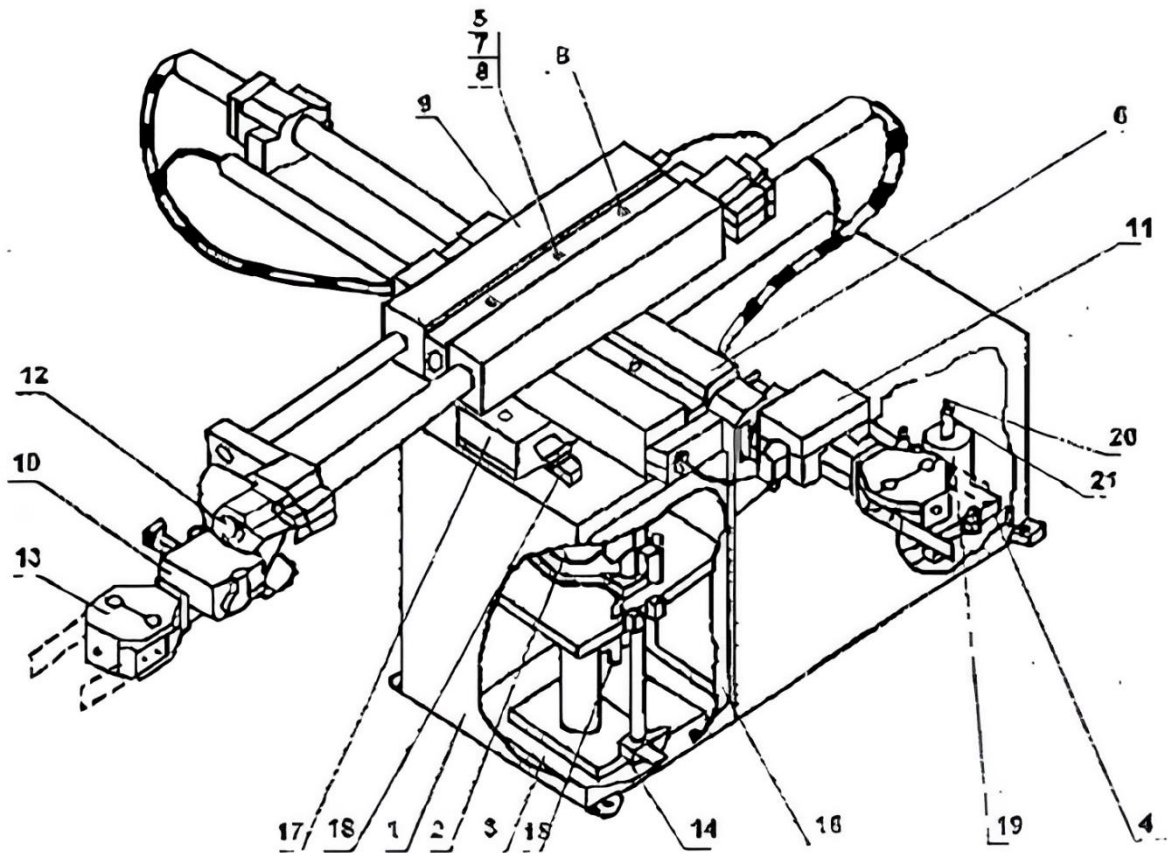


Рис. 1.6. Маніпулятор МП-11: 1 – каркас; 2 – механізм підйому; 3 – механізм повороту; 4 – вузол розподілу повітря; 5 – муфта; 6 – рука; 7 – фланець; 8 – гвинти; 9 – рука; 10 – модуль зсуву схвата; 11 – модуль обертання схвата; 12 – кронштейн; 13 – схват; 14 – упор; 15 – демпфер; 16 – кришка; 17 – амортизатор повороту; 18 – перемикач; 19 – електроклапан; 20 – голка; 21 – гайка

У цьому варіанті компонування руки маніпулятора сполучені пневматично паралельно, тому за поданим сигналом висуваються чи втягуються одночасно [9]. Для незалежного руху рук слід або відмовитися від одного ступеня рухливості, віддавши вивільнені розподільники другій руці, або запаралелити ротацію та зсув схватів.

Висновки за розділом 1 і постановка задачі проектування

Аналіз показав, що робот МП-11 призначений для переміщення та орієнтації деталей у процесі автоматизованого складання. Він має два маніпулятори по шість ступенів свободи кожен, що надає системі високої функціональності та гнучкості.

Разом із тим виявлено низку недоліків МП-11: використання релейних схем керування, що ускладнює зміну режимів роботи; громіздкість керуючого пристрою; складність поєднання системи керування з персональними комп'ютерами; неможливість адаптивно змінювати алгоритми під час виконання операцій.

Щоб усунути ці недоліки, запропоновано перейти від пневмоприводів до електроприводів на безколекторних двигунах. Вони вирізняються тривалим ресурсом, високою точністю позиціонування, можливістю регулювати частоту обертання, стійкістю до агресивних умов, здатністю нести значні навантаження, високим ККД (понад 90 %) та кращими експлуатаційними показниками.

Метою роботи є створення системи автоматичного керування електроприводами промислового робота МП-11. Для її досягнення слід розв'язати такі завдання:

- обрати відповідні безколекторні двигуни для приводів рухомих частин маніпулятора та розрахувати навантаження;
- розробити принципову електричну схему системи автоматичного керування;
- створити динамічну модель системи керування та визначити параметри регулятора;
- проаналізувати перехідні процеси, що виникають під час керування рухом ланок маніпулятора;
- урахувати ключові аспекти охорони праці як частину проектування системи.

Виконання цих завдань сприятиме підвищенню продуктивності та функціональності робота МП-11 і зробить його придатнішим до сучасних умов виробництва.

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:

$$a_{y.\max} = 4 \cdot \frac{y_{\max}}{T_y^2} = 4 \cdot \frac{0,065}{0,5^2} = 1,04 \text{ м/с}^2. \quad (2.1)$$

Максимальна швидкість вертикального руху:

$$v_{y.\max} = a_{y.\max} \cdot \frac{T_y}{2} = 1,04 \cdot \frac{0,5}{2} = 0,26 \text{ м/с}. \quad (2.2)$$

Максимальна сила навантаження:

$$\begin{aligned} F_{H_{\max 1}} &= (g + a_{y.\max}) \cdot (m_{\text{гр}} + m_1 + m_2 + m_3) = \\ &= (9,8 + 1,04) \cdot (1 + 4 + 7 + 3) = 162,6 \text{ Н}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Орієнтовна потужність привода:

$$P_1 = v_{y.\max} \cdot F_{H_{\max 1}} = 0,26 \cdot 162,6 = 42,27 \text{ Вт}. \quad (2.4)$$

Орієнтовна потужність двигуна:

$$P_{m1} = \frac{P_1}{\eta_r} = \frac{42,27}{0,9} = 46,9 \text{ Вт}, \quad (2.5)$$

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

Обираємо двигун BCH2LD0231CA5C серії Lexium 28 [11] (табл. 2.1).

Таблиця 2.1.

Характеристика двигуна BSH2LD0231CA5C

Характеристика	Числове значення
Номінальна напруга, В	220
Номінальна сила струму/піковий, А	1,11/4,31
Опір/фаза до фази, Ом	12,2
Індуктивність/фаза до фази, мГн	22,5
Номінальний/піковий крутний моменти, Н·м	0,64/1,92
Коефіцієнт моменту, (Н·м)/А	0,58
Коефіцієнт проти-ЕРС, В/(рад/с)	0,334
Номінальна потужність, Вт	200
Номінальна швидкість, об/хв	3000
Інерція ротора, кг·м ²	$1,60 \cdot 10^{-5}$
Маса, кг	1,02
Електромеханічна постійна часу, мс	1,01
Електромагнітна постійна часу, мс	1,84

Номінальна кутова швидкість двигуна:

$$\omega_{d1} = \frac{\pi \cdot n_{vr1}}{30} = \frac{\pi \cdot 3000}{30} = 314,15 \text{ рад/с.} \quad (2.6)$$

Швидкість холостого ходу:

$$\omega_{0,1} = \frac{\omega_{d1}}{1 - \frac{1}{k_3}} = \frac{314,15}{1 - \frac{1}{5}} = 392,6 \text{ рад/с.} \quad (2.7)$$

Коефіцієнт механічної передачі:

$$k_{mp1} = \frac{v_{y,max}}{\omega_{d1}} = \frac{0,26}{314,15} = 0,000827 \text{ м.} \quad (2.8)$$

Електромеханічна постійна часу привода:

$$\begin{aligned} T_{m1} &= \frac{J_{d1} + (m_{gr} + m_1 + m_2 + m_3) \cdot k_{mp1}^2}{c_{E1} \cdot c_{M1}} \cdot R_{a1} = \\ &= \frac{1,6 \cdot 10^{-5} + (1 + 4 + 7 + 3) \cdot 0,000827^2}{0,58 \cdot 0,334} \cdot 12,2 = 0,001 \text{ с.} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Коефіцієнт моменту:

$$c_{M1} = 0,58 \text{ (Н·м)/А.} \quad (2.10)$$

Коефіцієнт проти-ЕРС:

$$c_{E1} = 0,334 \text{ В/(рад/с).} \quad (2.11)$$

Коефіцієнт передачі двигуна за напругою:

$$k_{d1} = \frac{1}{c_{E1}} = \frac{1}{0,58} = 1,72 \text{ 1/(В·с).} \quad (2.12)$$

Коефіцієнт передачі двигуна за моментом:

$$k_{M1} = \frac{R_{a1}}{c_{E1} \cdot c_{M1}} = \frac{12,2}{0,58 \cdot 0,334} = 62,97 \approx 63 \text{ 1/(Н·м·с).} \quad (2.13)$$

Електромеханічна постійна часу:

$$T_{m1} = 1,01 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \quad (2.14)$$

Електромагнітна постійна часу:

$$T_{e1} = 1,84 \cdot 10^{-3} \text{ с;} \quad (2.15)$$

$$T_{m1} \cdot T_{e1} = 1,01 \cdot 10^{-3} \cdot 1,84 \cdot 10^{-3} = 1,858 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2. \quad (2.16)$$

Момент сили ваги ланок:

$$M_{w1} = g \cdot (m_1 + m_2 + m_3) \cdot k_{mp1} = 9,8 \cdot (4 + 7 + 3) \cdot 0,000827 = 0,1134 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.17)$$

Коефіцієнт регулятора струму приймаємо на порядок більшим, ніж опір обмотки якоря:

$$k_{c1} = 10 \cdot R_{a1} = 10 \cdot 12,2 = 122 \text{ Ом}. \quad (2.18)$$

Сигнал для компенсації моментної компоненти похибки:

$$I_{comp} = \frac{M_{w1} \cdot k_{M1} \cdot (k_{c1} + R_{a1})}{k_{c1} \cdot R_{a1} \cdot k_{d1}} = \frac{0,1134 \cdot 63 \cdot (122 + 12,2)}{122 \cdot 12,2 \cdot 1,72} = 0,374 \text{ А}. \quad (2.19)$$

Коефіцієнти регулятора переміщення будуть визначені при імітаційному моделюванні процесів у системі.

2.2. Розрахунок електропривода руху другої ланки

Максимальне кутове прискорення:

$$\varepsilon_{\max} = 4 \cdot \frac{\varphi_{\max}}{T_{\varphi}^2} = 4 \cdot \frac{\frac{2\pi}{3}}{0,6^2} = 23,27 \text{ рад/с}^2. \quad (2.20)$$

Максимальна кутова швидкість:

$$\omega_{\max} = \varepsilon_{\max} \cdot \frac{T_{\varphi}}{2} = 23,27 \cdot \frac{0,6}{2} = 6,9 \text{ рад/с}. \quad (2.21)$$

Максимальний динамічний момент:

$$M_{\text{dyn_max}} = J \cdot \varepsilon_{\text{max}} = 3 \cdot 23,27 = 69,8 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (2.22)$$

Орієнтована потужність привода:

$$P_2 = M_{\text{dyn_max}} \cdot \omega_{\text{max}} = 69,8 \cdot 6,9 = 481,6 \text{ Вт}. \quad (2.23)$$

Орієнтована потужність двигуна:

$$P_{\text{m2}} = \frac{P_2}{0,9} = \frac{481,6}{0,9} = 535 \text{ Вт}, \quad (2.24)$$

де ККД редуктора $\eta_r = 0,9$.

Обираємо двигун VCH2HF0731CA5C серії Lexium 28 [12] (табл. 2.2).

Таблиця 2.2.

Характеристики двигуна VCH2HF0731CA5C

Характеристика	Числове значення
Номінальна напруга, В	220
Номінальна сила струму/піковий, А	4,5/13,23
Опір/фаза до фази, Ом	1,5
Індуктивність/фаза до фази, мГн	6,1
Номінальний/піковий крутний моменти, Н·м	2,39/7,16
Коефіцієнт моменту, (Н·м)/А	0,6
Коефіцієнт проти-ЕРС, В/(рад/с)	0,344
Номінальна потужність, Вт	750
Номінальна швидкість, об/хв	3000
Інерція ротора, кг·м ²	$1,54 \cdot 10^{-4}$
Маса, кг	2,9
Електромеханічна постійна часу, мс	1,12
Електромагнітна постійна часу, мс	4,07

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_{d2} = \frac{\pi \cdot n_{vr2}}{30} = \frac{\pi \cdot 3000}{30} = 314,159 \approx 314 \text{ рад/с.} \quad (2.25)$$

Швидкість холостого ходу:

$$\omega_{0_2} = \frac{\omega_{d2}}{1 - \frac{1}{k_3}} = \frac{314}{1 - \frac{1}{5}} = 393 \text{ рад/с.} \quad (2.26)$$

Коефіцієнт моменту:

$$c_{M2} = 0,6 \text{ (Н·м)/А.} \quad (2.27)$$

Коефіцієнт проти-ЕРС:

$$c_{E2} = 0,344 \text{ В/(рад/с).} \quad (2.28)$$

Передавальне число редуктора:

$$i_{p2} = \text{round} \left(\frac{\omega_{d2}}{\omega_{\max}} \right) = \text{round} \left(\frac{314}{6,9} \right) = 46. \quad (2.29)$$

Момент інерції редуктора, приведений до вала двигуна:

$$J_{p2}'' = 0,1 \cdot J_{d2} = 0,1 \cdot 1,54 \cdot 10^{-4} = 1,54 \cdot 10^{-5} \text{ кг·м}^2. \quad (2.30)$$

Потрібне значення моменту двигуна:

$$\begin{aligned} M_{r2} &= (J_{p2}'' + J_{d2}) \cdot i_{p2} \cdot \varepsilon_{\max} + \frac{1}{i_{p2} \cdot \eta_r} \cdot M_{\text{dyn_max}} = \\ &= (1,54 \cdot 10^{-5} + 1,54 \cdot 10^{-4}) \cdot 46 \cdot 23,27 + \frac{1}{46 \cdot 0,9} \cdot 69,8 = 1,867 \text{ Н·м.} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Отримане значення є на 12% меншим за номінальний момент двигуна, тому вважаємо, що двигун підходить за потрібним моментом.

Електромеханічна постійна часу з навантаженням:

$$T_{m2} = \frac{J_{d2} + J_{p2}'' + \left(\frac{J}{i_{p2}^2}\right)^2}{c_{M2} \cdot c_{E2}} \cdot R_{a2} =$$

$$= \frac{1,54 \cdot 10^{-4} + 1,54 \cdot 10^{-5} + \left(\frac{3}{462}\right)^2}{0,6 \cdot 0,334} \cdot 1,5 = 0,01283 \text{ с.} \quad (2.32)$$

Електромеханічна постійна часу:

$$T_{m2} = 1,12 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \quad (2.33)$$

Електромагнітна постійна часу:

$$T_{e2} = 4,07 \cdot 10^{-3} \text{ с;} \quad (2.34)$$

$$T_{m2} \cdot T_{e2} = 1,12 \cdot 10^{-3} \cdot 4,07 \cdot 10^{-3} = 4,558 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2. \quad (2.35)$$

Коефіцієнт регулятора струму приймаємо на порядок більшим, ніж опір обмотки якоря:

$$k_{c2} = 10 \cdot R_{a2} = 10 \cdot 1,5 = 15 \text{ Ом.} \quad (2.36)$$

Коефіцієнт передачі двигуна за напругою:

$$k_{d2} = \frac{1}{c_{E2}} = \frac{1}{0,344} = 2,9 \text{ 1/(В/(рад/с)).} \quad (2.37)$$

Коефіцієнт передачі двигуна за моментом:

$$k_{M2} = \frac{R_{a2}}{c_{M2} \cdot c_{E2}} = \frac{1,5}{0,6 \cdot 0,344} = 7,2 \text{ 1/(Н·м·с)}. \quad (2.38)$$

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 переміщення будуть визначені при імітаційному моделюванні перехідних процесів.

2.3. Розрахунок електропривода руху третьої ланки

Максимальне прискорення горизонтального руху:

$$a_{x,\max} = 4 \cdot \frac{x_{\max}}{T_x^2} = 4 \cdot \frac{0,09}{0,25^2} = 5,76 \text{ м/с}^2. \quad (2.40)$$

Максимальна швидкість горизонтального руху:

$$v_{x,\max} = a_{x,\max} \cdot \frac{T_x}{2} = 5,76 \cdot \frac{0,25}{2} = 0,72 \text{ м/с}. \quad (2.41)$$

Максимальна сила навантаження:

$$F_{H_{\max 3}} = a_{x,\max} \cdot (m_{gr} + m_3) = 5,76 \cdot (1 + 3) = 23 \text{ Н·м}. \quad (2.42)$$

Орієнтована потужність привода:

$$P_3 = v_{x,\max} \cdot F_{H_{\max 3}} = 0,72 \cdot 23 = 16,5 \text{ Вт}. \quad (2.43)$$

Орієнтована максимальна потужність двигуна:

$$P_{m3} = \frac{P_3}{\eta_r} = \frac{16,5}{0,9} = 18 \text{ Вт}, \quad (2.44)$$

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

Обираємо двигун ВСН2МВА533СА5С серії Lexium 28 [13] (табл. 2.3).

Таблиця 2.3.

Характеристика двигуна ВСН2МВА533СА5С

Характеристика	Числове значення
Номінальна напруга, В	220
Номінальна сила струму/піковий, А	0,64/1,77
Опір/фаза до фази, Ом	31
Індуктивність/фаза до фази, мГн	24,7
Номінальний/піковий крутний моменти, Н·м	0,16/0,48
Коефіцієнт моменту, (Н·м)/А	0,30
Коефіцієнт проти-ЕРС, В/(рад/с)	0,172
Номінальна потужність, Вт	50
Номінальна швидкість, об/хв	3000
Інерція ротора, кг·м ²	$5,40 \cdot 10^{-6}$
Маса, кг	0,40
Електромеханічна постійна часу, мс	3,25
Електромагнітна постійна часу, мс	0,8

Номінальна кутову швидкість:

$$\omega_{d3} = \frac{\pi \cdot n_{vr3}}{30} = \frac{\pi \cdot 3000}{30} = 314,1 \text{ рад/с}. \quad (2.45)$$

Швидкість холостого ходу:

$$\omega_{0-3} = \frac{\omega_{d3}}{1 - \frac{1}{k_3}} = \frac{314,1}{1 - \frac{1}{5}} = 392,6 \text{ рад/с}. \quad (2.46)$$

Коефіцієнт механічної передачі:

$$k_{mp3} = \frac{v_{x,max}}{\omega_{d3}} = \frac{0,72}{314,1} = 0,002292 \text{ м.} \quad (2.47)$$

Електромеханічна постійна часу:

$$\begin{aligned} T_{m3} &= \frac{J_{d3} + (m_{gr} + m_1 + m_2 + m_3) \cdot k_{mp3}^2}{c_{M3} \cdot c_{E3}} \cdot R_{a3} = \\ &= \frac{5,4 \cdot 10^{-6} + (1 + 4 + 7 + 3) \cdot 0,002292^2}{0,3 \cdot 0,172} \cdot 31 = 0,05 \text{ с.} \end{aligned} \quad (2.48)$$

Коефіцієнт моменту:

$$c_{M3} = 0,3 \text{ (Н·м)/А.} \quad (2.49)$$

Коефіцієнт проти-ЕРС:

$$c_{E3} = 0,172 \text{ В/(рад/с).} \quad (2.50)$$

Коефіцієнт передачі двигуна за напругою:

$$k_{d3} = \frac{1}{c_{E3}} = \frac{1}{0,172} = 5,8 \text{ 1/(В/(рад/с)).} \quad (2.51)$$

Коефіцієнт передачі двигуна за моментом:

$$k_{M3} = \frac{R_{a3}}{c_{M3} \cdot c_{E3}} = \frac{31}{0,3 \cdot 0,172} = 600,7 \approx 601 \text{ 1/(Н·м·с).} \quad (2.52)$$

Електромагнітна постійної часу:

$$T_{m3} = 3,25 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \quad (2.53)$$

Електромеханічна постійна часу:

$$T_{e3} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (2.54)$$

$$T_{m3} \cdot T_{e3} = 3,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \cdot 10^{-3} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2. \quad (2.55)$$

Коефіцієнт регулятора струму приймаємо на порядок більшим, ніж опір обмотки якоря:

$$k_{c3} = 10 \cdot R_{a3} = 10 \cdot 31 = 310 \text{ Ом}. \quad (2.56)$$

Параметри ПД-регулятора переміщення будуть визначені при імітаційному моделюванні перехідних процесів.

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

В систему керування інтегровано такі компоненти: три сервоприводи Lexium 28 (по одному на вісь) із вбудованими захистами та функцією STO, оптичні енкодери Series 21 та датчики струму ACHS-7122.

Основні технічні характеристики сервоприводів Lexium 28 наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4.

Технічні характеристики сервоприводів Lexium 28

Характеристика	Опис
Архітектура	Серія АС-сервоприводів Lexium 28 для роботи із сервомоторами BCH2; окремий привод на кожен вісь, що інтегрується в систему керування через інтерфейси CANopen/EtherCAT/Modbus
Напруга живлення	Однофазне або трифазне живлення змінного струму 200...240 В (номінальна напруга 220 В)
Функції безпеки	Безпечне вимкнення моменту (STO), рівень SIL 2 / PL d за EN ISO 13849-1 — для безпечної зупинки приводів
Приводи осі	Окремий привод на кожен з трьох осей (усього три приводи)

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 багатоосьовий 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. Обчислено кінематичні та динамічні параметри руху ланок маніпулятора й виконано підбір приводних двигунів. Для трьох осей руху дібрано безколекторні вентильні двигуни моделей BSH2LD0231CA5C (вісь 1), BSH2HF0731CA5C (вісь 2) та BSH2MBA533CA5C (вісь 3).

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

- три сервоприводи Lexium 28 із вбудованими драйверами;
- оптичні енкодери Series 21 для високоточних вимірювань кута повороту;
- модулі вимірювання струму ACHS-7122 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 системі застосовано безколекторні двигуни постійного струму, які можна описати такими передавальними функціями:

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

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

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.

На основі цих передавальних функцій будуємо структурну схему цифрової системи автоматичного керування (рис. 3.1), де прийнято такі позначення: $u_{\text{пр}}(p)$ – 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.

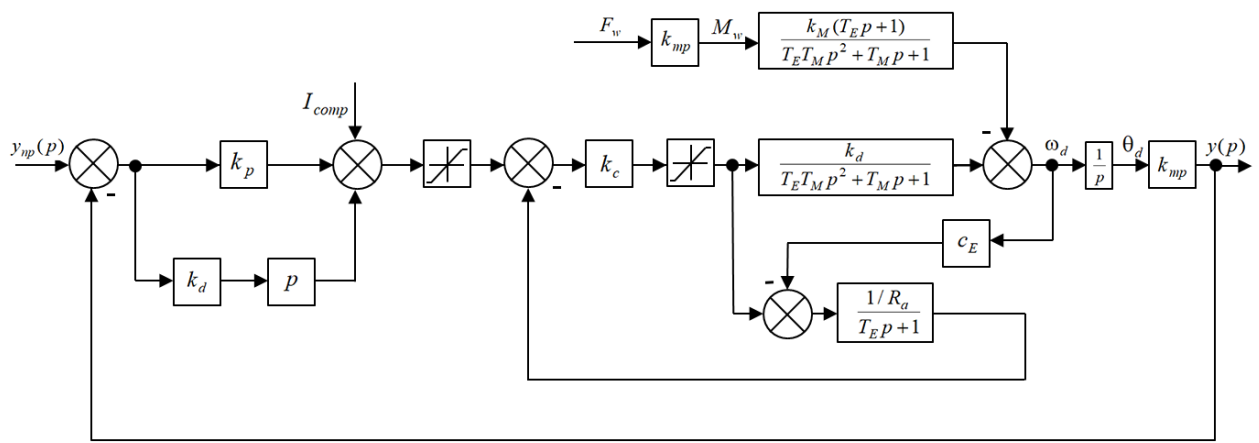


Рис. 3.1. Структурна схема СУ електроприводом робота МП-11

Період дискретизації сигналів у мікроконтролері принаймні на порядок менший за найменшу сталу часу двигуна, тому ці процеси можна вважати неперервними.

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).

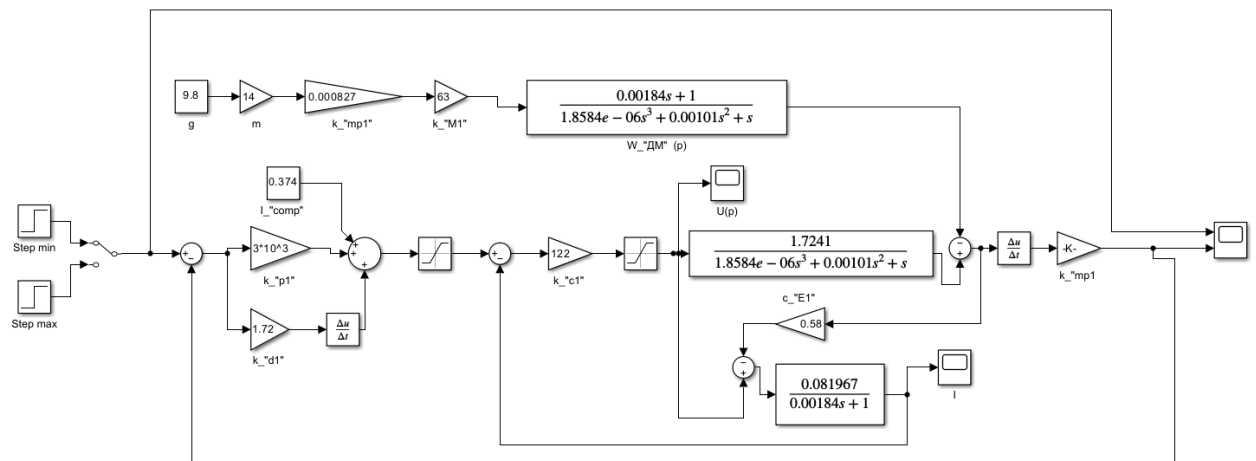


Рис. 3.2. Принципова схема системи керування для першого електропривода

Встановлюємо обмеження струму на ± 5 А, а напруги – у межах ± 220 В.

Підбираємо коефіцієнти ПД-регулятора таким чином, щоб не було перерегулювання, і помилка зменшувалася до допустимого рівня за час, що не перевищує задані 0,5 с: $k_{p1} = 3 \cdot 10^3$, а $k_{d1} = 1.72$.

Досліджуємо перехідні процеси в системі при малому переміщенні, що відповідає лінійній області, і при максимальному переміщенні. Для цього спочатку на вхід подаємо малий сходячковий сигнал такої амплітуди, щоб напруга на обмотці двигуна не виходила за межі ± 220 В. Потім подаємо сигнал, що відповідає максимальному вертикальному переміщенню $y_{\max}$. Отримані графіки перехідних процесів наведено на рис. 3.3 – 3.8.

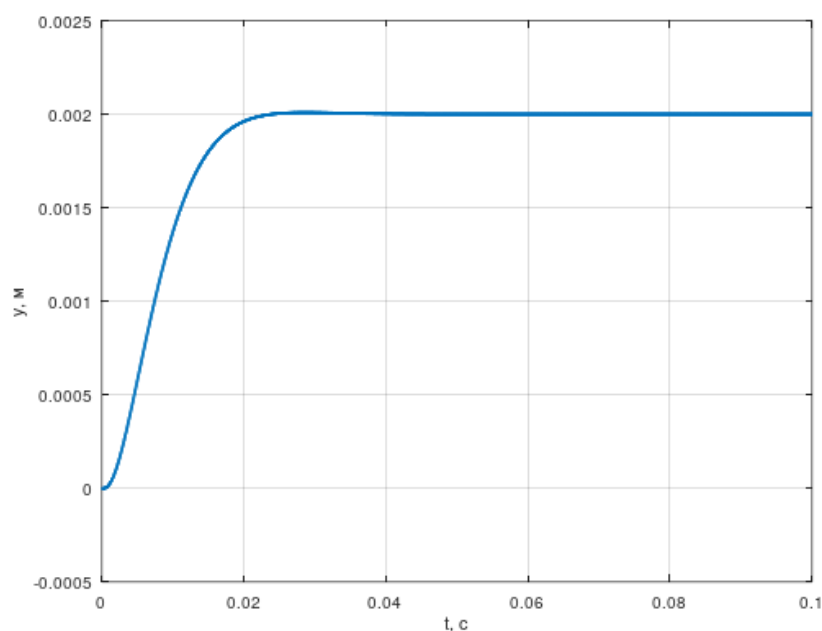


Рис. 3.3. Перехідна характеристика системи при роботі в лінійній зоні

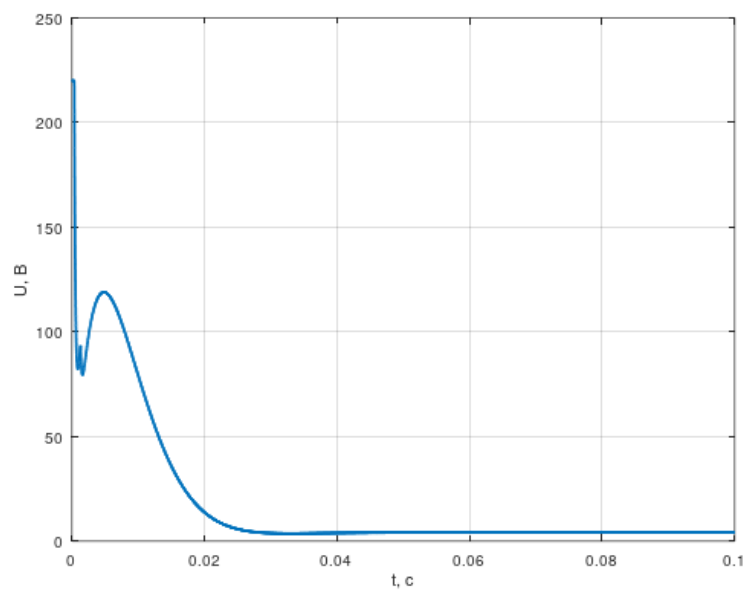


Рис. 3.4. Графік зміни напруги при роботі в лінійній зоні

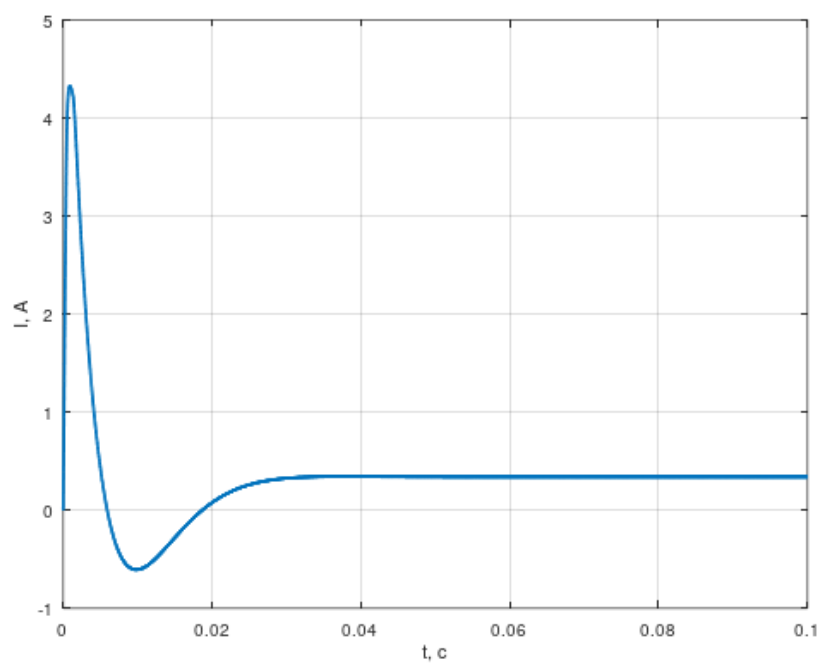


Рис. 3.5. Графік зміни струму при роботі в лінійній зоні

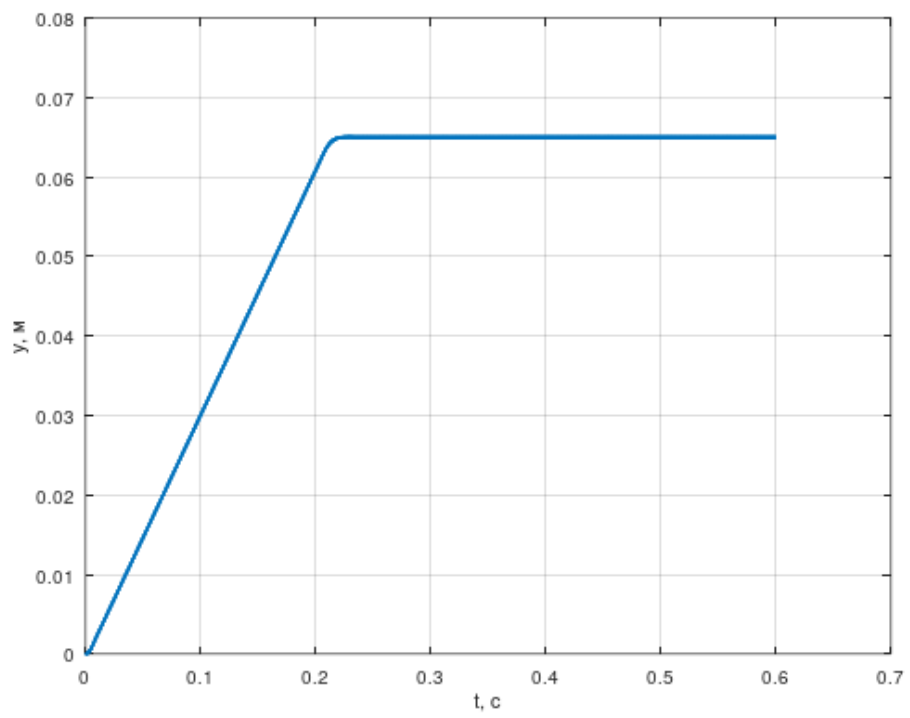


Рис. 3.6. Перехідна характеристика при максимальному вертикальному переміщенні $y_{\max}$

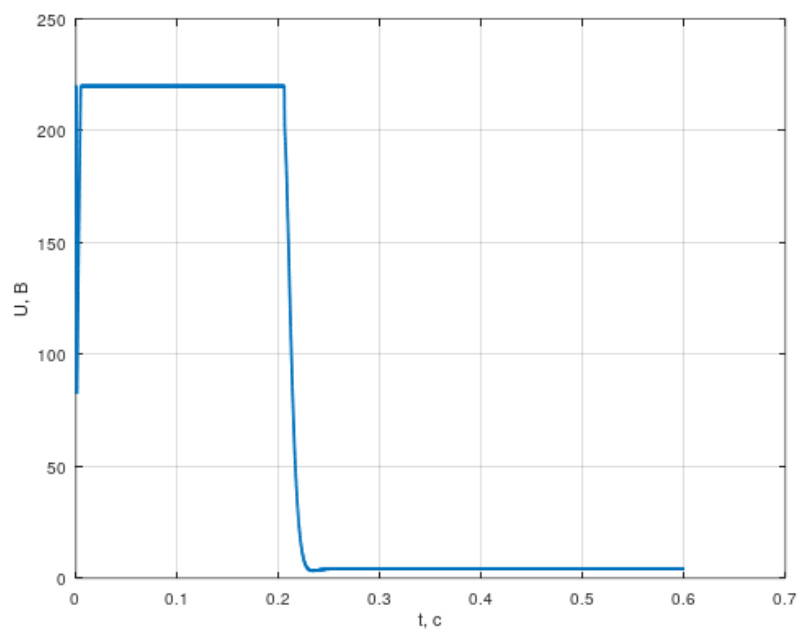


Рис. 3.7. Графік зміни напруги при максимальному вертикальному переміщенні $y_{\max}$

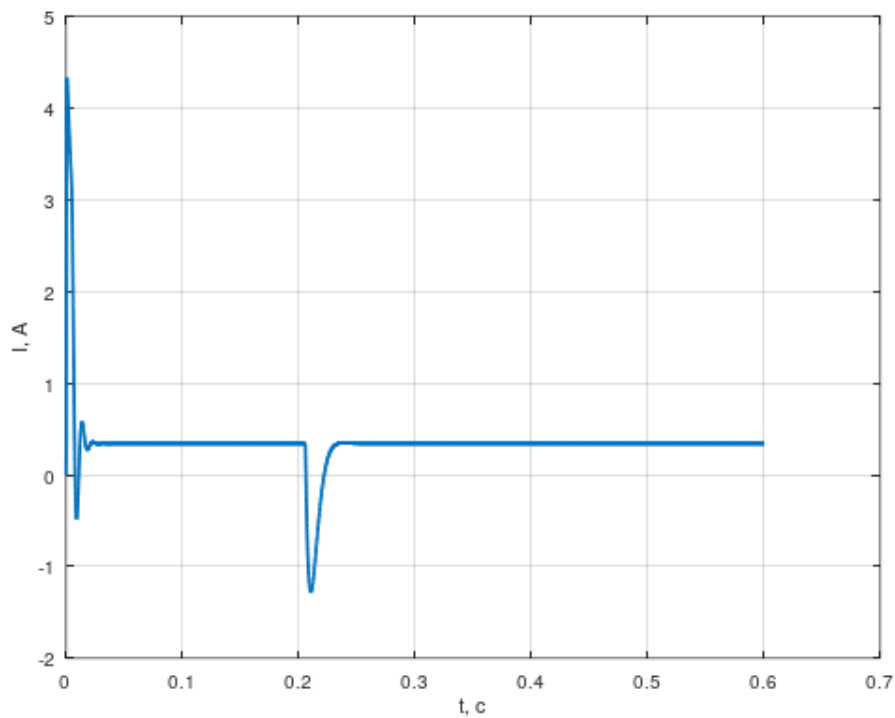


Рис. 3.8. Графік зміни струму при максимальному вертикальному переміщенні

$$y_{\max}$$

За графіком зміни координати переміщення $y(t)$ (рис. 3.6) час перехідного процесу визначаємо як час, за який похибка в системі знижується до $3 \cdot 10^{-3}$ м (максимальна помилка позиціонування). Цей час дорівнює 0,223 с.

При цьому спочатку на обмотку двигуна подається максимальна напруга +220 В (рис. 3.7), яка згодом зменшується до величини $I_{\text{comp}} = 0,374$ А, що компенсує моментну складову помилки.

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

Задаємо обмеження струму на ± 13 А, а обмеження напруги на ± 220 В.

Підбираємо коефіцієнти ПД-регулятора таким чином, щоб не було перерегулювання, і помилка зменшувалася до допустимого рівня за час, що не перевищує задані 0,6 с: $k_{p2} = 4 \cdot 10^2$, а $k_{d2} = 2.9$.

Досліджуємо перехідні процеси в системі при малому переміщенні, що відповідає лінійній області, і при максимальному переміщенні. Для цього спочатку на вхід подаємо малий сходячковий сигнал такої амплітуди, щоб

напруга на обмотці двигуна не виходила за межі ± 220 В. Потім подаємо сигнал, що відповідає максимальному кутовому переміщенню $\varphi_{\max}$. Отримані графіки перехідних процесів наведено на рис. 3.10 – 3.15.

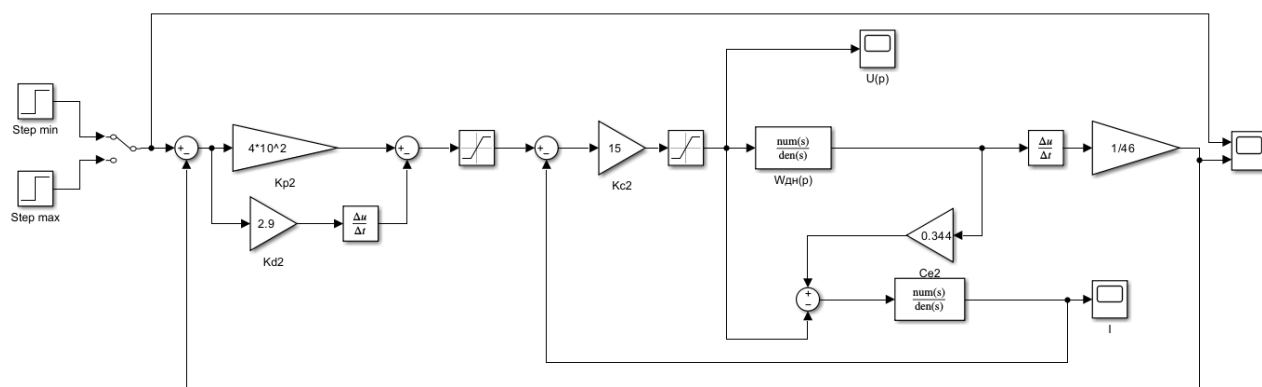


Рис. 3.9. Принципова схема системи керування для другого електропривода

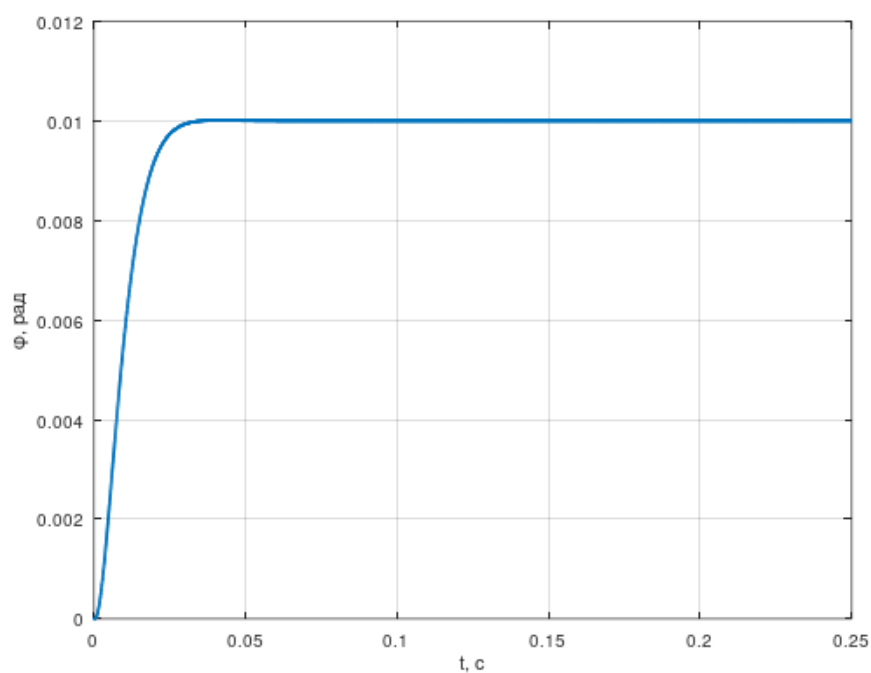


Рис. 3.10. Перехідна характеристика системи при роботі в лінійній зоні

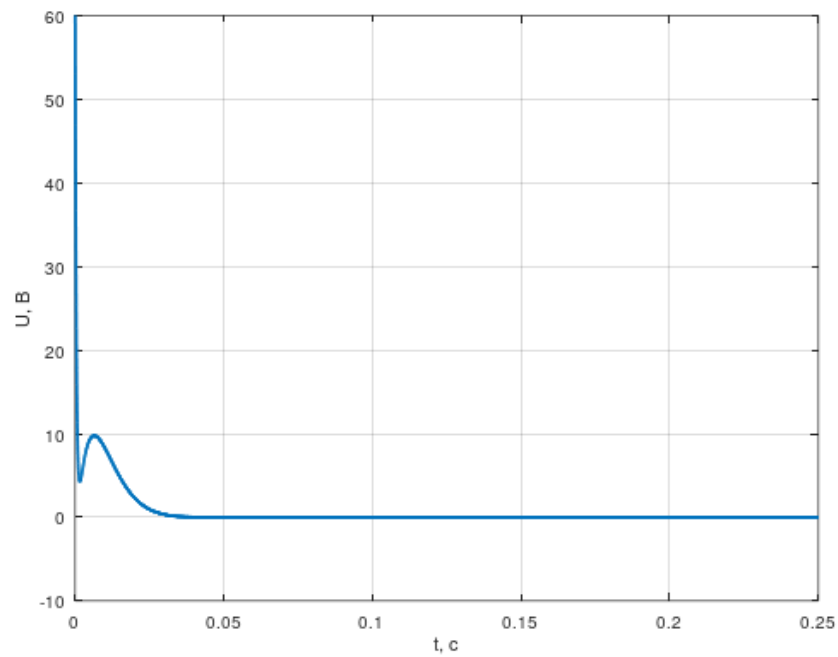


Рис. 3.11. Графік зміни напруги при роботі в лінійній зоні

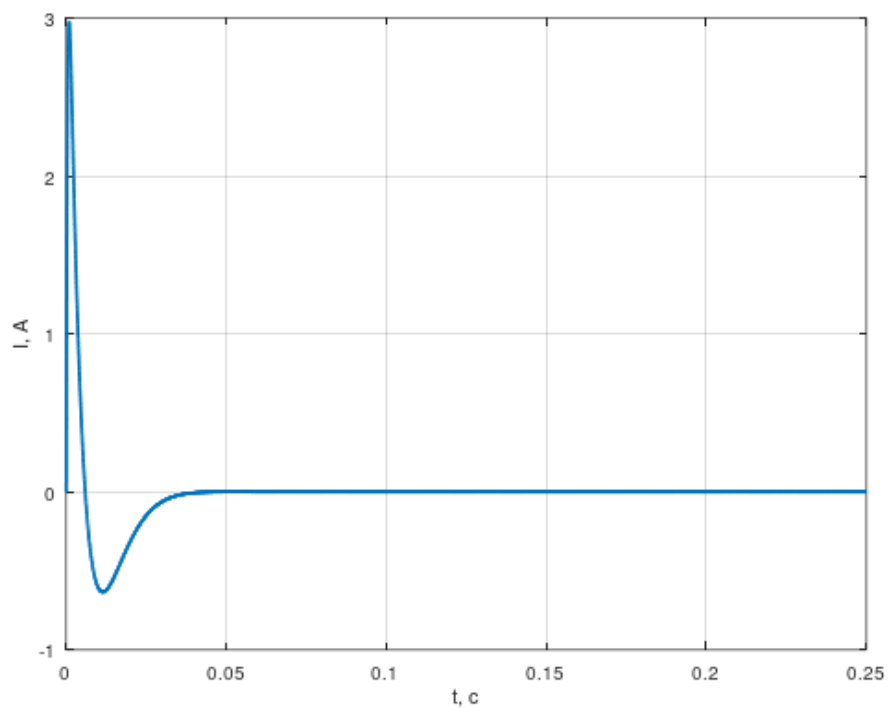


Рис. 3.12. Графік зміни струму при роботі в лінійній зоні

За графіком зміни координати переміщення $\varphi(t)$ визначаємо час перехідного процесу як час, за який помилка в системі досягає величини $4 \cdot 10^{-2}$ рад (максимальна помилка позиціонування при кутовому переміщенні). Цей час дорівнює 0,32 с.

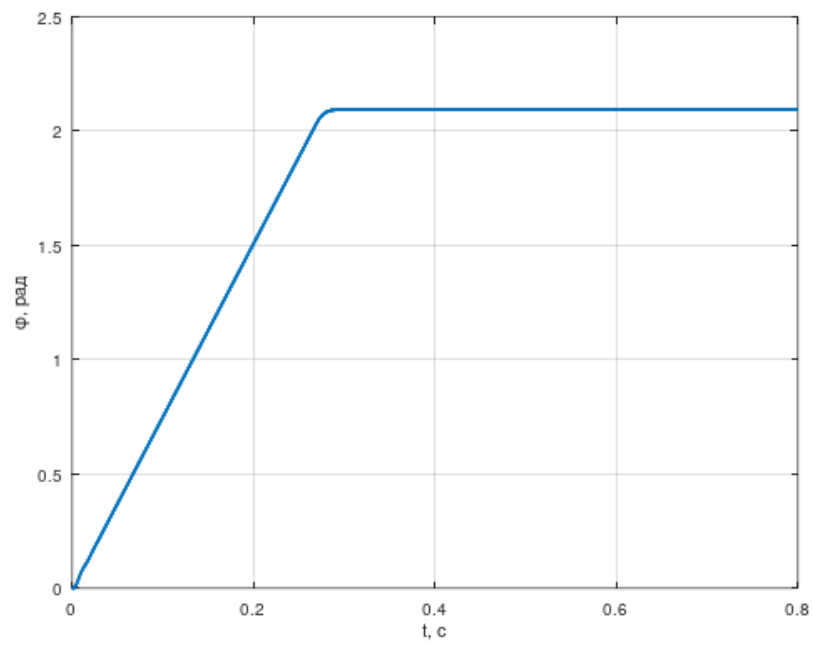


Рис. 3.13. Перехідна характеристика при максимальному кутовому переміщенні

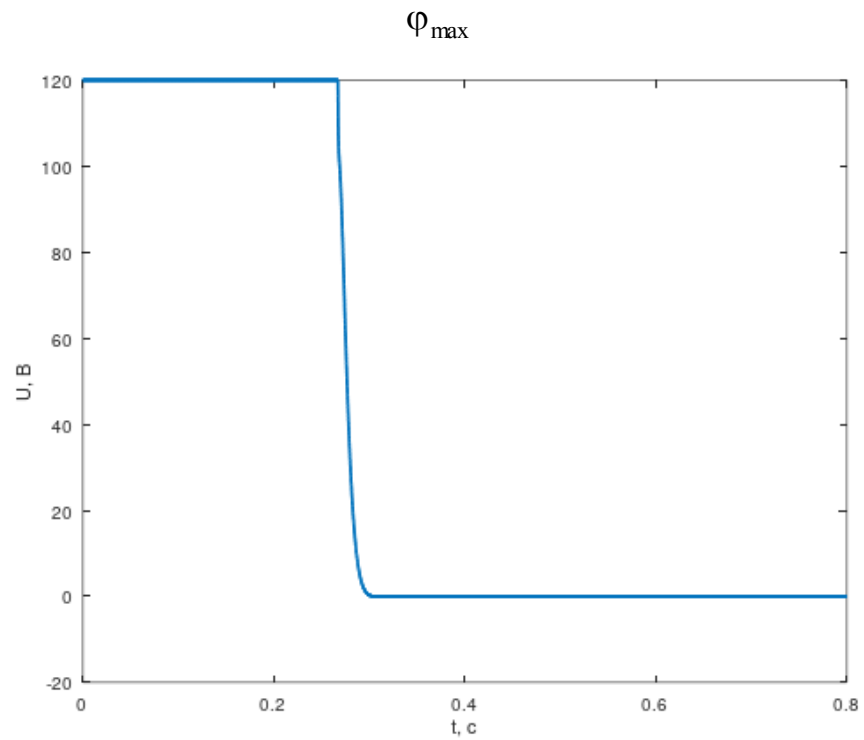


Рис. 3.14. Графік зміни напруги при максимальному кутовому переміщенні

$\varphi_{\max}$

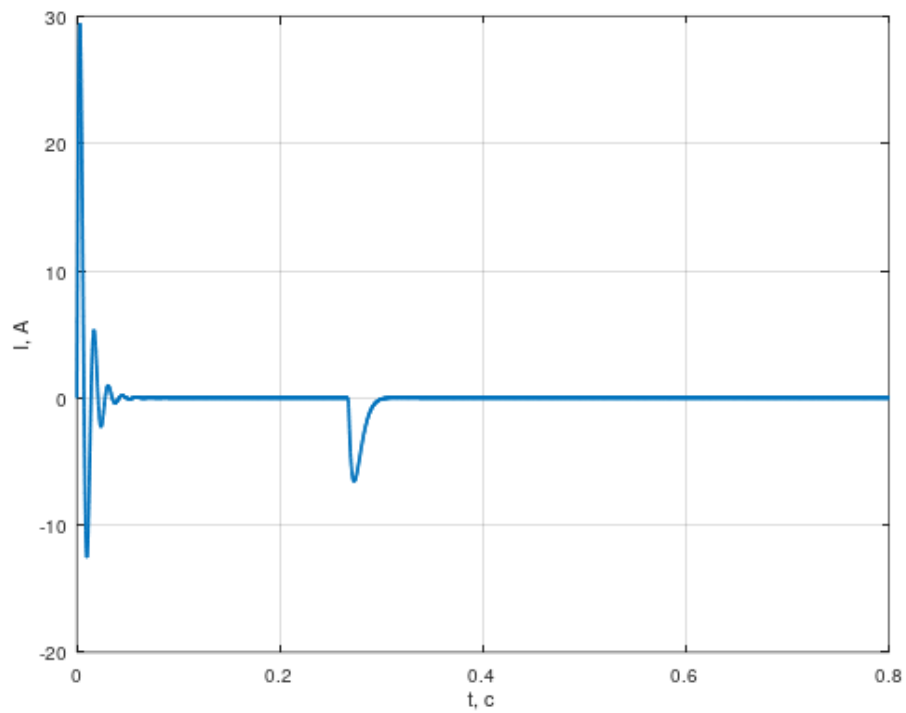


Рис. 3.15. Графік зміни струму при максимальному кутовому переміщенні $\varphi_{\max}$

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

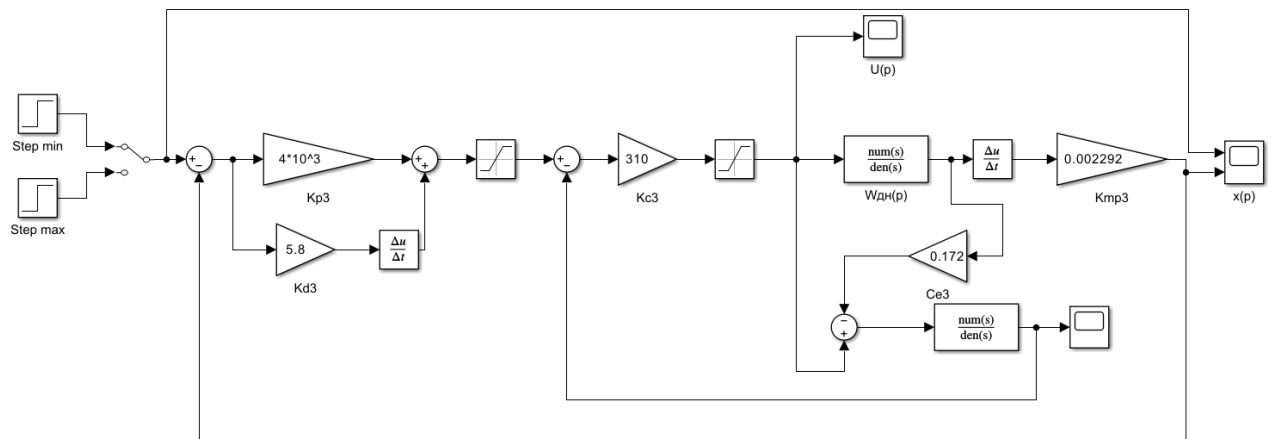


Рис. 3.16. Принципова схема системи керування для третього електропривода

Встановлюємо граничні значення струму в межах ± 6 А, та напруги в ± 220 В.

Підбираємо коефіцієнти ПД-регулятора таким чином, щоб не було перерегулювання, і помилка зменшувалася до допустимого рівня за час, що не перевищує задані 0,25 с: $k_{p3} = 4 \cdot 10^3$, а $k_{d3} = 5.8$.

Досліджуємо перехідні процеси в системі при малому переміщенні, що відповідає лінійній області, і при максимальному переміщенні. Для цього спочатку на вхід подаємо малий сходячковий сигнал такої амплітуди, щоб напруга на обмотці двигуна не виходила за межі ± 220 В. Потім подаємо сигнал, що відповідає максимальному горизонтальному переміщенню $x_{\max}$. Отримані графіки перехідних процесів наведено на рис. 3.17 – 3.22.

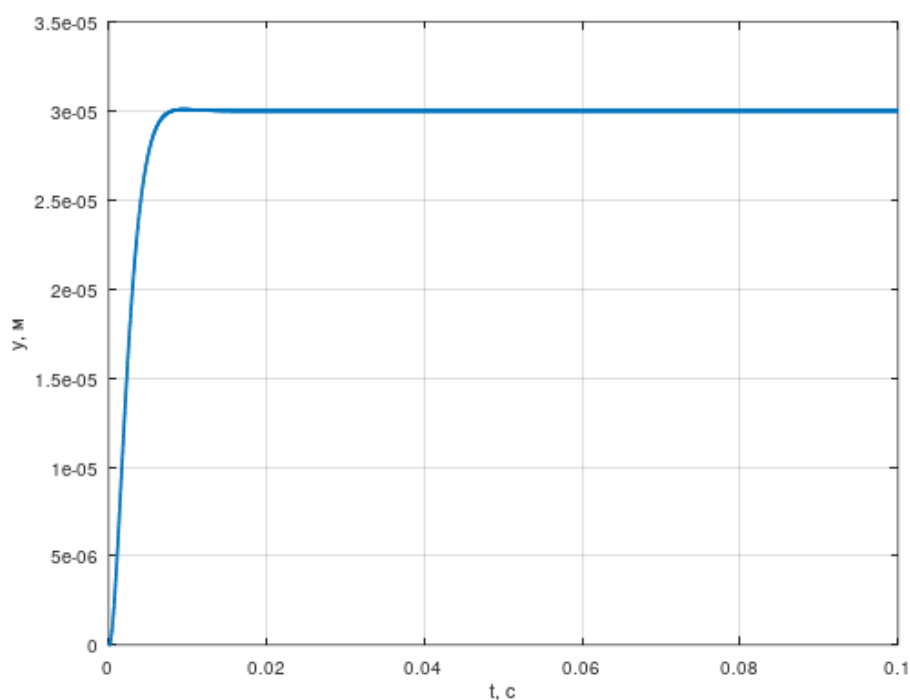


Рис. 3.17. Перехідна характеристика системи при роботі в лінійній зоні

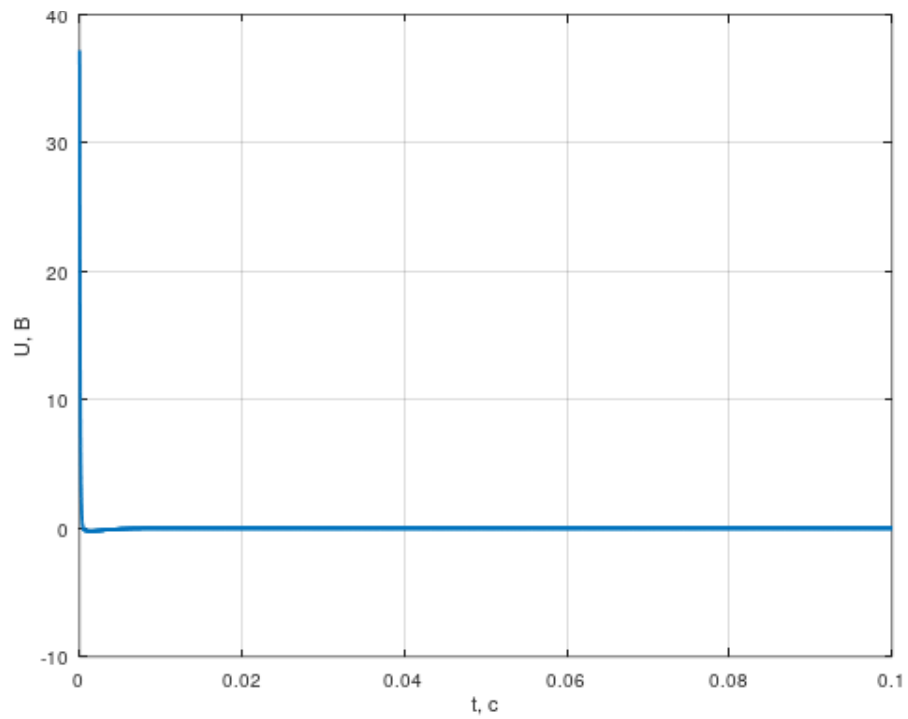


Рис. 3.18. Графік зміни напруги при роботі в лінійній зоні

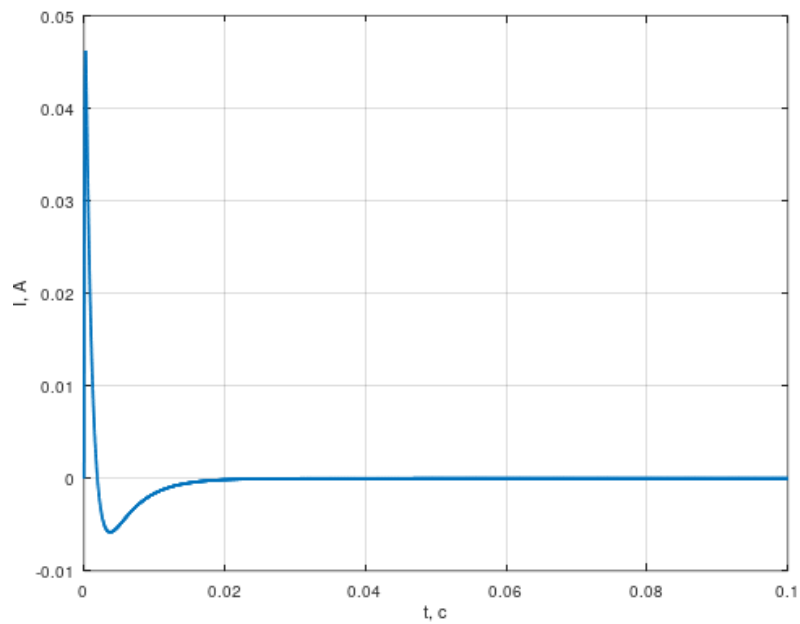


Рис. 3.19. Графік зміни струму при роботі в лінійній зоні

Отримані графіки перехідних процесів приведені на рис. 3.20, 3.21 та 3.22. За графіком зміни координати переміщення $x(t)$ (рис. 3.20) визначаємо час перехідного процесу як час, за який помилка в системі досягає величини $4 \cdot 10^{-3}$ (максимальна помилка позиціонування). Цей час дорівнює 0,18 с.

Крива на рис. 3.21 показує, що спочатку на обмотку двигуна подається напруга +220 В, яка потім поступово спадає до нуля.

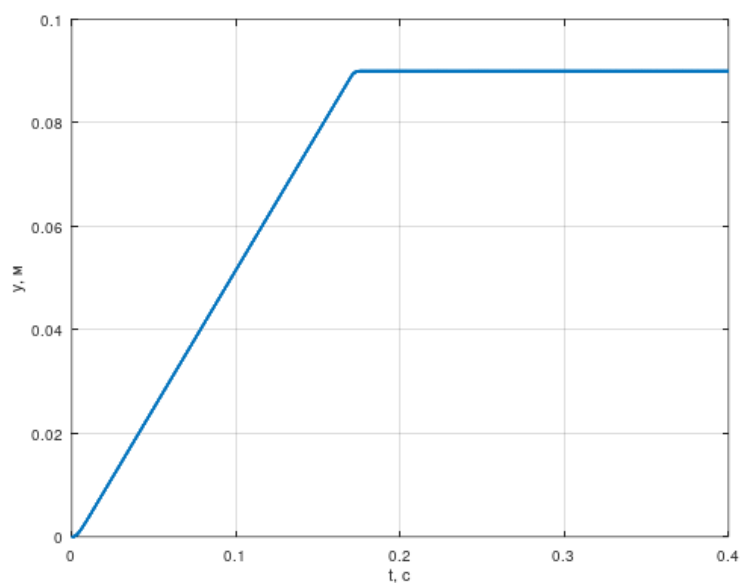


Рис. 3.20. Перехідна характеристика при максимальному горизонтальному переміщенні $x_{\max}$

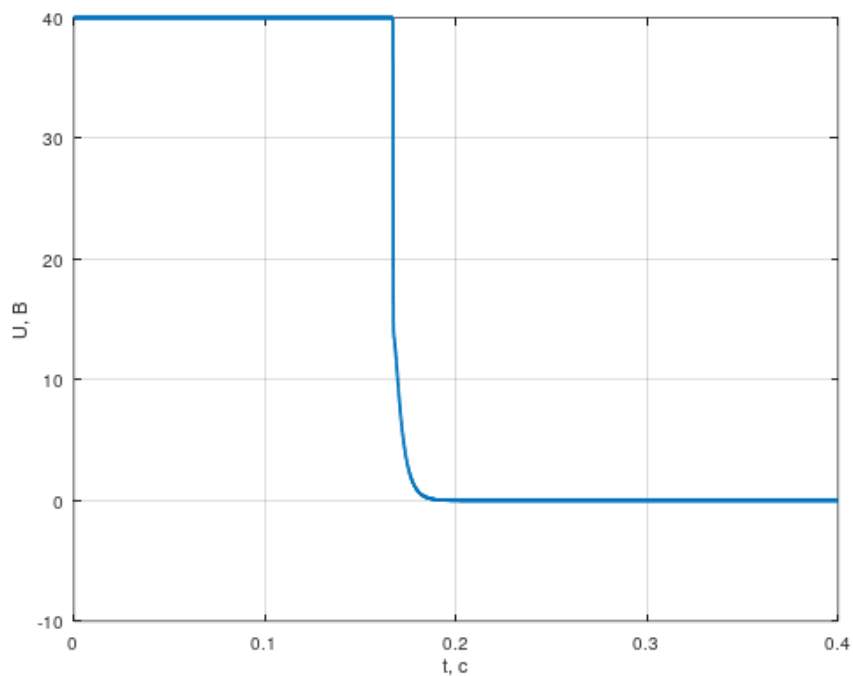


Рис. 3.21. Графік зміни напруги при максимальному горизонтальному переміщенні $x_{\max}$

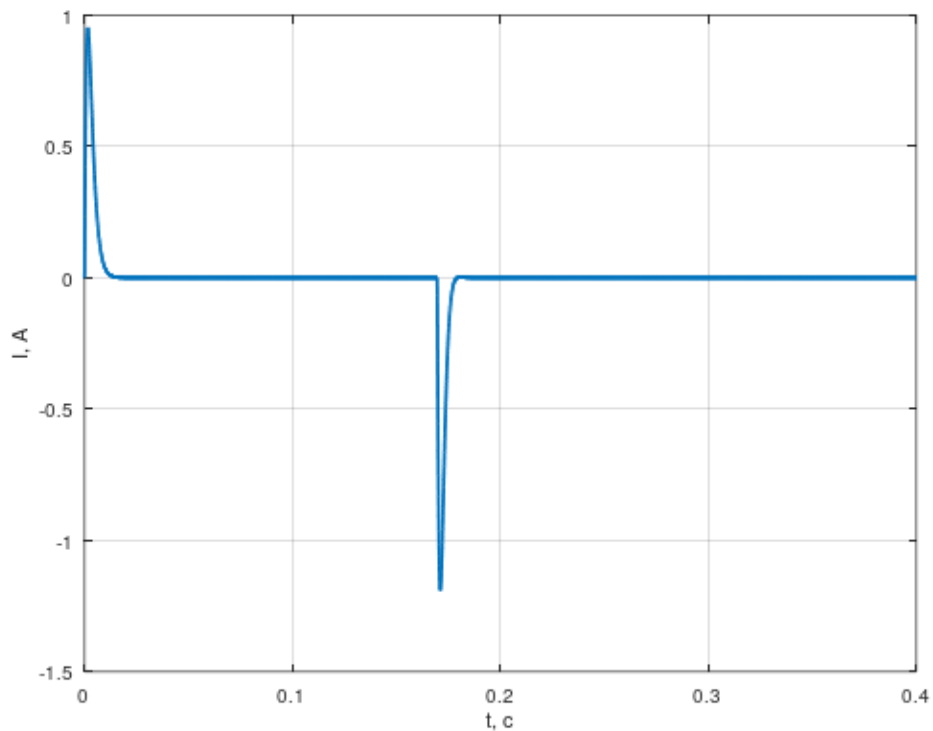


Рис. 3.22. Графік зміни струму при максимальному горизонтальному переміщенні $x_{\max}$

За кривими перехідних процесів обчислено показники якості керування, що відображають швидкодію системи з електроприводом.

Висновки за розділом 3

У розділі побудовано динамічну модель системи керування трьома електроприводами робота МП-11 у графічному середовищі Simulink, а також відповідну математичну модель. Її побудовано за розробленою структурною схемою із заданими обмеженнями струму та напруги живлення двигунів. Для кожного привода змодельовано перехідні процеси при малих і максимальних ступінчастих сигналах. Одержані характеристики засвідчують відсутність перерегулювання й дають змогу обчислити ключові показники якості керування.

Перший електропривод: на малий ступінчастий вхід система реагує стабільно, без перерегулювання. За максимального сигналу час перехідного

процесу становить 0,223 с, а максимальна помилка позиціонування $3 \cdot 10^{-3}$ м. Графік реакції системи відображає лінійний характер переходу без коливань.

Другий електропривод: модель так само не має перерегулювання на малому вході. Напруга на обмотці не перевищує ± 220 В, що забезпечує безпечну роботу в заданих межах. Час перехідного процесу становить 0,32 с та відрізняється плавністю без перевищення амплітуди заданих сигналів при помилки $4 \cdot 10^{-2}$.

Третій електропривод: за мінімального ступінчастого сигналу перерегулювання теж немає. Для максимального горизонтального сигналу час перехідного процесу становить 0,18 с, а похибка позиціонування дорівнює $4 \cdot 10^{-3}$ м. Система швидко виходить на задану координату без затримок.

Моделювання підтвердило, що перехід на електроприводи помітно підвищує швидкодію системи керування порівняно з пневмоприводами. Значно менші часи перехідних процесів (порядку десятих часток секунди) разом із точністю регулювання суттєво прискорюють відгук робота. Отже, заміна пневмоприводів безколекторними двигунами істотно поліпшує оперативні характеристики системи.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці — це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності [22]. Правовою основою організації охорони праці в Україні є Закон України «Про охорону праці», який визначає основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їхнього життя і здоров'я в процесі праці та встановлює єдиний порядок організації охорони праці незалежно від форми власності й виду діяльності підприємства [16].

Упровадження промислового робота МП11 у виробничий процес підвищує продуктивність праці й усуває людину від виконання монотонних, важких та небезпечних операцій. Водночас застосування роботизованого комплексу створює специфічні джерела небезпеки, зумовлені наявністю рухомих ланок, що переміщуються зі значними швидкостями та зусиллями, потужних електроприводів і автоматичної системи керування, здатної ініціювати рух без безпосередньої участі людини. Особливістю роботизованих систем є те, що траєкторія руху робота може бути непередбачуваною для персоналу, а сам рух — раптовим, без видимих попереджувальних ознак. Тому система керування роботом, розроблена в попередніх розділах, має від самого початку проектування враховувати вимоги безпеки, закладені у відповідних законодавчих актах і стандартах [17, 18].

Метою цього розділу є аналіз нормативно-правової бази у сфері безпеки промислових роботів, виявлення та оцінювання небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що супроводжують експлуатацію робота МП11, а також обґрунтування комплексу технічних та організаційних заходів, які забезпечують безпечні та нешкідливі умови праці обслуговуючого персоналу.

4.1. Нормативно-правова база охорони праці при експлуатації промислових роботів

Система нормативно-правових актів з охорони праці в Україні має ієрархічну структуру: Конституція України, закони, підзаконні акти (постанови, накази), державні стандарти (ДСТУ), будівельні (ДБН) та санітарні (ДСН) норми, а також нормативні акти, що діють у межах окремого підприємства [20]. Основоположним документом є Закон України «Про охорону праці», що регулює відносини між роботодавцем і працівником у галузі безпеки, гігієни праці та виробничого середовища [16].

Закон установлює, що роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці умови праці відповідно до нормативно-правових актів, забезпечити дотримання вимог щодо охорони праці під час експлуатації устаткування, організувати навчання та інструктаж працівників, провести оцінювання технічного стану обладнання й виробничого середовища. Працівник, своєю чергою, зобов'язаний дбати про власну безпеку і здоров'я та про безпеку оточуючих, знати й виконувати вимоги нормативних актів з охорони праці [16, 21].

Спеціальні вимоги до безпечності промислових роботів в Україні гармонізовано з міжнародними стандартами серії ISO 10218, що прийняті як національні. Вони поділяють вимоги на два рівні: до самого робота як машини (частина 1) та до роботизованої системи й комірки в цілому (частина 2).

Стандарт ДСТУ EN ISO 10218-1:2018 установлює вимоги щодо безпечності конструкції промислового робота — маніпулятора разом із системою керування — і призначений насамперед для виробника обладнання [17]. До основних вимог цього стандарту належать:

- обов'язкова наявність функції аварійного зупину, яка має пріоритет над усіма іншими функціями та командами й переводить робота у безпечний стан;
- реалізація захисного зупину з можливістю під'єднання зовнішніх захисних пристроїв — огорож, оптичних бар'єрів, чутливих килимів;

- обмеження робочого простору робота механічними упорами та програмними засобами (обмеження кутів повороту й величини переміщення ланок);
- режим керування зі зниженою швидкістю переміщення характерної точки інструмента — не більш як 250 мм/с — для безпечного налагодження, навчання та діагностики;
- принцип єдиної точки керування, що унеможливорює одночасне керування роботом із кількох пультів;
- контроль швидкості та обмеження зусилля й потужності під час операцій, що передбачають можливу присутність людини у робочій зоні;
- самодіагностика системи керування та перехід у безпечний стан у разі виявлення несправності.

Стандарт ДСТУ EN ISO 10218-2:2018 поширюється на роботизовані системи, їх інтеграцію та поєднання з іншим технологічним обладнанням у складі робочих комірок і адресований інтегратору та користувачеві [18]. Він регламентує порядок оцінювання ризиків, вимоги до планування робочого простору, огороження небезпечних зон, організації безпечного доступу персоналу, а також правила введення системи в експлуатацію, її верифікації та обслуговування. Саме на підставі цього стандарту визначають межі захищеного простору навколо робота МП11 та обирають раціональну комбінацію захисних засобів.

Окремо стандарт ДСТУ EN ISO 10218-1:2018 регламентує режими спільної (колаборативної) роботи людини й робота в одному просторі, передбачаючи чотири основні методи забезпечення безпеки: контрольований безпечний зупин робота за наявності людини в робочій зоні; ручне скероване переміщення робота оператором; контроль швидкості та дистанції між роботом і людиною; обмеження потужності та зусилля контакту до безпечних значень [17]. Для робота МП11, що працює переважно в автоматичному режимі з огороженням, основним є метод контрольованого безпечного зупину, проте

врахування зазначених принципів підвищує загальний рівень безпеки під час налагоджувальних робіт.

Загальні принципи безпеки життєдіяльності та охорони праці, методика аналізу виробничих факторів, питання виробничої санітарії, електробезпеки та надання першої допомоги докладно викладено у фаховій літературі [20, 21], термінологію уніфіковано стандартом ДСТУ 2293:2014 [22]. Положення цих джерел покладено в основу подальшого аналізу.

Невиконання вимог нормативно-правових актів з охорони праці тягне за собою дисциплінарну, адміністративну, матеріальну або кримінальну відповідальність винних осіб залежно від характеру й тяжкості порушення та його наслідків [16, 21]. Це підкреслює обов'язковість дотримання розглянутих вимог на всіх етапах життєвого циклу роботизованого комплексу.

4.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при експлуатації робота МП11

Згідно з прийнятою класифікацією небезпечні та шкідливі виробничі фактори поділяють на чотири групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні [20, 22]. Небезпечним вважається фактор, вплив якого на працівника може призвести до травми або іншого раптового різкого погіршення здоров'я, а шкідливим — фактор, вплив якого спричиняє захворювання або зниження працездатності. Для роботизованого комплексу на базі робота МП11 визначальними є фізичні фактори, пов'язані з рухом механічних ланок та роботою електроприводів; інші групи факторів мають супутній характер.

Механічні небезпеки.

Робот МП11 має три керовані ступені рухливості з лінійними та обертальним переміщеннями ланок. Розраховані в розділі 2 максимальні швидкості руху (до 0,72 м/с для горизонтального переміщення та близько 6,9 рад/с для повороту другої ланки) у поєднанні зі значними переносними масами створюють небезпеку травмування персоналу внаслідок: удару рухомою ланкою або захватним пристроєм; защемлення (роздавлювання) між рухомою

ланкою та нерухомими елементами обладнання чи будівельними конструкціями; зтягування у зону руху механізмів; випадкового випадання предмета із захватного пристрою під час транспортування на високій швидкості. Найбільшу небезпеку становлять непередбачувані рухи робота, спричинені збоями системи керування, оскільки персонал не встигає на них зреагувати.

Ураження електричним струмом.

Живлення електроприводів робота здійснюється від джерела постійного струму з номінальною напругою до 220 В, а сумарний струм стійки контролера руху може досягати 40 А. Дотик до струмопровідних частин, що опинилися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, замикання на корпус або помилкових дій, може спричинити електротравму. Тяжкість ураження залежить від сили струму, його роду й частоти, тривалості проходження, шляху через тіло людини та індивідуальних особливостей організму [20]. Пороговий відчутний струм промислової частоти становить близько 0,5–1,5 мА, невідпускаючий — 10–15 мА, а струм понад 100 мА вважається смертельно небезпечним. Найнебезпечнішими є шляхи проходження струму «рука — рука» та «рука — ноги», за яких струм проходить через ділянку серця.

Несприятливий мікроклімат.

Параметри мікроклімату робочої зони — температура, відносна вологість та швидкість руху повітря — нормуються санітарними нормами ДСН 3.3.6.042-99 [23]. Робота електроприводів, перетворювачів та контролера супроводжується виділенням теплоти, що може спричинити підвищення температури повітря понад допустимі межі. За температури повітря понад +35 °С прискорюється старіння та висихання ізоляційних матеріалів, що знижує електробезпеку обладнання, а тривале перебування персоналу в нагрітому середовищі викликає перегрівання організму та зниження працездатності.

Запиленість і хімічні фактори.

Наявність у повітрі робочої зони струмопровідного пилу погіршує умови охолодження обладнання, забруднює ізоляційні проміжки та може спричинити

пробій ізоляції. Агресивні пари й кислоти, що можуть бути присутні в окремих виробничих приміщеннях, прискорюють корозію елементів конструкції та контактних з'єднань, погіршуючи надійність і безпеку роботи комплексу.

Шум і вібрація.

Робота електродвигунів, редукторів та механічних передач робота супроводжується випромінюванням виробничого шуму та вібрації, що нормуються ДСН 3.3.6.037-99 [25]. Тривалий вплив підвищеного рівня шуму призводить до зниження слухової чутливості, втоми, погіршення концентрації уваги, а локальна та загальна вібрація негативно впливають на опорно-руховий апарат і нервову систему працівника.

Електромагнітні поля.

Силові кола живлення та широтно-імпульсні перетворювачі системи керування електроприводами є джерелами електромагнітних полів. За недостатнього екранування ці поля можуть негативно впливати на самопочуття персоналу та спричиняти завади у роботі вимірювальних і керуючих кіл, що опосередковано знижує безпеку системи.

Недостатнє освітлення.

Рациональне освітлення робочих місць є важливою умовою безпеки та продуктивності праці. Норми природного і штучного освітлення виробничих приміщень встановлено ДБН В.2.5-28:2018 [24]. Недостатня або нерівномірна освітленість зони обслуговування робота утруднює зорове сприйняття, підвищує втому очей та ймовірність помилкових дій персоналу під час налагодження й технічного обслуговування.

Психофізіологічні фактори.

Праця оператора, що контролює автоматизований комплекс, пов'язана з нервово-емоційним напруженням, монотонністю та необхідністю тривалої концентрації уваги. Перебування поряд із діючим обладнанням під час налагодження підвищує ризик помилкових дій. Як свідчить статистика, більшість нещасних випадків під час експлуатації промислових роботів трапляється саме в режимах введення в експлуатацію, програмування,

тестування та технічного обслуговування, коли персонал перебуває безпосередньо в зоні дії робота [18].

Аналіз причин аварій під час експлуатації промислових роботів свідчить, що понад половину інцидентів спричинено збоями в електронних колах систем керування, тоді як на людський фактор припадає менша частка випадків [18]. До найпоширеніших причин надзвичайних ситуацій належать: несанкціонований доступ персоналу до робочої зони під час руху робота; помилки програмування траєкторії; відмови давачів та виконавчих елементів; недостатня надійність захисних блокувань; порушення регламенту технічного обслуговування. Це означає, що значну частину небезпек неможливо усунути лише належною поведінкою персоналу, тому вирішального значення набувають технічні засоби безпеки, закладені на етапі проектування системи керування.

4.3. Оцінювання ризиків та визначення захищеного простору

Відповідно до ДСТУ EN ISO 10218-2:2018 проектування безпечної роботизованої системи розпочинається з оцінювання ризиків [18]. Процедура передбачає послідовне виконання таких етапів: визначення меж системи та режимів її експлуатації; ідентифікацію небезпек на всіх стадіях життєвого циклу (монтаж, налагодження, штатна робота, обслуговування, демонтаж); оцінювання величини ризику за ймовірністю настання та тяжкістю можливих наслідків; вибір і впровадження заходів зниження ризику; повторне оцінювання залишкового ризику.

Заходи зниження ризику застосовують у визначеній стандартами послідовності: спочатку — конструктивні (усунення небезпеки на етапі проектування), потім — технічні захисні засоби й додаткові захисні заходи, і лише на останньому місці — інформування користувача (знаки, попередження, інструкції). Такий підхід забезпечує максимальну ефективність системи безпеки незалежно від поведінки персоналу.

Важливим параметром безпеки є мінімальна захисна відстань від межі небезпечної зони до пристрою виявлення присутності людини. Її розраховують

з урахуванням швидкості наближення людини та сумарного часу зупину обладнання за залежністю:

$$S = K \cdot T + C,$$

де S — мінімальна захисна відстань, мм; K — швидкість наближення частини тіла людини (приймається 2000 мм/с); T — сумарний час спрацьовування захисного пристрою та повного зупину робота, с; C — додаткова відстань, що враховує можливе проникнення у небезпечну зону до спрацьовування захисту, мм.

Для робота МП11 час реагування системи керування на сигнал захисного пристрою та механічного гальмування приводів орієнтовно становить $T \approx 0,25$ с. Приймавши $C = 0$ для суцільного огороження, отримуємо мінімальну захисну відстань $S = 2000 \cdot 0,25 = 500$ мм. На цю величину межа захищеного простору має бути віддалена від крайнього положення рухомих ланок, що враховують під час компонування робочої комірки.

Після впровадження заходів безпеки виконують повторне оцінювання залишкового ризику та перевіряють відповідність системи вимогам стандартів. Введенню роботизованої системи в експлуатацію передують її верифікація та валідація: перевірка функціонування аварійного й захисного зупину, блокувань дверей огороження, обмежень робочого простору та коректності реакції системи керування на нештатні ситуації [18]. Результати перевірки документують, а виявлені невідповідності усувають до початку штатної експлуатації.

4.4. Технічні заходи безпеки при експлуатації робота МП11

За результатами оцінювання ризиків для робота МП11 обґрунтовано такий комплекс технічних заходів безпеки, що відповідають вимогам ДСТУ EN ISO 10218-1:2018 та ДСТУ EN ISO 10218-2:2018 [17, 18]:

1. Зонування та огороження робочого простору. Зону руху ланок робота відокремлюють захисним огороженням заввишки не менш як 1,4 м, що унеможливорює випадковий доступ людини. Вхід до захищеної

зони здійснюється через двері, обладнані блокувальним вимикачем, який автоматично переводить робота у безпечний стан у разі їх відчинення.

2. Система аварійного зупину. Сервоприводи Lexium 28, обрані в розділі 2, реалізують функцію аварійного зупину з найвищим пріоритетом, а також безпечне вимкнення моменту (STO). Органи аварійного зупину (грибоподібні кнопки червоного кольору на жовтому тлі) установлюють на пульті керування та дублюють уздовж лінії переміщення персоналу з інтервалом не більш як 4 м.
3. Обмеження робочого простору. Діапазон руху кожної ланки обмежують механічними упорами та програмно — введенням у систему керування граничних значень координат, що узгоджується з обмеженнями, закладеними в математичній моделі приводів (розділ 3).
4. Обмеження струму та напруги приводів. У системі керування електроприводами встановлено програмні обмеження струму та напруги живлення двигунів (± 5 А, ± 13 А та ± 6 А за струмом — відповідно для першого, другого й третього приводів — та до ± 220 В за напругою). Окрім забезпечення коректних перехідних процесів, ці обмеження запобігають аварійним перевантаженням двигунів і силових кіл, знижуючи ризик їх перегрівання та займання.
5. Безперервний контроль стану приводів. Оптичні енкодери Series 21 та датчики струму ACHS-7122, інтегровані в систему керування, забезпечують безперервний контроль положення й струму двигунів. У разі відхилення параметрів за допустимі межі контролер ініціює захисний зупин, що дає змогу виявити несправність до виникнення небезпечної ситуації.
6. Режим зниженої швидкості. Для налагодження, навчання та діагностики передбачено режим керування зі зниженою (до 250 мм/с) швидкістю руху, що мінімізує можливі наслідки контакту з персоналом.

7. Світлова та звукова сигналізація. Пуск робота в автоматичному режимі супроводжується попереджувальним звуковим та світловим сигналом; небезпечні елементи мають сигнальне забарвлення та відповідні знаки безпеки.

4.5. Електробезпека системи керування електроприводами

Електротравми поділяють на місцеві (опіки, електричні знаки, металізація шкіри) та загальні (електричні удари), за яких уражається весь організм. Залежно від тяжкості розрізняють чотири стадії електричного удару: I — судомне скорочення м'язів без втрати свідомості; II — судомне скорочення м'язів із втратою свідомості, але зі збереженням дихання й роботи серця; III — втрата свідомості з порушенням серцевої діяльності або дихання; IV — стан клінічної смерті (відсутність дихання та кровообігу) [20]. Розуміння механізму ураження обґрунтовує необхідність комплексу захисних заходів.

За ступенем небезпеки ураження електричним струмом виробничі приміщення поділяють на приміщення без підвищеної небезпеки, з підвищеною небезпекою та особливо небезпечні [20]. Приміщення, де розташовано роботизований комплекс із металевими струмопровідними підлогами та можливістю одночасного дотику до заземлених конструкцій і корпусів обладнання, як правило, належить до приміщень з підвищеною небезпекою, що обумовлює відповідні вимоги до електробезпеки.

Електробезпека системи керування електроприводами робота МП11 забезпечується сукупністю технічних заходів:

- захисним заземленням (зануленням) металевих корпусів двигунів, контролера й шаф керування, що обмежує напругу дотику в разі замикання на корпус;
- застосуванням ізоляції відповідного класу та періодичним контролем її стану;
- використанням пристроїв захисного вимкнення (ПЗВ), що спрацьовують за появи струму витоку;

- застосуванням малих (безпечних) напруг для кіл керування й сигналізації;
- огороженням і розташуванням струмопровідних частин у недоступних місцях, блокуванням дверей шаф керування;
- застосуванням засобів індивідуального електрозахисту (діелектричні рукавички, інструмент з ізольованими ручками, покажчики напруги) під час обслуговування електроустановок [20].

Усі роботи з обслуговування та ремонту електрообладнання виконують зі зняттям напруги; перед початком робіт переконуються у відсутності напруги покажчиком, накладають переносні заземлення та вивішують попереджувальні плакати. Працівники, що обслуговують електроустановки, повинні мати відповідну групу з електробезпеки та проходити періодичну перевірку знань.

4.6. Виробнича санітарія та заходи зниження впливу шкідливих факторів

Нормалізація мікроклімату.

Для підтримання параметрів мікроклімату в межах, установлених ДСН 3.3.6.042-99, передбачають системи вентиляції та кондиціонування повітря, що відводять надлишкову теплоту від електрообладнання, а також застосування термостійких ізоляційних матеріалів [23]. Тепловиділяюче обладнання за можливості розміщують з урахуванням забезпечення припливу свіжого повітря.

Захист від пилу та агресивних середовищ.

Боротьба зі струмопровідним пилом полягає у влаштуванні припливно-витяжної вентиляції з фільтрами-пиловловлювачами, регулярному очищенні ізоляційних проміжків і контактних з'єднань, застосуванні обладнання з відповідним ступенем захисту оболонки (IP). За наявності агресивних парів і кислот їх оперативно видаляють засобами місцевої вентиляції, а елементи конструкції виготовляють із корозійностійких матеріалів.

Зниження шуму та вібрації.

Для зниження рівня шуму й вібрації до меж, нормованих ДСН 3.3.6.037-99, застосовують своєчасне технічне обслуговування та змащування механічних передач і редукторів, установлення робота на віброізолюючі опори (амортизатори), а за потреби — звукопоглинальне облицювання приміщення та засоби індивідуального захисту органів слуху [25].

Рациональне освітлення.

Освітленість робочих місць оператора та зон обслуговування робота забезпечують відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 шляхом раціонального поєднання природного та штучного освітлення, застосування світильників із рівномірним розподілом світлового потоку та обмеженням засліплювальної дії [24]. Передбачають також аварійне освітлення для безпечної евакуації персоналу в разі вимкнення основного живлення.

4.7. Пожежна безпека

Роботизований комплекс містить значну кількість електрообладнання, тому потенційними причинами пожежі є коротке замикання, перевантаження кіл, перехідні опори в контактних з'єднаннях, іскріння та перегрівання ізоляції. Додатковими чинниками є порушення правил пожежної безпеки під час електрозварювальних робіт і недотримання допустимих відстаней від джерел тепла до легкозаймистих матеріалів. Загальні вимоги пожежної безпеки та засади цивільного захисту регламентовано Кодексом цивільного захисту України [26].

Заходи із забезпечення пожежної безпеки комплексу передбачають:

- застосування апаратів захисту від короткого замикання та перевантаження (автоматичні вимикачі, запобіжники);
- використання негорючих і важкогорючих матеріалів для оболонок електрообладнання;
- оснащення приміщення засобами виявлення та гасіння пожежі — пожежними сповіщувачами та вуглекислотними або порошковими

вогнегасниками, придатними для гасіння електроустановок під напругою;

- утримання у справному стані шляхів евакуації та забезпечення вільного доступу до засобів пожежогасіння;
- періодичне навчання персоналу правилам пожежної безпеки та діям у разі виникнення пожежі.

Залежно від характеру горючих матеріалів пожежі поділяють на відповідні класи; для електрообладнання, що перебуває під напругою, застосовують вуглекислотні та порошкові вогнегасники, які не проводять електричний струм і не пошкоджують елементи системи керування. Застосування водних та пінних засобів для гасіння електроустановок під напругою заборонено через небезпеку ураження струмом. Кількість і розташування первинних засобів пожежогасіння визначають з урахуванням площі приміщення та категорії за вибухопожежною небезпекою.

4.8. Організація охорони праці та надання першої допомоги

Для забезпечення безпеки праці на підприємстві впроваджують систему управління охороною праці (СУОП), функціонування якої передбачено Законом України «Про охорону праці» [16]. СУОП охоплює атестацію робочих місць на відповідність вимогам охорони праці, розроблення інструкцій з охорони праці для працівників відповідного профілю, організацію навчання та перевірки знань, проведення інструктажів (вступного, первинного, повторного, позапланового та цільового), а також контроль умов праці й аудит безпеки. Відповідальність за ефективне функціонування СУОП і створення безпечних умов праці покладається на роботодавця [16, 21].

Важливою складовою організаційних заходів є проведення інструктажів з охорони праці. Вступний інструктаж проводять з усіма працівниками під час прийняття на роботу; первинний — безпосередньо на робочому місці перед початком роботи; повторний — періодично з метою закріплення знань; позаплановий — у разі зміни обладнання чи технології або після нещасного

випадку; цільовий — перед виконанням разових робіт підвищеної небезпеки [21]. Регулярність і повнота інструктажів є передумовою свідомого дотримання працівниками вимог безпеки.

До роботи з експлуатації, обслуговування та ремонту робота МП11 допускають лише спеціально підготовлених працівників віком від 18 років, які пройшли навчання, інструктаж та перевірку знань з охорони праці й не мають медичних протипоказань. Роботи, що потребують присутності людини в робочій зоні, виконують за нарядом-допуском із застосуванням принципу роботи у парі: один працівник виконує дії з системою, а другий контролює процес і за потреби негайно активує аварійний зупин.

У разі ураження працівника електричним струмом необхідно якнайшвидше звільнити потерпілого від дії струму, вимкнувши електроустановку або відокремивши потерпілого від струмопровідних частин із застосуванням ізолювальних засобів. Після цього оцінюють стан потерпілого і за відсутності дихання та пульсу негайно розпочинають серцево-легеневу реанімацію (штучне дихання й непрямий масаж серця), одночасно викликавши швидку медичну допомогу [20]. Своєчасність і правильність надання першої допомоги є вирішальними для збереження життя потерпілого.

4.9. Ергономічні вимоги до організації робочого місця оператора

Рациональна організація робочого місця оператора роботизованого комплексу є важливою складовою системи охорони праці, оскільки безпосередньо впливає на втомлюваність, точність дій та ймовірність помилок персоналу [21]. Робоче місце має забезпечувати вільний, зручний і безпечний доступ до органів керування, засобів індикації та пристроїв аварійного відключення, а також належний огляд робочої зони робота.

Пульт керування розміщують поза межами небезпечної зони так, щоб оператор під час керування перебував у захищеному просторі й мав змогу спостерігати за рухом ланок робота. Органи керування групують за функціональним призначенням, а найважливіші з них (зокрема кнопку

аварійного зупину) виділяють формою, кольором і розташуванням для швидкого та безпомилкового доступу. Висоту й кут нахилу пульта, рівень освітленості індикаторів та відстань спостереження обирають з урахуванням антропометричних характеристик працівника.

Для зниження втоми передбачають раціональний режим праці та відпочинку, чергування операцій, а також відповідність параметрів виробничого середовища санітарним нормам. Дотримання ергономічних вимог у поєднанні з технічними засобами безпеки сприяє підвищенню надійності взаємодії «людина — машина» та зниженню ризику аварійних ситуацій, спричинених людським фактором.

Висновки за розділом 4

У цьому розділі розглянуто комплекс питань охорони праці під час експлуатації роботизованого комплексу на базі промислового робота МП11. Проаналізовано нормативно-правову базу, що регламентує безпеку промислових роботів, зокрема Закон України «Про охорону праці» [16], гармонізовані стандарти ДСТУ EN ISO 10218-1:2018 [17] і ДСТУ EN ISO 10218-2:2018 [18], а також профільну літературу та санітарно-будівельні норми [20–25].

Виконано аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, серед яких визначальними для робота МП11 є механічні небезпеки від рухомих ланок та небезпека ураження електричним струмом, а супутніми — несприятливий мікроклімат, запиленість, шум, вібрація, електромагнітні поля та недостатнє освітлення. На основі методики оцінювання ризиків визначено мінімальну захисну відстань межі захищеного простору (близько 500 мм).

Обґрунтовано комплекс технічних та організаційних заходів безпеки: зонування й огороження робочого простору, систему аварійного зупину та безпечне вимкнення моменту (STO) на базі приводів Lexium 28, обмеження робочих координат, струму та напруги приводів, безперервний контроль їх стану засобами вимірювання (енкодери Series 21, датчики струму ACHS-7122),

режим зниженої швидкості для налагодження, заходи електро- та пожежної безпеки, виробничої санітарії, а також організацію роботи персоналу в межах системи управління охороною праці. Запропоновані рішення узгоджуються з розробленою системою керування й забезпечують безпечну та нешкідливу експлуатацію робота МП11.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі вивчено принципи побудови, компонування та основні технічні характеристики промислового робота МП-11, який слугує для транспортування й орієнтації деталей у виробничих процесах. Поставлено та розв'язано низку інженерних задач, що дозволили досягти мети дослідження.

За обчисленими значеннями орієнтовної потужності й моментів, що діють на виконавчі ланки, для кожного електропривода обґрунтовано вибір безколекторних двигунів постійного струму: BSH2LD0231CA5C – для першого привода, BSH2HF0731CA5C – для другого, BSH2MBA533CA5C – для третього.

Створено принципову електричну схему системи керування електроприводами на основі сервоприводів Lexium 28, оптичних енкодерів Series 21 та датчиків струму ACHS-7122. За цією схемою побудовано динамічну модель системи в середовищі Simulink, за допомогою якої досліджено її поведінку та перехідні процеси.

Моделювання показало, що для першого електропривода час перехідного процесу дорівнює 0,223 с, а похибка за положенням не перевищує $3 \cdot 10^{-3}$ м, перерегулювання відсутнє. Для другого привода — 0,32 с і похибка $4 \cdot 10^{-2}$ рад. Для третього — 0,18 с і похибка не більша за $4 \cdot 10^{-3}$ м. В усіх трьох випадках перехідні процеси відбуваються плавно, без коливань і виходу за заданий рівень.

Порівняння з вихідним пневматичним варіантом показало, що розроблена електроприводна система скорочує час руху першої ланки на 44,25% (вертикальне переміщення), другої — на 36% (кутове) і третьої — на 10% (горизонтальне).

Окремо в роботі розглянуто питання охорони праці під час експлуатації робота МП-11. Проаналізовано нормативно-правову базу (Закон України «Про охорону праці», стандарти ДСТУ EN ISO 10218-1/-2) і виявлено небезпечні та шкідливі виробничі фактори, серед яких визначальними є механічна дія

рухомих ланок та ураження електричним струмом. За результатами оцінювання ризиків запропоновано комплекс технічних і організаційних заходів безпеки: огороження робочої зони з блокуванням, аварійний зупин і безпечне вимкнення моменту (STO), обмеження координат, струму та напруги приводів, контроль їхнього стану, режим зниженої швидкості, а також заходи електро та пожежної безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Проць Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: навчальний посібник. - Тернопіль ТНТУ, 2008. – 232 с.
2. Поліщук. Комп'ютерна інженерія та основи робототехніки : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання. – Вінниця: ВНТУ, 2024. – 155 с.
3. Трет'як А. В. Основи робототехніки: навчальний посібник. – Полтава: НУПІ, 2024. – 135 с.
4. Павленко І. І., Мажара В. А. Роботизовані технологічні комплекси: навчальний посібник. – Кіровоград: КНТУ, 2010. – 392 с.
5. Іванов В. О. Технологічні основи гнучких автоматизованих виробництв : навчальний посібник. – Суми: СумДУ, 2022. – 203 с.
6. Артюх О. М. Основи мехатроніки : навчальний посібник. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 372 с.
7. Цвіркун Л. І. Робототехніка та мехатроніка: навчальний посібник. – Дніпро: НГУ, 2017. – 224 с.
8. Маляр Ю. І. Автоматизація виробництва в машинобудуванні. Частина II : навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 123 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. Lexium Motors. Двигун BCH2LD0231CA5C серії Lexium 28: технічний паспорт: <http://bit.ly/3QtTHrJ>
12. Lexium Motors. Двигун BCH2HF0731CA5C серії Lexium 28: технічний паспорт: <https://bit.ly/4dVo7MB>
13. Lexium Motors. Двигун BCH2MBA533CA5C серії Lexium 28: технічний паспорт: <https://bit.ly/4xieYoM>

14. Schneider Electric. Сервопривод Lexium 28 (LXM28) та сервомотори BCH2: технічний паспорт.
15. Broadcom Corporation. Датчик струму ACHS-7122: технічний паспорт.
16. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ (зі змінами). – Відомості Верховної Ради України.
17. ДСТУ EN ISO 10218-1:2018. Роботи та роботизовані пристрої. Вимоги щодо безпечності промислових роботів. Частина 1. Роботи (EN ISO 10218-1:2011, IDT). – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018.
18. ДСТУ EN ISO 10218-2:2018. Роботи та роботизовані пристрої. Вимоги щодо безпечності промислових роботів. Частина 2. Роботизовані системи та їхні поєднання (EN ISO 10218-2:2011, IDT). – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018.
19. Сокурєнко В.В. Безпека життєдіяльності та охорони праці. – Харків: УНІВД, 2021. – 308 с.
20. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці : підручник. — Львів: Афiша, 2004. — 320 с.
21. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці : підручник / за ред. М.П. Гандзюка. — К.: Каравела, 2004. — 408 с.
22. ДСТУ 2293:2014. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2014.
23. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. — Київ: МОЗ України, 1999.
24. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. — Київ: Мінрегіон України, 2018.
25. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. — Київ: МОЗ України, 1999.
26. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VІ (зі змінами).