

Вінницький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)

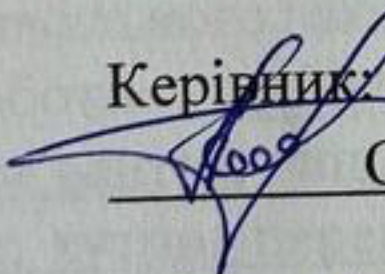
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

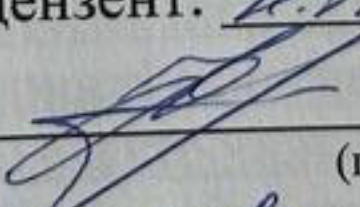
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

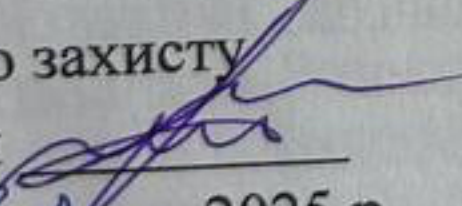
**Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:**

«Система керування електроприводом ступенів рухомості промислового робота»

Виконав: студент 4 курсу, гр. ЕМСА-216  
спеціальності 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)  
 Денис МАНІЛЕНКО  
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

Керівник: к.т.н., доцент кафедри КЕМСК  
 Олександр ПАЯНОК  
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)  
« 20 » травня 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доцент кафедр ЕСЕМ-Н  
 Шумак Ю.А.  
(прізвище та ініціали)  
« 10 » серпня 2025 р.

Допущено до захисту  
Зав. кафедри   
« 3 » серпня 2025 р.

Білинський національний технічний університет  
Факультет Електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів  
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Галузь знань 14 – Електрична інженерія  
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувачкафедри

К.Т.Н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

“18/” лютого 2025 року

## ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Маніленку Денису Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Система керування електроприводом ступенів рухомості промислового робота

Керівник роботи Паянок Олександр Анатолійович, к.т.н., доц. каф.КЕМСК  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “20”березня 2025року №97

2. Термін подання студентом роботи 03.06.2025р.

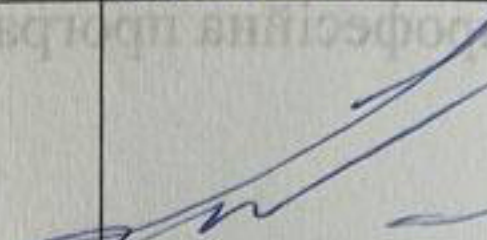
3. Вихідні дані до роботи: маса вантажу  $m_v$ , кг – 12; маса ступеня рухомості  $m_{ср}$ , кг – 3; кутова швидкість  $\omega$ , р/с; кутове переміщення  $S_{max}$ , – 720; ексцентриситет відносно вісі привода  $L_{цм}$ , м – 0,1; передаточне число редуктора  $i_p$ , – 30; режим роботи ТВ, % – 80.

4. Зміст текстової частини: Вступ; 1 Характеристики та режими роботи степенів рухомості промислового робота; 2 Розрахунок потужності двигуна промислового робота; 3 Техніко-економічне обґрунтування вибору системи електропривода промислового робота; 4 Вибір електродвигуна та його перевірка; 5 Розрахунок статичних характеристик САЕП; 6 Розрахунок і вибір силових елементів перетворювального агрегату 7 Математична модель САЕП; 8 Розробка функціональної схеми системи керування електропривода промислового робота; 9 Розрахунок динамічних режимів електропривода ПР; 10 Розробка схеми електричної принципової САЕП промислового робота; 11. Економічна частина; 12 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; Висновки.

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях, Висновки:

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням осіб, які виконали роботу):  
Мета, задачі та об'єкт дослідження. Характеристики об'єкта дослідження. Будова  
механізму промислового робота. Кінематичні вузли та кінематичний взаємний вплив ланок  
ПР. Розрахунок потужності, техніко-економічне обґрунтування ЕП ПР. Огляд можливих  
варіантів електроприводу. Розробка схеми електричної функціональної. Розробка схеми  
електричної принципової системи керування трьох ступенів рухомості. Дослідження  
динамічних характеристик СЕАП ПР. Модель системи керування ЕП. Дослідження  
динамічних характеристик СЕАП ПР. Висновки.

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ             | Прізвище, ініціали та посада консультанта                 | Підпис, дата                                                                                      |                                                                                                   |
|--------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |                                                           | завдання видав                                                                                    | виконав прийняв                                                                                   |
| Спеціальна частина | к. т. н., доц. каф. КЕМСК<br>Паянок О.А.,                 | <br>18.02.2025 | <br>20.05.2025 |
| Охорона праці      | Зав. каф. БЖДПБ,<br>д.пед.н., проф.<br>Кобилянський О. В. | <br>18.02.2025 | <br>20.05.2025 |

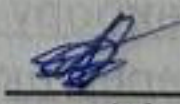
7. Дата видачі завдання

18.02.2025,

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи                                                       | Строк виконання етапів роботи | Прим |
|-------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------|
| 1     | Формування та затвердження теми бакалаврської дипломної роботи (БДР)      | 18.02.2025                    |      |
| 2     | Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БДР | 06.05.2025                    |      |
| 3     | Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БДР | 20.05.2025                    |      |
| 4     | Виконання розділу «Охорона праці»                                         | 20.05.2025                    |      |
| 5     | Попередній захист БДР                                                     | 03.06.2025                    |      |
| 6     | Нормоконтроль БДР                                                         | 03.06.2025                    |      |
| 7     | Рецензування БДР                                                          | 10.06.2025                    |      |
| 8     | Захист БДР                                                                | 19.06.2025                    |      |

Студент



(підпис)

Майданчик А.І.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Пасенко О.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська дипломна робота складається з 116 сторінки формату А4, на яких є 21 рисуноків, 16 таблиць, список використаних джерел містить 22 найменування.

Здійснено вдосконалення системи електропривода степенів рухомості промислового робота. Проаналізовано галузі застосування механізму та вибрано двигун. Спроектовано систему керування електропривода системи ПЧ-СДПМ. На основі параметрів керованого двигуна вибрано тип та номінальні параметри елементів силової схеми та схеми керування. Розроблена схема керування електроприводу, яка відповідає вимогам технологічного процесу. Забезпечений необхідний діапазон регулювання. Проведено моделювання і аналіз перехідних процесів в замкнутій системі із зворотним зв'язком за швидкістю і положенням. Забезпечена необхідна точність спостереження і необхідний діапазон регулювання швидкості.

Ключові слова: промисловий робот, частотний електропривод, система векторного керування, електродвигун, математична модель, моделювання, схема електрична.

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis consists of 116 pages of A4 format, on which there are 21 figures, 16 tables, the list of used sources contains 22 names.

The electric drive system of the degrees of mobility of an industrial robot has been improved. The application areas of the mechanism have been analyzed and the engine has been selected. The control system of the electric drive of the FC-SDPM system has been designed. Based on the parameters of the controlled engine, the type and nominal parameters of the elements of the power circuit and the control circuit have been selected. The electric drive control circuit has been developed, which meets the requirements of the technological process. The required control range has been provided. The modeling and analysis of transient processes in a closed system with feedback on speed and position have been carried out. The required observation accuracy and the required speed control range have been provided.

Keywords: industrial robot, frequency electric drive, vector control system, electric motor, mathematical model, modeling, electrical circuit.

## ЗМІСТ

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                   | 5  |
| 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТА РЕЖИМИ РОБОТИ СТЕПЕНІВ РУХОМОСТІ<br>ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА.....             | 9  |
| 1.1 Характеристики конструкції та технології роботи промислових<br>роботів .....             | 9  |
| 1.2 Особливості трансмісії та кінематики руки промислового<br>робота.....                    | 12 |
| 1.3 Класифікація ПР та функціональна структура робота.....                                   | 17 |
| 1.4 Кінематичний взаємний вплив ланок механічної руки.....                                   | 21 |
| 2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА ПРОМИСЛОВОГО<br>РОБОТА.....                                  | 24 |
| 2.1 Вхідні передумови та вимоги до електропривода.....                                       | 24 |
| 2.2 Розрахунок потужності двигуна.....                                                       | 26 |
| 3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ<br>ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА..... | 30 |
| 3.1 Технічне обґрунтування вибору системи електропривода.....                                | 30 |
| 3.2 Економічне обґрунтування вибору системи електропривода.....                              | 32 |
| 4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ<br>СТУПЕНІВ РУХОМОСТІ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА.....  | 37 |
| 4.1 Вибір електродвигуна.....                                                                | 37 |
| 4.2 Огляд можливих варіантів електроприводу.....                                             | 42 |
| 4.3 Розрахунок та вибір основних елементів силової схеми.....                                | 45 |
| 4.4 Математичні модель системи електропривода.....                                           | 50 |
| 4.5 Розробка функціональної схеми системи керування електропривода                           | 54 |
| 4.6 Розробка схеми електричної принципової саеп промислового робота                          | 59 |
| 5 РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА .....                                         | 63 |
| 5.1 Аналіз САЕП без врахування кінематичної взаємодії ланок<br>механічної руки.....          | 63 |

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2 Аналіз САЕП із врахуванням кінематичної взаємодії ланок<br>механічної руки..... | 70  |
| 6 ОХОРОНА ПРАЦІ.....                                                                | 78  |
| ВИСНОВКИ.....                                                                       | 89  |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                     | 91  |
| Додаток А Технічне завдання.....                                                    | 94  |
| Додаток Б Ілюстративні матеріали.....                                               | 99  |
| Додаток В Протокол перевірки кваліфікаційної роботи.....                            | 112 |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Промислова робототехніка є однією з провідних сфер впровадження сучасних технологій, що поєднує електроніку та механіку. Цей напрям автоматизації стрімко прогресує завдяки швидкому розвитку електроніки. Використання новітніх матеріалів і технологічних рішень суттєво підвищило можливості мікропроцесорних систем — вони стають компактнішими й потужнішими. Це, у свою чергу, сприяє розширенню функцій, які можуть виконувати промислові роботи, а також підвищенню якості їхньої роботи.

Серед основних завдань, які виконують промислові роботи, можна виокремити такі:

- транспортування деталей і заготовок між верстатами або до систем зі змінними палетами;
- виконання електродугового та точкового зварювання;
- нанесення фарби на поверхні;
- здійснення операцій різання, що вимагають руху інструмента по складних траєкторіях.

До ключових переваг промислових роботів належать:

- відносно швидке повернення інвестицій;
- усунення впливу людського фактора на конвеєрних лініях і під час виконання рутинних, високоточних операцій;
- зростання точності технологічних процесів, що позитивно впливає на якість продукції;
- можливість безперервної роботи обладнання в цілодобовому режимі протягом усього року;
- ефективніше використання виробничого простору;
- усунення ризику для працівників у шкідливих і небезпечних умовах виробництва.

Висока ефективність використання промислових роботів досягається

лише за умови комплексного підходу до їх розробки та впровадження. Лише широкомасштабне застосування таких систем є обґрунтованим з технологічної, економічної та соціальної точок зору.

Порівняно з традиційними засобами автоматизації, промислові роботи забезпечують значно більшу гнучкість у технічних і організаційних рішеннях, сприяють скороченню строків підготовки та запуску гнучких автоматизованих систем у виробництво.

Їхнє впровадження дозволяє переходити до обслуговування кількох верстатів одночасно, що, у свою чергу, дає змогу зменшити потребу в робочій силі та ефективно планувати роботу обладнання у двозмінному чи тризмінному режимі.

Промислові роботи застосовуються в різноманітних галузях виробництва — як у дрібносерійному, так і в масовому. Від типу виробництва залежать конструктивні особливості ПР, їх рівень складності, системи управління та обробки інформації.

Автоматизований електропривод відіграє ключову роль у створенні робототехніки та верстатів. Його функції виходять за межі простого перетворення електричної енергії в механічну, хоч ця задача і залишається базовою.

Електропривод є фундаментальним елементом конструкції будь-якого промислового робота. Він впливає як на загальну будову роботизованих систем і верстатів, так і на їхні окремі вузли, оскільки їх конструкція значною мірою залежить від типу електродвигуна. При цьому електропривод часто чинить опосередкований вплив, покращуючи динамічні властивості обладнання та розширюючи його функціональність.

Особливої ваги електропривод набув із розвитком машинобудування, ставши однією з основних складових автоматизації виробництва.

Електропривод є однією з найбільш динамічних і швидко прогресуючих галузей промисловості. Завдяки своїй гнучкості та ефективності, він дозволяє

успішно вирішувати складні задачі, пов'язані з підвищенням продуктивності, точності та рівня автоматизації обладнання.

Досягнення у сфері верстатного електроприводу та приводів для промислових роботів, а також впровадження масового високошвидкісного електроприводу спричинили не лише суттєві зміни в конструкції верстатів і роботів, але й вплинули на формування нового підходу в інженерному мисленні. Конструктори дедалі більше орієнтуються на електротехнічні рішення, що сприяє подальшій "електрифікації" проектування сучасного обладнання.

**Об'єкт дослідження** є процеси перетворення енергії, які протікають у електротехнічній системі електропривода промислового робота типу «антропоморфна рука».

**Предметом дослідження** є математичні моделі та структури, які дозволяють підвищити енергетичну ефективність електропривода степенів рухомості промислового робота.

**Метою** бакалаврської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності та надійності функціонування електричного привода промислового робота за рахунок вдосконалення його системи електропривода та модернізації структури електромеханічної частини електроприводу.

В процесі реалізації мети роботи необхідно виконати такі завдання:

- привести коротку характеристику та режими роботи виробничого механізму;
- виконати розрахунок та вибір потужності електродвигуна механізму;
- провести розрахунки економічної доцільності використання найбільш оптимального з технічної та економічної точки зору варіанту системи електропривода промислового робота;
- виконати необхідні розрахунки та розробити функціональну та принципову електричні схеми електропривода електропривода промислового робота типу «антропоморфна рука»;

- провести моделювання запропонованої системи керування з метою перевірки адекватності поведінки системи реальним фізичним та електромеханічним процесам.

**Методи дослідження** засновані на використанні методів теорії електричних машин, теорії управління, методів синтезу нелінійних систем управління, теорії та методів математичного моделювання та інших системних методів.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати бакалаврської кваліфікаційної роботи отримано автором самостійно.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічній конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2025).

# 1 ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ СТЕПЕНІВ РУХОМОСТІ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

## 1.1 Характеристики конструкції та технології роботи промислових роботів

У результаті ґрунтовного аналізу сучасних універсальних промислових роботів [1–13] із вантажопідйомністю від 5 кг і більше встановлено, що переважна більшість з них використовує антропоморфну кінематичну схему з шістьма обертовими ступенями свободи.

Різноманіття типів промислових роботів представлено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Промислові роботи з антропоморфною  
кінематичною схемою

На рисунку 1.1 (зліва-зверху і далі за годинниковою стрілкою) приведені такі промислові роботи: KUKA KR 16, FANUC Arc Mate 120iC, KAWASAKI RS20N, ABB IRB 2400, YASKAWA MOTOMAN MA1800.

Структура 6-осьової антропоморфної кінематичної схеми промислового робота на прикладі робота типу KUKA KR16 приведена на рисунку 1.2.

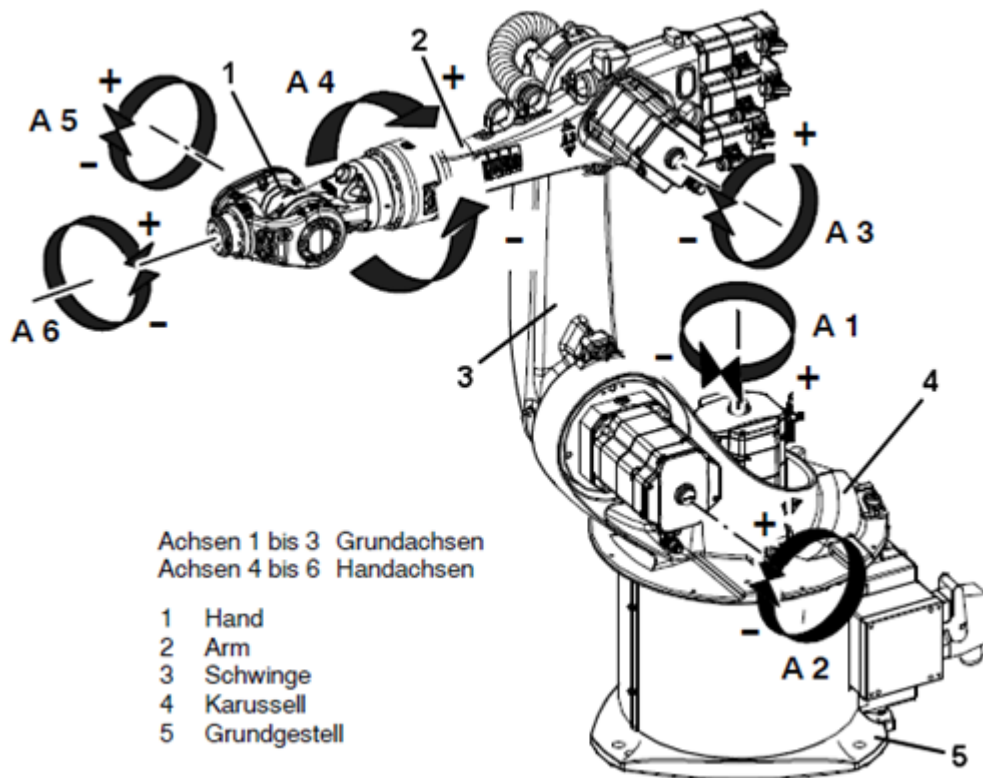


Рисунок 1.2 – Структура 6-осьової антропоморфної кінематичної схеми промислового робота

На рисунку 1.2 приведені такі позначення: осі A1–A3 — це основні осі, які відповідають за переміщення основних сегментів робота; осі A4–A5 — осі зап'ястя, що забезпечують точне орієнтування робочого інструмента; 1 — зап'ястя; 2 — рука; 3 — плече; 4 — карусель (обертний елемент основи); 5 — опора (базова частина конструкції, що забезпечує стійкість робота).

Подібна кінематична схема дає змогу використовувати маніпулятор у таких сферах діяльності:

- маніпулювання, навантаження та розвантаження;

- пакування та вибіркове комплектування;
- електродугове зварювання;
- пайка;
- металолivarне виробництво;
- операції з обробки, складання або розбирання;
- робота з формувальним обладнанням;
- обслуговування верстатного парку;
- виконання вимірювань, тестування та перевірки;
- палетування (укладання на піддони).

Порівняльний аналіз основних даних ПР, необхідних для розробки та вдосконалення приводу, приведений в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні характеристики промислових роботів

|                                                     |    | KUKA<br>KR 16 | FANUC<br>Arc Mate<br>120iC | KAWASAKI<br>RS20N | ABB<br>IRB 2400-<br>16 | YASKAWA<br>MOTOMAN<br>MA1800 |
|-----------------------------------------------------|----|---------------|----------------------------|-------------------|------------------------|------------------------------|
| Кількість осей                                      |    | 6             | 6                          | 6                 | 6                      | 6                            |
| Навантаження, кг                                    |    | 16            | 20                         | 20                | 20                     | 15                           |
| Додаткове навантаження<br>(рука/плече-карусель), кг |    | 30(10/20)     | 20                         | н/д               | 47(12/35)              | н/д                          |
| Радіус дії, мм                                      |    | 1610          | 1811                       | 1725              | 1564                   | 1807                         |
| Повторюваність позиції,<br>мм                       |    | ±0.05         | ±0.08                      | ±0.05             | ±0.07                  | ±0.08                        |
| Точність слідкування, мм                            |    | н/д           | н/д                        | н/д               | ±0.15                  | н/д                          |
| Маса ПР, кг                                         |    | 235           | 250                        | 230               | 380                    | 380                          |
| ЕЦМН* відносно вісі А6,<br>мм                       |    | 120           | н/д                        | н/д               | н/д                    | н/д                          |
| ЕЦМН відносно фланця,<br>мм                         |    | 150           | н/д                        | н/д               | н/д                    | н/д                          |
| Момент інерції<br>вісі, кг·м <sup>2</sup>           | A6 | 0.36          | 0.28                       | 0.3               | н/д                    | 0.04                         |
|                                                     | A5 | н/д           | 1.04                       | 0.9               | н/д                    | 1.04                         |
|                                                     | A4 | н/д           | 1.04                       | 0.9               | н/д                    | 1.04                         |
| Швидкість, °/с                                      | A6 | 615           | 550                        | 610               | 450                    | 560                          |
|                                                     | A5 | 330           | 360                        | 360               | 360                    | 340                          |
|                                                     | A4 | 330           | 360                        | 400               | 360                    | 380                          |
|                                                     | A3 | 156           | 180                        | 210               | 150                    | 190                          |
|                                                     | A2 | 156           | 175                        | 205               | 150                    | 175                          |
|                                                     | A1 | 156           | 195                        | 190               | 150                    | 195                          |

Примітка: \* максимально допустимий ексцентриситет центру мас навантаження.

## **1.2 Особливості трансмісії та кінематики руки промислового робота**

Жоден виробник не розкриває інформацію щодо кінематики трансмісії робочої руки, що дозволяє уникнути необхідності розміщення двигуна безпосередньо у зчленуваннях. Для вантажопідйомності понад 10 кг це сприяє значному зменшенню маси та розмірів руки, підвищенню її швидкодії, зниженню інерції, покращенню маневреності, а також полегшує прокладання силових і інформаційних кабелів до обертових приводів [14,15,16].

У зв'язку з цим при розробці приводу промислового робота виникає задача проектування трансмісії руки, що включає вибір кінематичної схеми, передаточних чисел та узгодження їх із масовими характеристиками модуля руки. Для порівняння та оцінки у розрахунках використовуються дані з таблиці 1.1, що служать орієнтиром.

Для створення надійної та вдосконаленої конструкції трансмісії необхідно дотримуватися таких вимог [17]:

використовувати найбільш раціональні та надійні схеми редукторів, які забезпечують потрібну міцність і жорсткість, при цьому застосовувати матеріали з високою питомою міцністю та зміцненими робочими поверхнями зубів коліс для роботи при великих навантаженнях;

- зменшувати матеріаломісткість конструкції за рахунок її компактності та оптимальної форми деталей;

- забезпечувати надійне фіксування різьбових з'єднань і запобігати зсуву деталей;

- впроваджувати уніфікацію, застосовувати стандартні компоненти та досягати повної взаємозамінності елементів;

- мінімізувати енергоспоживання шляхом зниження тертя і підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД);
- використовувати герметичні корпуси, які захищають від попадання пилю і вологи;
- правильно підбирати мастила і забезпечувати захист від корозії;
- гарантувати стійкість конструкції до механічних та кліматичних впливів;
- забезпечувати максимальну технологічність деталей і вузлів при їх виготовленні, монтажі та демонтажі;
- створювати умови для легкого і зручного обслуговування з максимальною автоматизацією процесів.

На рисунку 1.3 запропонована кінематична схема модуля руки промислового робота.

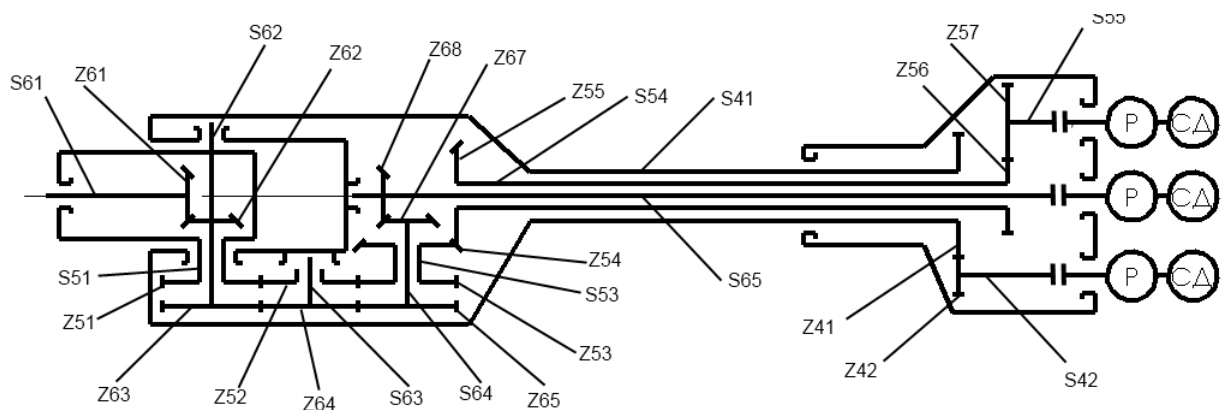


Рисунок 1.3 – Кінематична схема модуля руки промислового робота

Синтезована кінематична схема передбачає використання концентричних валів. Діаметр внутрішнього валу визначається на основі мінімального внутрішнього діаметра підшипника, який здатен витримати задані навантаження. При цьому вал має бути достатньо жорстким, щоб не деформуватися під дією навантаження.

Внутрішній діаметр порожнистого валу обирають з урахуванням необхідного зазору між валами, а зовнішній діаметр — виходячи з вимог до забезпечення потрібної жорсткості конструкції.

Візуалізація КС модуля руки промислового робота приведена на рисунках 1.4 та 1.5.

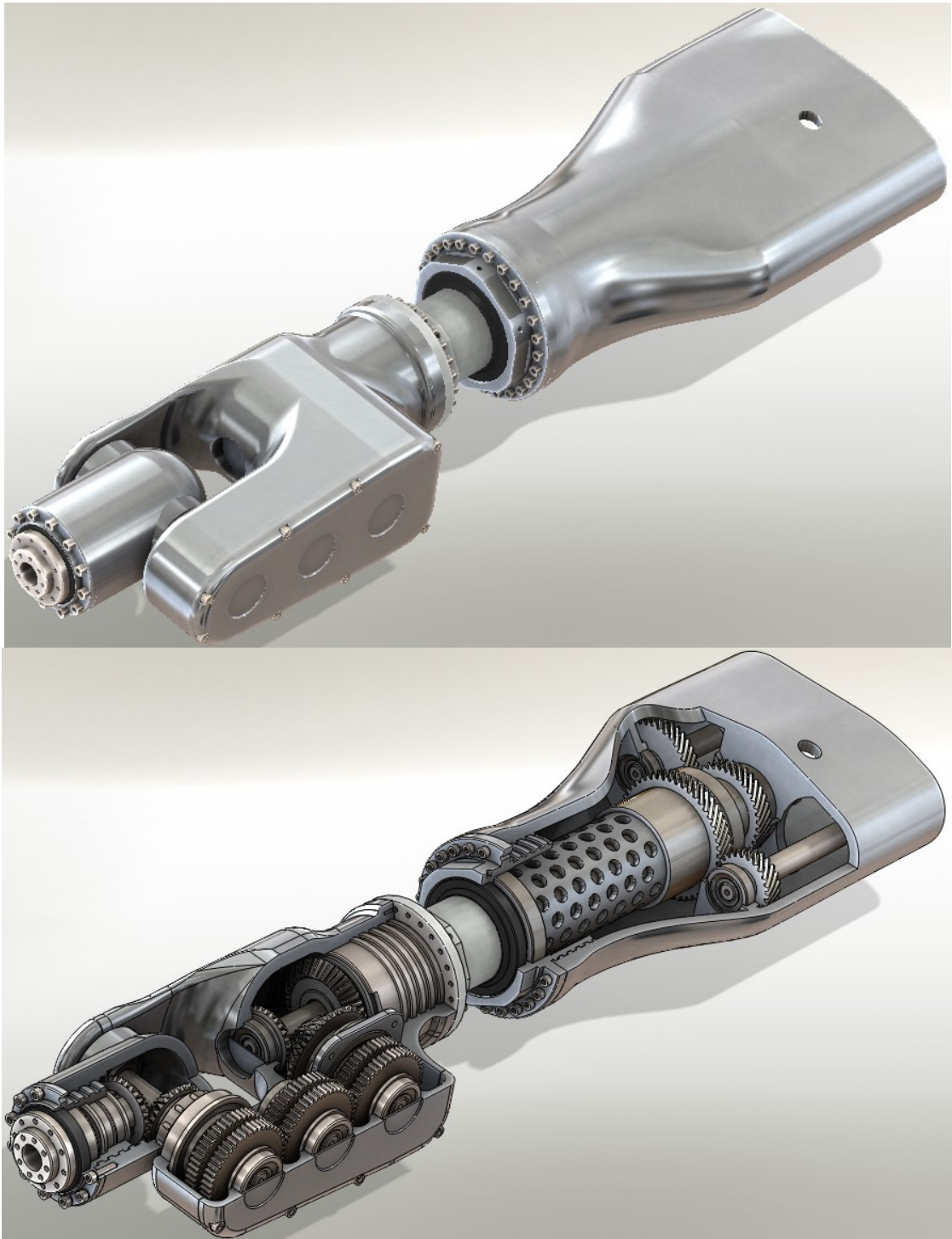


Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд модуля руки ПР  
та його корпусні розрізи

Основною метою даної трансмісії є передача руху, редукція здійснюється тільки в каналі осі А4 з передавальним відношенням  $IP = 0,5$ .

Безпосередня редукція швидкостей здійснюється в блоці редукторів Р (см. Рис.1.3).

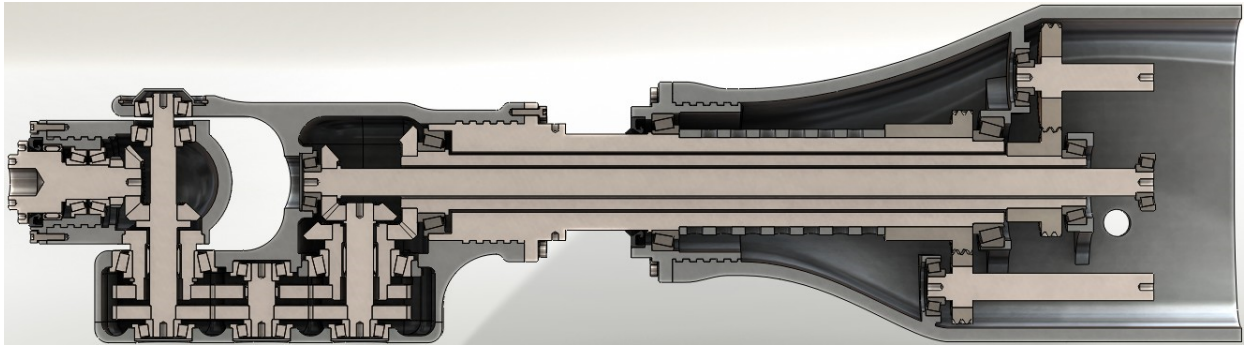


Рисунок 1.5 – Місцеві розрізи модуля руки ПР

Параметри розробленої трансмісії руки робота, необхідні для розрахунку приводів осей механічної руки:

- $\omega_{A6} = 720^\circ/\text{с}; \omega_{A5} = 360^\circ/\text{с}; \omega_{A4} = 360^\circ/\text{с};$
- ЕЦМН відносно осі А6 – 0.1 м;  
ЕЦМН відносно фланця – 0.15 м;
- $Z_{61} = Z_{62} = Z_{68} = Z_{67};$   
 $Z_{63} = Z_{64} = Z_{65} = Z_{51} = Z_{52} = Z_{53};$   
 $Z_{55} = Z_{54};$   
 $Z_{56} = Z_{57};$   
 $Z_{41}:Z_{42} = 1:2.$

Передаточні відношення редукторів:

- $i_{PA6} = 15; i_{PA5} = 40; i_{PA4} = 25$

Моменти інерції осей із врахуванням ЕЦМН:

- $J_{A6} = 0.15 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; J_{A5} = 1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; J_{A4} = 0.863 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$

Моменти інерції, приведені до валів двигунів:

- $J_{A6\text{пр}} = J_{A6}/i_{PA6}^2 = 0.15/15^2 = 6.67 \cdot 10^{-4} \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$
- $J_{A5\text{пр}} = 1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 = J_{A5}/i_{PA5}^2 = 1/40^2 = 6.25 \cdot 10^{-4} \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$
- $J_{A4\text{пр}} = J_{A4}/(i_{PA4}i_{z41:z42})^2 = 0.863/(25 \cdot 2)^2 = 3.45 \cdot 10^{-4} \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$

Запропонована кінематична схема (див. рисунок 1.3) характеризується кінематичним взаємовпливом. Це означає, що рух кожної осі залежить від рухливості попередньої: зокрема, рухливість осі A6 залежить від рухливості осей A4 та A5, а рухливість осі A5 — від рухливості осі A4.

Такі взаємозв'язки можна усунути за допомогою механічних компенсаторів, але найбільш ефективним і надійним рішенням є програмна компенсація, яка полягає у відповідній корекції алгоритму управління приводами та введенні компенсуючих переміщень. У будь-якому випадку програма керування верхнього рівня сприйматиме механічну руку так, ніби двигуни розташовані безпосередньо у шарнірах [14].

### **1.3 Класифікація ПР та функціональна структура робота**

**Класифікація роботів.** По рівню складності роботи та його пристрої розділяються на 3 покоління:

1 покоління – це роботи, що мають тільки навчальну пам'ять і адаптивні системи;

2 покоління – це роботи, які мають частково самоорганізуючу систему керування, навчання і адаптації від ЕОМ;

3 покоління – це роботи, які мають самоорганізуючу систему керування та органи відчуттів.

У машинобудуванні переважно використовують роботи першого покоління, а роботи другого покоління застосовуються лише частково. Роботи другого та третього поколінь здебільшого використовуються в наукових дослідженнях або для виконання завдань у середовищах, небезпечних або недоступних для людини.

Класифікація роботів здійснюється за певними критеріями відповідно до ДЕСТ 25685-ПР-83 і є важливою для розробки типових моделей роботів:

1. По характеру виконання технологічних операцій роботи поділяються на 3 групи:

а).технологічні (виробничі) роботи (ТВР) виконують основні технологічні операції. Вони безпосередньо беруть участь в технологічному процесі в якості обладнання (зварка, фарбування, збірка і т.д.);

б). допоміжні (підйомно-транспортні) роботи (ДПР) виконують функції перенесення об'єкту у вертикальній та горизонтальній площинах. Їх застосовують для обслуговування основного технологічного обладнання;

в). універсальні роботи (УПР) – виконують різноманітні технологічні операції – основні та допоміжні.

2. По ступеню спеціалізації піділяються на:

а). спеціальні – тільки для виконання однієї технологічної операції або обслуговування конкретного технологічного обладнання;

б). спеціалізовані ПР – призначені для виконання технологічних операцій одного виду (зварки, фарбування, складання, вигинання, штабелювання і т.д.);

в). Багатоцільові – для виконання різних основних і допоміжних операцій, вони належать до універсальних робіт.

3. За типами виробництва – серійні та масові.

4. Область застосування по виду виробництва:

а). в заготовчих цехах: «литейный», ковальнопресових і т.д;

б). в основних цехах: механічних, складальних, термічних, гальванічних та інших;

в). в допоміжних цехах: інструментальних, ремонтних та інших.

5. По технологічним операціям:

а). виконання основних операцій – збірка, зварювання, фарбування, штабелювання та ін.;

б). виконання допоміжних операцій при всіх видах обробки;

в). проведення операцій контролю – інформаційні РТС;

г). виконання всіх видів робіт на складах;

д). внутрішньоцеховий та міжцеховий транспорт.

6. Системи основних координатних переміщень:
  - а). прямокутна – плоска, просторова;
  - б). полярная – плоска, циліндрична, сферична;
  - г). ангулярна – плоска, циліндрична, сферична.
7. За кількістю ступенів рухомості: з одним, двома та  $n$ -ступенями рухомості.
8. За вантажопідйомністю:
  - а). надлегкі – до 1 кг.;
  - б). легкі – до 10 кг.;
  - в). середні – до 200 кг.;
  - г). важкі – до 1000 кг.;
  - д). надважкі – більше 1000 кг.
9. Мобільність — стаціонарні або рухомі.
10. Конструктивне виконання — вбудовані, підлогові, підвісні.
11. Тип силового приводу — гідравлічний, пневматичний, електричний або комбінований.
12. Схема розташування приводів — в єдиному блоці, на допоміжних органах або комбінована.
13. Характер обробки програми — жорсткопрограмовані, адаптивні або гнучкопрограмовані.
14. Характер програмування швидкостей і дискретності переміщень — позиційні, багатоточкові, малоточкові, контурні або комбіновані системи управління.

Промислові роботи, як правило, складаються з трьох основних систем: механічної, системи керування та системи інформації. Структурна схема промислового робота наведена на рисунку 1.6.

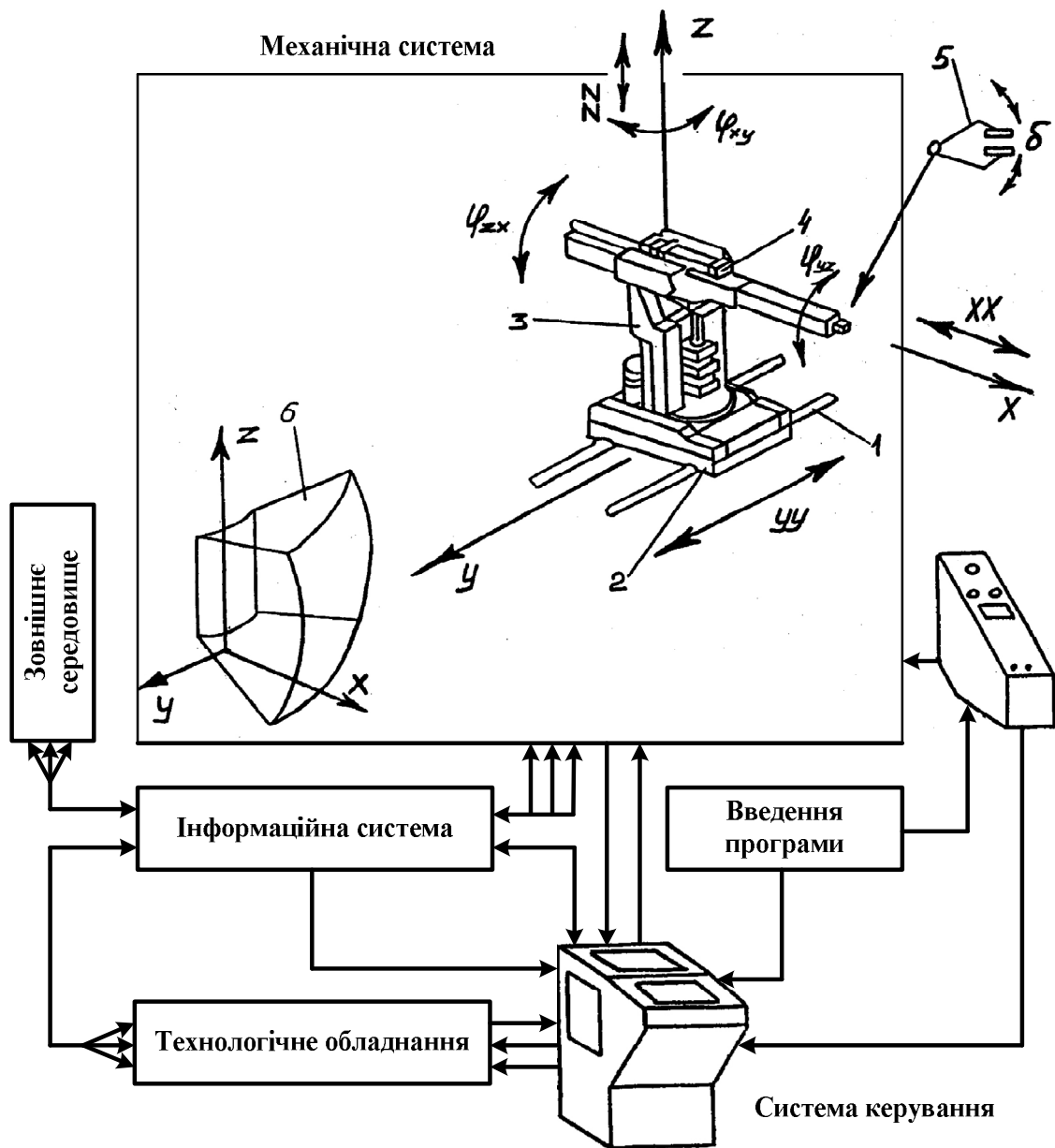


Рисунок 1.2 – Структурна схема промислового робота

На рисунку 1.6 позначено такі елементи: 1 — шляхопровід; 2 — основа; 3 — корпус; 4 — рука; 5 — захватний пристрій; 6 — робоча зона і система координат основних рухів промислового робота. Напрямок руху руки вздовж поздовжньої осі позначено як  $xx$ , рух корпусу робота по шляхопроводу —  $yy$ , рух руки вгору-вниз —  $zz$ . Кут повороту корпусу навколо вертикальної осі  $zz$  позначено  $\varphi_{xy}$ , кут повороту руки у вертикальній площині —  $\varphi_{zx}$ , а кут

повороту захватного пристрою відносно осі  $xx$  —  $\phi_{уз}$ . Напрямок руху захоплення (затиску) деталі позначено  $\delta$ . Орієнтуючими рухами є  $\delta$  і  $\phi_{уз}$ , транспортуючими —  $xx$ ,  $zz$ ,  $\phi_{ху}$  і  $\phi_{zx}$ , а координатним рухом —  $уу$ .

Система програмного керування (СПК) — це комплекс, який відповідає за програмування або навчання робота, зберігання програм у пам'яті та їх виконання, тобто за зчитування інформації та передачу команд виконавчим механізмам промислового робота.

До складу СПК ПР входять такі компоненти:

- задаючі пристрої (ЗП), що включають програмоносії, засоби введення та зчитування даних;
- пристрої підсилення, перетворення та зберігання інформації (УПП);
- перетворювальні та передавальні пристрої (ППП), які містять обчислювальні блоки (ОП), блоки пам'яті (БП) та блоки корекції (БК);
- блоки технічних команд (БТК), стежений привід (СП), блок керування приводами (БКП) і цифрові індикатори.

Систему керування зазвичай поділяють залежно від способу програмування, подачі інформації про послідовність та параметри рухів. Відповідно розрізняють електромеханічні системи (шляхові з упорами, тимчасові та копіювальні), циклові та числові системи керування.

Інформаційна система промислового робота (ІС ПР), яка є частиною системи програмного керування, включає в себе пристрій зворотного зв'язку (ПЗЗ), пристрій порівняння сигналів (ППС) та набір датчиків зворотного зв'язку (ДЗЗ) різного призначення.

ІС ПР по функціональному призначенню умовно можна розділити на три підсистеми:

- сприйняття зовнішнього середовища;
- інформація про стан вузлів, систем та механізмів ПР;
- забезпечення техніки безпеки, функціонує в результаті взаємодії двох перших підсистем системи керування.

Механічна система — це маніпулятор, який виконує безпосереднє виконання заданої програми за всіма ступенями свободи.

Вона включає такі складові: корпус, руку, її ланки, кисть, шток підйому руки, верхню коробку та основу повороту руки.

Відносні переміщення ланок механічної системи промислового робота, що забезпечують рухи по ступенях свободи, поділяються на три типи: орієнтуючі (локальні), транспортні (ретональні) та координатні (глобальні).

#### 1.4 Кінематичний взаємний вплив ланок механічної руки

Запропонована кінематична схема має властивість кінематичного взаємовпливу. У випадку це означає, що рухливість кожної осі залежить від рухливості попередніх, тобто. рухливість осі A6 залежить від рухливості осей A5 і A4, а рухливість осі A5 залежить від рухливості осі A4.

На рисунку 1.3 зображено три шестерні: Z41, Z55 та Z54. Шестерня Z41 умовно є ще й корпусом для передачі Z55-Z54, утворюється планетарний механізми. Передача Z55-Z54 наведена до циліндричної передачі для наочності.

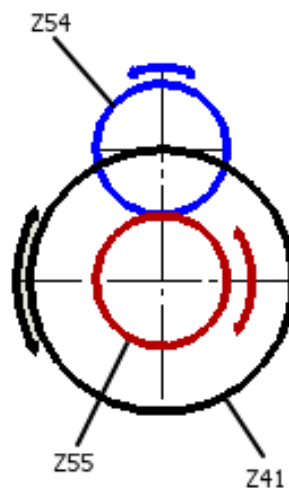


Рисунок 1.3 – Приведена схема взаємодії осей A5 та A4.

Такі взаємодії можна усунути за допомогою механічних компенсаторів, але найбільш ефективним і надійним є метод програмної компенсації — тобто використання алгоритму управління приводами та задання компенсуючих

переміщень. У будь-якому випадку програма верхнього рівня керування буде сприймати механічну руку так, ніби двигуни розміщені безпосередньо в шарнірах руки [4]. Це можна продемонструвати на прикладі взаємодії осей A4 та A5 через передачу Z42-Z41, яка через вал S41 обертає корпус із передачею Z55-Z54.

Так як дана взаємодія є синтезом конічної та планетарної передач, то описується вона наступним рівнянням:

$$n_{z54} = n_{z41} \cdot \left( \cos \beta + \frac{Z_{54}}{Z_{55}} \right) - n_{z55} \cdot \frac{Z_{55}}{Z_{54}} \rightarrow$$

$$\rightarrow n_{z55} = \left( n_{z41} \cdot \left( \cos \beta + \frac{Z_{54}}{Z_{55}} \right) - n_{z54} \right) \cdot \frac{Z_{54}}{Z_{55}} = (n_{z41} \cdot (\cos 90 + 1) - n_{z54}) \cdot 1$$

$$n_{z55} = n_{z41} - n_{z54}$$

На рисунку 1.4 наведено графіки переміщення та швидкості ланок при максимальних швидкостях Z41 та Z54, рівних 360 °/с або 60 об/хв

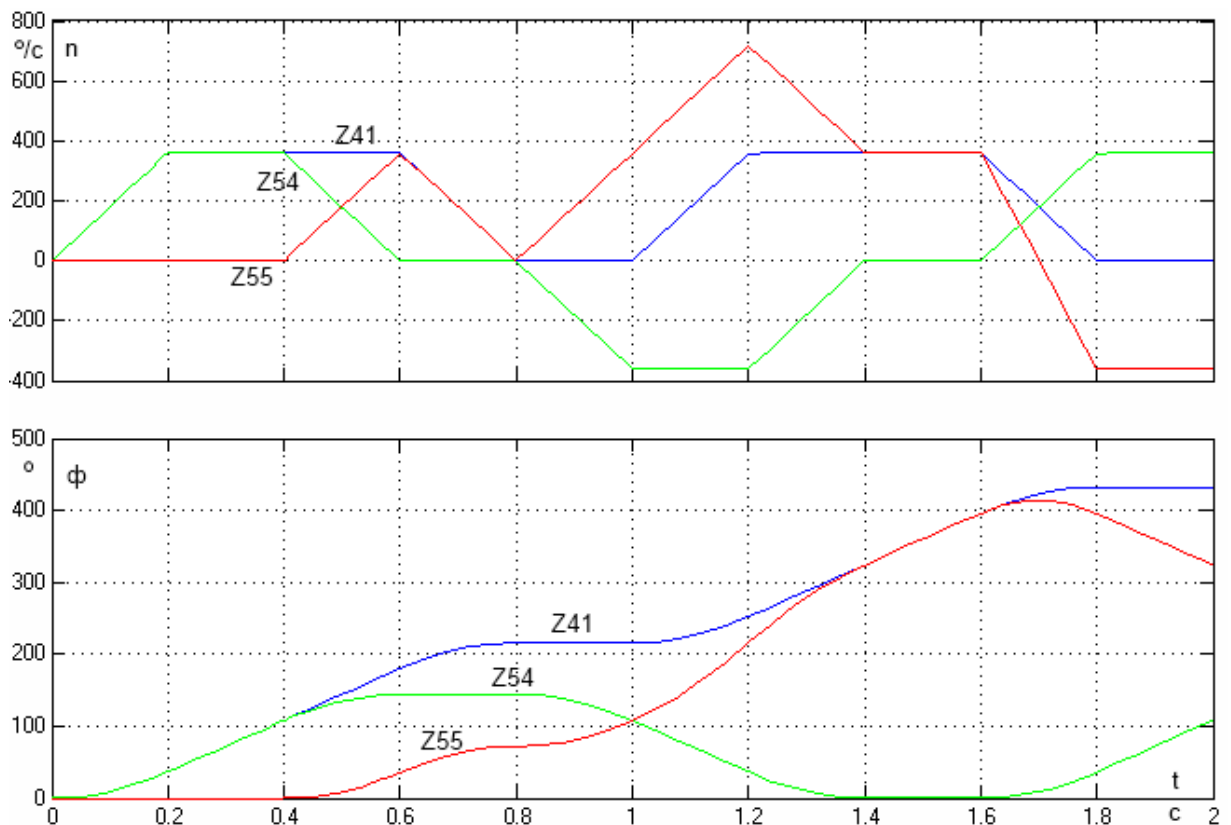


Рисунок 1.4 – Кутове переміщення та кутова швидкість ланок Z54, Z55, Z41

Таким чином, максимальна швидкість, яку має забезпечувати привід осі A5:

$$\omega_{дA5} = |\omega_{maxZ55}| \cdot i_{pA5} = 120 \cdot 40 = 4800 \text{ об/мин}$$

На швидкість шестірні Z61 впливають швидкості шестірень Z41, Z62 і Z51. Наприклад, при скомпенсованій взаємодії осей A4 і A5, коли вісь A5 залишається нерухомою, а вісь A4 обертається зі швидкістю 60 об/хв, вісь A6 починає обертатися під впливом руху осі A4. Цей взаємозв'язок можна описати рівнянням:

$$\begin{aligned} n_{z61} &= n_{z41} + n_{z51} - n_{z62} = n_{z41} + (n_{z41} - n_{z55}) - n_{z62} \rightarrow \\ &\rightarrow n_{z62} = 2n_{z41} - n_{z55} - n_{z61} \end{aligned}$$

Максимальна швидкість двигуна осі A6:

$$\omega_{дA6} = |\omega_{maxZ62}| \cdot i_{pA6} = 280 \cdot 15 = 4200 \text{ об/мин}$$

### **Висновок:**

Було проведено аналіз сучасних промислових роботів та визначено оптимальну кінематичну схему універсального робота. Наведено основні вимоги до механізму і зібрано всі необхідні матеріали для виконання розрахунків. Запропоновано трансмісійну схему типу «механічна рука-маніпулятор». Визначено параметри, які потрібні для вибору електроприводу, а також враховано кінематичні взаємодії між ланками механічної руки.

## **2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА**

### **2.1 Вхідні передумови та вимоги до електропривода**

Правильний підбір потужності електродвигуна має велике значення, оскільки встановлення двигуна з недостатньою потужністю призводить до зниження продуктивності механізму та може спричинити передчасний вихід двигуна з ладу. У такому випадку двигун перегрівається понад допустимий рівень, що значно скорочує термін служби ізоляції обмоток.

Натомість, встановлення двигуна із зайвою потужністю є економічно не вигідним і водночас погіршує енергетичні показники — знижується коефіцієнт корисної дії (ККД) та коефіцієнт потужності. Крім того, це може спричинити підвищений знос або навіть поломку деталей механізму.

Розрахунок потужності двигуна та вибір електропривода для промислового робота здійснюють з урахуванням таких факторів:

- необхідних динамічних характеристик під час пуску, гальмування та зміни навантаження;
- діапазону регулювання швидкостей; типу механічної характеристики режиму роботи в часі та точності підтримки заданого режиму;
- а також частоти включень приводного механізму.

У цьому розділі здійснюється розрахунок потужності електродвигуна промислового робота, створеного за найбільш поширеною та універсальною кінематичною схемою типу «антропоморфна рука».

Основні характеристики електроприводів для ступенів рухомості робота наведені в таблиці 2.1.

Для проведення розрахунків попередньо визначаються вхідні дані, які наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики ЕП степенів рухомості ПР

Електропривод степені рухомості А6:

|                                               |                                          |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------|
| Вантажопідйомність:                           | $m_{гр} = 15 \text{ кг}$                 |
| Кутова швидкість:                             | $\omega_6 = 600 \text{ }^\circ/\text{с}$ |
| Кутове переміщення:                           | необмежено                               |
| Ексцентриситет відносно осі А6:               | $L_{цм} = 0.1 \text{ м}$                 |
| Передаточне число редуктора:<br>Режим роботи: | $i_{р6} = 15$<br>$ТВ = 80 \text{ } \%$ . |

Електропривод степені рухомості А5:

|                                               |                                          |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------|
| Маса робочого органу:                         | $M_{роб} = 2.3 \text{ кг}$               |
| Кутова швидкість:                             | $\omega_5 = 360 \text{ }^\circ/\text{с}$ |
| Кутове переміщення:                           | $\Delta\varphi_{max5} = \pm 145^\circ$   |
| Ексцентриситет відносно осі А5:               | $L_{цм5} = 0.24 \text{ м}$               |
| Передаточне число редуктора:<br>Режим роботи: | $i_{р5} = 40$<br>$ТВ = 80 \text{ } \%$ . |

Електропривод степені рухомості А4:

|                                               |                                          |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------|
| Маса робочого органу:                         | $M_{ро4} = 10.24 \text{ кг}$             |
| Кутова швидкість:                             | $\omega_4 = 360 \text{ }^\circ/\text{с}$ |
| Кутове переміщення:                           | необмежено                               |
| Ексцентриситет відносно осі А5:               | $L_{цм4} = 0.177 \text{ м}$              |
| Передаточне число редуктора:<br>Режим роботи: | $i_{р4} = 50$<br>$ТВ = 80 \text{ } \%$ . |

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку

| №п\п | Показник                                | Позначення | Величина |
|------|-----------------------------------------|------------|----------|
| 1.   | Маса вантажу, кг                        | $m_v$      | 12       |
| 2.   | Маса ступеня рухомості, кг              | $m_{ср}$   | 3        |
| 3.   | Кутова швидкість, $^\circ/\text{с}$     | $\omega$   | 600      |
| 4.   | Кутове переміщення, $^\circ$            | $S_{max}$  | 720      |
| 5.   | Ексцентриситет відносно вісі привода, м | $L_{цм}$   | 0,1      |
| 6.   | Передаточне число редуктора             | $i_p$      | 30       |
| 7.   | Режим роботи, %                         | $ТВ$       | 80       |

### Основні вимоги до електропривода:

- 1). відносний статичний перепад швидкості у всьому діапазоні зміни статичного моменту –  $\delta \leq 10\%$ ;
- 2). для зниження кінематичних зусиль при переміщеннях необхідним є обмеження прискорення –  $\varepsilon \leq 52,36 \text{ рад/с}^2$ ;
- 3). час пуску не більше 0,2 с;
- 4). діапазон регулювання швидкості D повинен складати 50:1 для забезпечення точної зупинки приводу;
- 5). допускається зниження напруги живлення не більше ніж на 10% ;
- 6). точність зупинки –  $\Delta\varphi \leq 0.5^\circ$ .

### 2.2 Розрахунок потужності двигуна

Оскільки обертання робочих елементів у просторі залежить від руху кожної осі промислового робота, можливий випадок, коли переміщення центра ваги вантажу завжди протидіятиме силі тяжіння. Саме цей випадок ми візьмемо за основу для розрахунку статичних моментів.

Статичні моменти в розрахунку на один двигун:

$$M_{C1} = g \cdot (m_B + m_{CP}) \cdot L_{ЦМ} \cdot (1 + \kappa_{TP}) \text{ [Н} \cdot \text{м]}, \quad (2.1)$$

$$M_{C2} = |g \cdot (m_B + m_{CP}) \cdot L_{ЦМ} \cdot (-1 + \kappa_{TP})| \text{ [Н} \cdot \text{м]}, \quad (2.2)$$

$$M_{C1} = 9,81 \cdot (12 + 3) \cdot 0,1 \cdot (1 + 0,08) = 15,89 \text{ (Н} \cdot \text{м)},$$

$$M_{C2} = |9,81 \cdot (12 + 3) \cdot 0,1 \cdot (-1 + 0,08)| = 13,53 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Задаємося параметрами тахограми:

- час пуску:  $t_n = 0,2 \text{ с}$ ;
- час циклу:  $t_{ц} = 60 \text{ с}$ ;
- час роботи на встановленій швидкості:

$$t_y = t_{ц} \cdot TB - 4 \cdot t_{п} [с], \quad (2.3)$$

$$t_y = 60 \cdot 0,8 - 4 \cdot 0,2 = 47,2 (с).$$

Час паузи механізму:

$$t_0 = t_{ц} - 4 \cdot t_{п} - t_y [с], \quad (2.4)$$

$$t_0 = 60 - 4 \cdot 0,2 - 47,2 = 12 (с).$$

Момент інерції механізму:

$$J = (m_B + m_{ср}) \cdot L_{цм} [кг \cdot м^2], \quad (2.5)$$

$$J = (12 + 3) \cdot 0,1 = 0,15 (кг \cdot м^2).$$

Прискорення механізму промислового робота:

$$\varepsilon = \frac{\omega}{t_{п}} \left[ \frac{рад}{с^2} \right], \quad (2.6)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість механізму,

$$\omega = 600 \cdot \frac{\pi}{180}. \quad (2.7)$$

Виконуємо підстановку у вирази (2.6) та (2.7):

$$\omega = 600 \cdot \frac{3,14}{180} = 10,47 \left( \frac{рад}{с} \right),$$

$$\varepsilon = \frac{10,47}{0,2} = 52,36 \left( \frac{рад}{с^2} \right).$$

Динамічний момент механізму:

$$M_{дин.} = J \cdot \varepsilon [Н \cdot м], \quad (2.8)$$

$$M_{\text{дин.}} = 0,15 \cdot 52,36 = 7,86 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Розрахунок еквівалентного моменту проводиться, виходячи з того, що він дорівнює найбільшому статичному моменту, оскільки існує ймовірність перевертання відповідного ступеня рухомості.

Еквівалентний момент механізму:

$$M_{\text{екв.}} = \sqrt{\frac{[(M_{\text{с1}} + M_{\text{дин.}})^2 + (M_{\text{с1}} - M_{\text{дин.}})^2] \cdot 4 \cdot t_{\text{п}} + M_{\text{с1}}^2 \cdot t_{\text{у}}}{t_{\text{ц}} \cdot T_{\text{В}}}} [\text{Н} \cdot \text{м}], \quad (2.9)$$

$$M_{\text{екв.}} = \sqrt{\frac{[(15,89 + 7,86)^2 + (15,89 - 7,86)^2] \cdot 4 \cdot 0,2 + 15,89^2 \cdot 47,2}{60 \cdot 0,8}} = 16,1 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Приведемо еквівалентний момент двигуна до найближчого стандартного нормованого значення тривалості включення двигуна, яке складає 100 %.

$$M_{\text{екв.лп.}} = M_{\text{екв.}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{В}}}{T_{\text{В.норм.}}}} = 16,1 \cdot \sqrt{\frac{80}{100}} = 14,38 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (2.9)$$

Розрахункова потужність двигуна:

$$P_{\text{роз.}} = M_{\text{екв.лп.}} \cdot \omega [\text{Вт}], \quad (2.10)$$

$$P_{\text{роз.}} = 14,38 \cdot 10,47 = 150,64 \text{ (Вт)}.$$

Умови вибору двигуна:

$$\begin{cases} P_{\text{роз.}} \leq P_{\text{ном.}}, \\ \omega_{\text{роз.}} \approx \omega_{\text{ном.}} \end{cases} \quad (2.11)$$

По результатам виконаних розрахунків побудуємо тахограму та навантажувальну діаграму механізму промислового робота (див. рисунок 2.2).

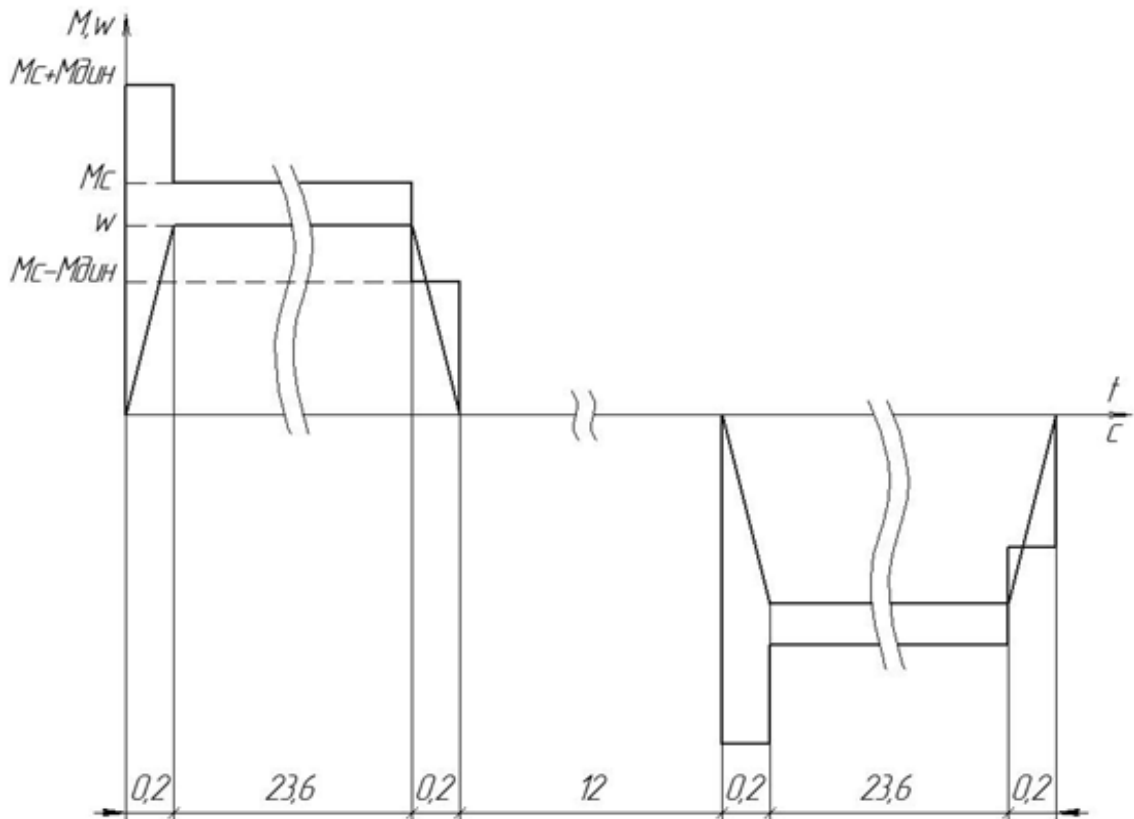


Рисунок 2.2 – Тахограма та навантажувальна діаграма механізму

Розрахункова потужність і момент відповідають таким електричним машинам, як синхронний двигун з постійними магнітами (СДПМ) або асинхронний двигун змінного струму з номінальною швидкістю 3000 об/хв. Однак, враховуючи, що швидкості двигунів осей А6 і А5 можуть досягати значно більших значень, при виборі для них ключовим параметром є не номінальна, а максимальна швидкість. При цьому спостерігається зниження моменту при перевищенні номінальної швидкості. Водночас такі високі швидкості досягаються в механічній руці лише через кінематичний взаємовплив, що призводить до зменшення моменту – тобто передатне відношення каналу осі змінюється і залежить від співвідношення швидкостей. Через це моменти на валах двигунів осей А6 і А5 при кінематичному взаємовпливі на максимальних швидкостях будуть більш ніж удвічі меншими, ніж моменти без врахування цього взаємовпливу.

## **3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА**

### **3.1 Технічне обґрунтування вибору системи електропривода**

Приводи маніпуляторів в загальному випадку представляють рухову систему промислових роботів, які складаються із силових двигунів, передавальних та виконавчих механізмів.

Крім того, в них є подільно-перетворювальні пристрої та сенсори переміщення виконавчих механізмів.

Вибір типу електроприводу залежить від призначення та умов експлуатації ПР, від виду системи керування, вантажопідйомності та динамічних характеристик конструкції ПР.

Загальні вимоги до будь-якого виду приводів промислового робота:

1. мінімальні габаритні розміри, маса та інерція;
2. високі енергетичні показники (відношення потужності до маси);
3. можливість роботи в автоматичному режимі при мінімальному часі розгону та гальмування;
4. висока питома потужність та ККД;
5. великий коефіцієнт підсилення потужності (відношення сигналу керування до вихідної потужності);
6. велике робоче зусилля (момент на виході);
7. широкий діапазон регулювання швидкостей, характеристики з великим запасом стійкості та плавності руху;
8. швидкодія – робота виконавчого механізму з високими швидкостями та мінімальними похибками;
9. достатня точність фіксації заданих переміщень (точність до 0,01мм);
10. невелика маса елементів приводу при високому ККД всієї конструкції;
11. забезпечення безпеки (шляхом мінімізації часу гальмування,

легкості відключення приводу та зняття прикладених зусиль);

12. можливість вбудовування систем охолодження і терморегулювання для забезпечення теплових режимів роботи приводу та стабільності його характеристик;

13. зручність монтажу, обслуговування, ремонту, переналагодження;

14. низький шум;

15. економічність витрати енергоносія при високому ККД;

16. невисоку вартість та ін.

Даний розділ роботи присвячений задачі вибору та опису у загальних рисах переваг вибору тієї чи іншої системи керування електричного приводу та подальшого вирішення прикладної задачі розрахунку одного з двох основних типів регульованого електроприводу – постійного або змінного струму.

Особливе значення має завдання отримання за допомогою порівняно простих засобів хороших регульовальних властивостей електричних двигунів і, зокрема, асинхронного двигуна або синхронного двигуна з постійними магнітами – найбільш поширених, простих та надійних в експлуатації пристроїв. Питання регулювання швидкості обертання двигунів змінного струму знаходяться постійно в центрі уваги дослідників. Це викликано тим, що асинхронний/синхронний двигун є набагато легшим та значно дешевшим за двигун постійного струму при однаковій потужності та швидкості обертання. Асинхронні двигуни відрізняються простотою конструкції, високим ККД та надійністю. Вони мають високі динамічні якості. Проте відносно регульовальних властивостей асинхронні двигуни поступаються двигунам постійного струму, що обмежує область їх застосування. Проте в багатьох випадках завдання регулювання швидкості обертання робочого механізму може бути вирішене і при застосуванні асинхронних двигунів.

Регулювання швидкості зміною напруги на статорі асинхронного двигуна в замкнутій системі, яке здійснюється за допомогою тиристорного

регулятора напруги, дозволяє збільшити плавність та розширити діапазон регулювання швидкості асинхронного електроприводу, але тільки до критичного ковзання. В розімкнутій системі асинхронного електроприводу ефективність такого регулювання швидкості обмежена малим діапазоном стійких режимів роботи двигуна. Розширити функціональні можливості асинхронного електроприводу можна в замкнених системах. Недоліком цього способу регулювання є те, що втрати ковзання при регулюванні швидкості розсіюються у вигляді тепла в двигуні.

Застосування тиристорів дає ряд переваг: тиристорні регулятори напруги є практично безінерційними, мають великий коефіцієнт підсилення по потужності та високий ККД.

### 3.2 Економічне обґрунтування вибору системи електропривода

Для порівняння техніко-економічних показників систем електроприводу розглядатимемо такі системи:

- тиристорний перетворювач із двигуном постійного струму (ТП-ДПС);
- широтно-імпульсний перетворювач з двигуном постійного струму (ШІП-ДПС);
- перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ-АД).

Розглянемо ці варіанти з економічної точки зору. Використовуємо метод зведених витрат:

$$Z = E_n \cdot K + C, \quad (3.1)$$

де  $E_n$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності ( $E_n=0,15$ );

$K$  – капіталовкладення, в які входять вартість двигуна  $D$  та системи керування СК;

$C$  – собівартість.

$$C = C_a + C_0 + C_{\Delta W}, \quad (3.2)$$

де  $C_0$  – витрати на обслуговування і ремонт.

$$C_0 = E_0 \cdot K, \quad (3.3)$$

де  $C_a$  – амортизаційні відрахування.

$$C_a = E_a \cdot K, \quad (3.4)$$

де  $E_a$  – коефіцієнт ( $E_a = 0,05$ );

$C_{\Delta W}$  – витрати на електроенергію ( $E_o = 0,015$ ).

$$C_{\Delta W} = m_0 \cdot \Delta W, \quad (3.5)$$

де  $m_0$  – вартість електроенергії;

$\Delta W$  – кількість втраченої електроенергії за рік.

$$\Delta W = \Delta P \cdot T_p, \quad (3.6)$$

де  $T_p$  – річний час роботи механізму за рік.

Час роботи механізму за рік:

$$T_p = d \cdot z \cdot t, \quad (3.7)$$

де  $d$  – кількість робочих днів ( $d = 250$ );

$z$  – кількість змін ( $z = 3$ );

$t$  – кількість робочих годин в день ( $t = 8$ ).

$$T_p = 250 \cdot 3 \cdot 8 = 6000 \text{ (год)}.$$

Ціна на універсальні послуги для малих непобутових споживачів (Постанова НКРЕКП від 11.12.2018 №1863), електроустановки яких приєднані до електричних мереж згідно з класом напруги з ПДВ складає приблизно 3,44 грн/кВт·год.

Втрати потужності:

$$\Delta P = k_3 \cdot P_n \cdot (1 - \eta_d) / \eta_d, \quad (3.8)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт завантаження ( $k_3 = 0,7$ ).

$\eta_d$  – ККД двигуна ( $\eta_d = 0,92$ ).

Термін окупності:

$$T = K / Z. \quad (3.9)$$

Покажемо приклад розрахунку для системи ПЧ-АД. Результати розрахунків зводимо в таблиці 3.1.

При вартості двигуна  $D = 1272$  грн. та системи керування СК = 3083 грн. капіталовкладення становитимуть:

$$K = D + СК, \quad (3.10)$$

$$K = 5088 + 12332 = 17420 \text{ (грн.)}.$$

Амортизаційні витрати відповідно:

$$C_a = 0,07 \cdot 17420 = 1219 \text{ (грн.)}.$$

Витрати на обслуговування і ремонт:

$$C_o = 0,02 \cdot 17420 = 348 \text{ (грн.)}.$$

Втрати потужності відповідно до (3.8):

$$\Delta P = 0,7 \cdot 0,18 \cdot (1 - 0,92) / 0,92 = 0,011 \text{ (кВт)}.$$

Кількість втраченої електроенергії за рік відповідно до (3.6):

$$\Delta W = 0,011 \cdot 6000 = 66 \text{ (кВт·год)}.$$

Витрати на електроенергію відповідно до (3.5):

$$C_{\Delta W} = 10,93 \cdot 66 = 721,4 \text{ (грн.)}.$$

Таблиця 3.1 – Економічне порівняння варіантів систем електропривода

| Показники                                                                      | Тип системи електроприводу |        |         |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------|---------|
|                                                                                | ТП-ДПС                     | ШП-ДПС | ПЧ-СДПМ |
| Потужність двигуна $P_n$ , кВт                                                 | 0,18                       |        |         |
| Вартість двигуна (Д), грн.                                                     | 7432                       | 7432   | 5088    |
| Вартість системи керування (СК), грн.                                          | 12960                      | 13576  | 12332   |
| Капіталовкладення $K=D+СК$ , грн                                               | 20392                      | 21008  | 17420   |
| $E_a$                                                                          | 0,07                       |        |         |
| Амортизаційні відрахування,<br>$C_a = E_a * K$ , грн.                          | 1427                       | 1471   | 1219    |
| $E_o$                                                                          | 0,02                       |        |         |
| Витрати на обслуговування і ремонт,<br>$C_o = E_o * K$ , грн.                  | 408                        | 420    | 348     |
| Вартість електроенергії<br>$m_o$ , грн/кВт год                                 |                            |        |         |
| Коефіцієнт завантаження $k_z$                                                  | 0,7                        |        |         |
| Річний час роботи $T_p$ , год                                                  | 6000                       |        |         |
| ККД $\eta_d$ , %                                                               | 0,85                       | 0,85   | 0,92    |
| Втрати потужності,<br>$\Delta P = k_z * P_n * (1 - \eta_d / \eta_n)$ , кВт     | 0,022                      | 0,022  | 0,011   |
| Кількість втраченої електроенергії за рік<br>$\Delta W = \Delta P * T_p$ , кВт | 132                        | 132    | 66      |
| Витрати на електроенергію,<br>$C_{\Delta W} = m_o * \Delta W$ , грн            | 1443                       | 1443   | 721,4   |
| Собівартість<br>$C = C_a + C_o + C_{\Delta W}$ , грн.                          | 3278                       | 3333   | 2289    |
| Нормативний коефіцієнт економічної ефективності $E_n$                          | 0,15                       |        |         |
| Зведені витрати<br>$Z = E_n * K + C$ , грн.                                    | 6336,8                     | 6484,7 | 4902,2  |

Собівартість із врахування обслуговування та витрат електроенергії відповідно до (3.2):

$$C = 1219 + 348 + 721,4 = 2289 \text{ (грн.)}.$$

Зведені витрати відповідно до (3.1):

$$З = 0,15 \cdot 17420 + 2289 = 4902,2 \text{ (грн.)}.$$

Аналогічним чином розраховуються економічні показники і для інших систем.

**Висновок:** Аналізуючи таблицю 3.1, можна зробити висновок, що з точки зору енергозбереження, надійності функціонування та динамічних характеристик електропривода кращим варіантом системи електроприводу є система ПЧ-СДПМ.

## 4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СТУПЕНІВ РУХОМОСТІ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

### 4.1 Вибір електродвигуна

В електроприводах промислових роботів з вантажопідйомністю від 5 кг і більше зазвичай застосовують синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ). Розглянемо переваги цього типу двигунів, враховуючи, що залежно від форми електрорушійної сили (ЕРС) СДПМ може працювати як двигун змінного струму, так і як двигун постійного струму (бесщітковий двигун постійного струму — БДПС або векторний двигун — ВД):

- Відсутність контактів і вузлів, які потребують технічного обслуговування, робить СДПМ більш надійними та довговічними у порівнянні з двигунами постійного струму або асинхронними двигунами з фазним ротором. Завдяки цьому збільшується робочий діапазон частот обертання. Обмотка якоря в векторних двигунах може працювати при вищій напрузі, що забезпечує більшу константу моменту ( $C_m$ ), дозволяючи використовувати кабелі меншого перетину та перетворювачі електроенергії з меншими струмами.

- Висока здатність короткочасного перевантаження: момент і струм можуть перевищувати номінальні значення у 5 разів і більше.

- Відмінна швидкодія під час переходових процесів у моменті.

- Жорстка механічна характеристика та майже необмежений діапазон регулювання частоти обертання (до 1:10000 і більше). Можливість регулювати частоту обертання як нижче номінальної, з збереженням тривалих і максимальних моментів, так і вище номінальної з підтримкою постійної потужності.

- Високі енергетичні показники, такі як ККД і коефіцієнт потужності. ККД СДПМ перевищує 90% і майже не змінюється при варіаціях навантаження, тоді як у стандартних асинхронних двигунів до 10 кВт

максимальний ККД не перевищує 87,5% і суттєво падає при зниженні навантаження — наприклад, до 60-70% при половинному навантаженні.

- Мінімальні струми холостого ходу.
  - Компактні розміри і низька маса при однакових параметрах.
- Відсутність електричних і магнітних втрат у роторі, а також застосування сучасних рідкоземельних постійних магнітів (наприклад, неодим-залізо-бор), які забезпечують високу індукцію в повітряному зазорі (до 0,8 Тл), дозволяють підвищити лінійне навантаження, зберігаючи при цьому сумарні втрати на сталому рівні. Це пояснює високу електромеханічну ефективність СДПМ у порівнянні з іншими безконтактними електродвигунами змінного струму.

Характеристики двигуна приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Паспортні характеристики двигуна ASMT04250LBK

| Параметр, одиниця вимірювання              | Позначення           | Значення            |
|--------------------------------------------|----------------------|---------------------|
| Потужність, Вт                             | $P_{\text{ном}}$     | 180                 |
| Частота обертання, об/хв                   | $n_{\text{ном}}$     | 3000                |
| Номинальний струм, А                       | $I_{\text{1ном}}$    | 0,52                |
| Коефіцієнт потужності                      | $\cos\varphi$        | 0,78                |
| ККД                                        | $\eta$               | 0,92                |
| Напруга статора, В                         | $U_{\text{1н}}$      | 380                 |
| Кратність критичного моменту               | $\lambda_{\text{к}}$ | 2,2                 |
| Кратність пускового моменту                | $\lambda_{\text{п}}$ | 2                   |
| Момент інерції, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ | $J_{\text{р}}$       | $0,42\cdot 10^{-3}$ |
| Частота мережі живлення, Гц                | $f$                  | 50                  |
| Кількість фаз                              | $m$                  | 3                   |

Отже, враховуючи розрахункову потужність електродвигуна промислового робота та його синхронну частоту обертання, було обрано синхронний двигун моделі ASMT04250LBK, оснащений вбудованим гальмом і енкодером з роздільною здатністю 2500 імпульсів на оберт.

#### 4.1.1 Розрахункові співвідношення вибраного електродвигуна

Розрахункові величини вибраного двигуна.

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{30} \left( \frac{\text{об}}{\text{хв}} \right), \quad (4.1)$$

$$\omega_H = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314 \left( \frac{\text{об}}{\text{хв}} \right).$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{НОМ.}} = \frac{P_{\text{НОМ.}}}{\omega_{\text{НОМ.}}} [\text{Н} \cdot \text{м}], \quad (4.2)$$

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{180}{314} = 0,63 (\text{Н} \cdot \text{м}).$$

Критичний момент двигуна:

$$M_{\text{кр.}} = \lambda_{\text{кр.}} \cdot M_{\text{НОМ.}} [\text{Н} \cdot \text{м}], \quad (4.3)$$

$$M_{\text{кр.}} = 2,2 \cdot 0,63 = 1,38 (\text{Н} \cdot \text{м}).$$

Пусковий момент двигуна:

$$M_{\text{п.}} = \lambda_{\text{п.}} \cdot M_{\text{НОМ.}} [\text{Н} \cdot \text{м}], \quad (4.4)$$

$$M_{\text{п.}} = 2 \cdot 0,63 = 1,26 (\text{Н} \cdot \text{м}).$$

#### 4.1.2 Перевірка вибраного двигуна за нагрівом та перевантаженням

Перевіримо двигун за умовою максимального моменту:

$$M_{\text{МАХ.}} < M_{\text{ДОП.}}, \quad (4.5)$$

$$M_{\text{ДОП.}} = 0,8 \cdot M_{\text{кр.}}, \quad (4.6)$$

$$M_{\text{доп.}} = 0,8 \cdot 1,38 = 1,11 \text{ (Н} \cdot \text{м)},$$

$$0,79 \text{ (Н} \cdot \text{м)} < 1,11 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

За перевантажувальною здатністю двигун задовольняє вимоги.

Перевіримо двигун за нагрівом.

Запропонований цикл допускає 120 включень за годину. Розрахуємо допустиму частоту включень для вибраного двигуна згідно [1].

Номінальне ковзання:

$$S_{\text{НОМ.}} = \frac{n_0 - n_{\text{НОМ.}}}{n_0}, \quad (4.7)$$

$$S_{\text{НОМ.}} = \frac{3000 - 2730}{3000} = 0,09.,$$

Повні втрати потужності в двигуні за умов номінального режиму:

$$\Delta P_{\text{НОМ.}} = P_{\text{НОМ.}} \cdot \frac{(1 - \eta)}{\eta} [\text{Вт}], \quad (4.8)$$

$$\Delta P_{\text{НОМ.}} = 180 \cdot \frac{(1 - 0,68)}{0,68} = 84,7 \text{ (Вт)}.$$

Змінні втрати в обмотках статора та ротора в номінальному режимі:

$$\Delta P_{\text{НОМ.ЗМ.}} = M_{\text{НОМ.}} \cdot \omega_{\text{НОМ.}} \cdot S_{\text{НОМ.}} \cdot \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) [\text{Вт}], \quad (4.9)$$

$$\Delta P_{\text{НОМ.ЗМ.}} = 0,63 \cdot 314,16 \cdot 0,09 \cdot \left( 1 + \frac{72,74}{40,22} \right) = 41 \text{ (Вт)}.$$

Постійні втрати потужності:

$$\Delta P_{\text{НОМ.ПОСТ.}} = \Delta P_{\text{НОМ.}} - \Delta P_{\text{НОМ.ЗМ.}} [\text{Вт}], \quad (4.10)$$

$$\Delta P_{\text{НОМ.ПОСТ.}} = 84,7 - 41 = 43,7 \text{ (Вт)}.$$

Середній момент двигуна при пуску:

$$M_{\text{CP.}} = \frac{M_{\text{П.}} + M_{\text{КР.}}}{2} [\text{Н} \cdot \text{м}], \quad (4.11)$$

$$M_{\text{CP.}} = \frac{1,26 + 1,38}{2} = 1,32 (\text{Н} \cdot \text{м}).$$

Сумарний момент інерції:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{P}} + \frac{J}{i_{\text{P}}^2} [\text{кг} \cdot \text{м}^2] \quad (4.12)$$

$$J_{\Sigma} = 0,42 \cdot 10^{-3} + \frac{0,15}{30^2} = 0,58 \cdot 10^{-3} (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

Втрати енергії при пуску, обумовлені змінними втратами:

$$\Delta W = J_{\Sigma} \cdot \omega_0^2 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot (1 - S_{\text{НОМ.}}^2) \cdot \frac{M_{\text{CP.}}}{2 \cdot \left(M_{\text{CP.}} - \frac{M_{\text{CL}}}{i_{\text{P}}}\right)} [\text{Вт}], \quad (4.13)$$

$$\Delta W = 0,58 \cdot 10^{-3} \cdot 314,16^2 \cdot \left(1 + \frac{72,74}{40,22}\right) \cdot (1 - 0,09^2) \cdot \frac{1,32}{2 \cdot \left(1,32 - \frac{15,89}{30}\right)} = 134,54 (\text{Вт}).$$

Втрати енергії при пуску, обумовлені постійними втратами:

$$\Delta W_{\text{ПОСТ}} = \Delta P_{\text{НОМ.ПОСТ.}} \cdot t_{\text{П}} [\text{Вт}], \quad (4.14)$$

$$\Delta W_{\text{ПОСТ}} = 43,7 \cdot 0,2 = 8,74 (\text{Вт}).$$

Сумарні втрати при пуску:

$$\Delta W_{\text{ПУСК}} = \Delta W_{\text{ПОСТ}} + \Delta W [\text{Вт}], \quad (4.15)$$

$$\Delta W_{\text{ПУСК}} = 8,74 + 134,54 = 143,28 (\text{Вт}).$$

Допустима частота включення двигуна згідно формули:

$$h = 3600 \cdot \frac{\Delta P_{\text{НОМ.}} \cdot \beta \cdot (1 - \text{ТВ})}{\Delta W_{\text{ПУСК}}} \left[ \frac{\text{ВКЛ.}}{\text{ГОД.}} \right], \quad (4.16)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт погіршення тепловіддачі згідно таблиці з літературного джерела [1] ( $\beta = 0,3$ ).

$$h = 3600 \cdot \frac{84,7 \cdot 0,3 \cdot (1 - 0,8)}{143,28} = 128 \left( \frac{\text{ВКЛ.}}{\text{ГОД.}} \right).$$

Двигун по нагріву підходить.

## 4.2 Огляд можливих варіантів електроприводу

Дві найбільш ефективні системи управління для синхронних двигунів із синусоїдальною ЕРС — це векторне управління (ВУ) та пряме управління моментом (ПУМ). Вони були розроблені у 70-80-х роках ХХ століття. Обидві системи здійснюють контроль над моментом і магнітним потоком, що дозволяє точно виконувати задану траєкторію руху, навіть при зміні параметрів двигуна або навантаження в умовах різних зовнішніх впливів. Станом на сьогодні немає однозначної думки щодо переваги якоїсь із цих систем [12].

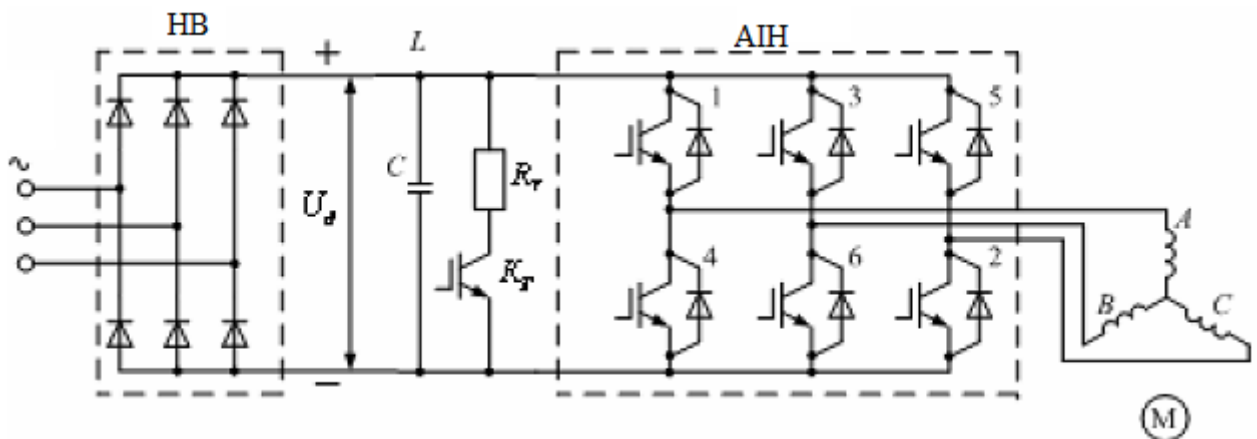


Рисунок 4.1 – Структура силової частини ПР

Силова схема цих двох систем однакова і є дволанковий перетворювач частоти з некерованим випрямлячем (НВ) і автономним інвертором напруги (АІН).

Керуючі сигнали на вихідні параметри трифазного інвертора напруги — середньоквадратичні значення фазних струмів і напруг двигуна, формуються в декартовій системі координат, що обертається  $(d, q)$ . Вісь  $d$  орієнтована вздовж поздовжньої осі ротора СДПМ або, в окремих випадках, вздовж вектора. Струм якоря по поперечній осі  $q$ , який пропорційний електромагнітному моменту (це справедливо для неявнополюсних машин із рівними індуктивностями обмоток по осях  $d$  і  $q$ ), задається подібно до струму якоря в класичній машині постійного струму, зазвичай через вихід регулятора. Таким чином, у системах керування застосовується відомий принцип підлеглого регулювання координат. Струм якоря по осі  $d$ , що є аналогом струму збудження машини постійного струму, дозволяє оптимізувати процес електромеханічного перетворення енергії і здійснювати регулювання частоти обертання СДПМ у другій зоні (вище основної) при збереженні сталої потужності [12].

Як приклад на рисунку 4.2 наведено укрупнену функціональну схему системи управління СДПМ змінного струму з безпосередньою орієнтацією обертової системи координат за положенням ротора двигуна. На малюнку: РШ та РС — регулятори швидкості та струмів двигуна; ОШ - обчислювач швидкості; ПК1 та ПК2 — перетворювачі координат; СП - сенсор положення ротора. Джерело уставки струму  $isd$  на малюнку не вказано. У такій системі можуть бути досягнуті максимальні діапазони регулювання частоти обертання (до 105) та найвища швидкодія, яка характеризується смугою пропускання частот контуру регулювання швидкості, що становить до 500 Гц. Час реакції моменту двигуна на стрибок завдання струму  $isq$  може становити  $10^{-5} \dots 10^{-4}$  з [12].

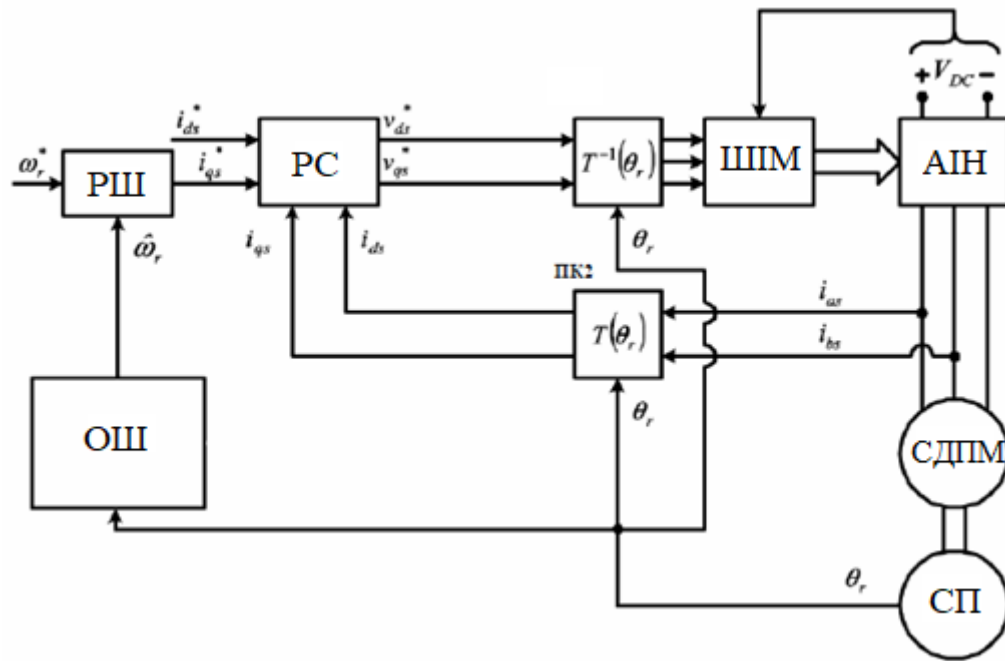


Рисунок 4.2 – Функціональна схема управління СДПМ змінного струму з безпосередньою орієнтацією системи координат, що обертається, за положенням ротора двигуна

Пряме керування моментом ПУМ також є векторним керуванням, але вибір вектора напруги ведеться по заданій таблиці значень. Цей принцип можна реалізувати з допомогою гистерезисних регуляторів потокозчеплення статора і моменту [13].

У цій роботі буде використано принцип векторного частотно-струмового регулювання з непрямою орієнтацією по полю. Детальний опис цієї системи наведено в розділі 3.

### 4.3 Розрахунок та вибір основних елементів силової схеми

#### 4.3.1 Розрахунок інвертора

Максимальний струм через ключі інвертора:

$$I_{\text{CMAX}} = \frac{P_{\text{НОМ}} \cdot k_1 \cdot \sqrt{2} \cdot k_2}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot \cos \phi \cdot \eta} [\text{A}], \quad (4.1)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт допустимого короткочасного перевантаження по струму ( $k_1 = 1,5$ );

$k_2$  – коефіцієнт допустимої миттєвої пульсації струму ( $k_2 = 1,2$ ).

$$I_{\text{сmax.}} = \frac{180 \cdot 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,2}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,78 \cdot 0,68} = 1,313 \text{ (A)}.$$

Транзистори IGBT вибираємо згідно умови:  $I_c \geq I_{\text{сmax}}$

$$I_c \geq I_{\text{сmax}}. \quad (4.2)$$

Вибираємо транзистор типу IRGB4059DPBF, який має наступні параметри:

- робочий струм (при  $25^\circ \text{C}$ ):  $I_c = 8 \text{ A}$ ;
- напруга насичення (при  $125^\circ \text{C}$ ):  $U_{\text{ce(sat)}} = 2.2 \text{ V}$ ;
- клас по напрузі:  $U_{\text{ce}} = 600 \text{ V}$ .

Транзистор випускається в корпусі із зустрічно-паралельним діодом.

Втрати в IGBT в провідному стані:

$$P_{\text{ss}} = I_{\text{cp}} \cdot U_{\text{cesat}} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{D}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \varphi \right) [\text{Вт}], \quad (4.3)$$

де  $D$  – максимальна скважність ( $D = 0.95$ );

$U_{\text{cesat}}$  – пряме падіння напруги на IGBT в насиченому стані при  $I_{\text{cp}}$  та  $T_j$  рівному  $125^\circ \text{C}$  ( $U_{\text{cesat}} = 2.2 \text{ V}$ );

$I_{\text{cp}}$  – максимальна величина амплітуди струму на виході інвертора, (A).

$$I_{\text{cp}} = I_{\text{сmax}}/k_1 = 1.313/1.5 = 0.875 \text{ (A)}, \quad (4.4)$$

$$P_{\text{ss}} = 0,875 \cdot 2,2 \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{0,95}{3 \cdot 3,14} \cdot 0,78 \right) = 0,392 \text{ (Вт).,}$$

Втрати в IGBT при комутації:

$$P_{sw} = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{I_{cp} \cdot U_{cc} \cdot (t_{con} + t_{coff}) \cdot f_{sw}}{2} [Вт], \quad (4.5)$$

де  $t_{con}$  – тривалість перехідних процесів в колі колектора IGBT на відкриття транзистора ( $t_{con} = 0.3$  мкс);

$t_{coff}$  – тривалість перехідних процесів в колі колектора IGBT на закривання транзистора ( $t_{coff} = 0.6$  мкс);

$U_{cc}$  – напруга на колекторі струму для системи GBT (напруга ланки постійного струму для системи АІН-ШІМ) ( $U_{cc} = k_{cx} U_L = 1.35 \cdot 380 = 513$  В);

$f_{sw}$  – частота ШІМ ( $f_{sw} = 104$  Гц).

$$P_{sw} = \frac{1}{3,14 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{1,36 \cdot 513 \cdot (0,3 + 0,6) \cdot 10^{-6} \cdot 10^4}{2} = 0,455 (Вт).$$

Сумарні втрати IGBT:

$$P_Q = P_{ss} + P_{sw} = 0,392 + 0,455 = 0,847 (Вт)., \quad (4.6)$$

Втрати діода в провідному стані:

$$P_{ds} = I_{cp} \cdot U_{es} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{D}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \varphi \right) [Вт], \quad (4.7)$$

де  $I_{cp}$  – максимум амплітуди струму через зворотний діод ( $I_{cp} = I_{cp} = 0,875$  А);

$U_{ec}$  – пряме падіння напруги на зворотному діоді (в провідному стані) ( $U_{ec} = 0.7$  В).

$$P_{ds} = 0,875 \cdot 0,7 \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{0,95}{3 \cdot 3,14} \cdot 0,78 \right) = 0,125 (Вт).$$

Втрати відновлення запираючих властивостей діода:

$$P_{dr} = \frac{1}{8} \cdot I_{rr} \cdot U_{cc} \cdot f_{sw} [Вт], \quad (4.8)$$

де  $I_{rr}$  – амплітуда зворотного струму через діод ( $I_{rr} = I_{cp} = 0.875$  А);

$t_{rr}$  – тривалість імпульса зворотного струму ( $t_{rr} = 0.2$  мкс).

$$P_{dr} = \frac{1}{8} \cdot 0.875 \cdot 513 \cdot 0.2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4 = 0.112 (Вт).$$

Сумарні втрати діода:

$$P_D = P_{ds} + P_{dr} [Вт], \quad (4.9)$$

$$P_D = 0.125 + 0.112 = 0.237 (Вт).$$

Результуючі втрати в IGBT із зворотним діодом:

$$P_T = P_Q + P_d [Вт], \quad (4.10)$$

$$P_T = P_Q + P_d = 0.847 + 0.237 = 1.084 (Вт),$$

Температура кристалу IGBT:

$$T_{ja} = T_c + P_Q \cdot R_{thj-cq} = 100 + 0.847 \cdot 0.7 = 100.6 \text{ C} < 125 \text{ C}, \quad (4.11)$$

де  $T_c$  – температура теплопровідної пластини ( $T_c = 100^\circ \text{C}$ );

$R_{thj-cq}$  – термічний перехідний опір кристал-корпус для IGBT частини модуля [2] ( $R_{thj-cq} = 0.7 \text{ C/Вт}$ ).

Температура кристаллу зворотного діода FWD:

$$T_{ja} = T_c + P_D R_{thj-cd} = 100 + 0.237 \cdot 2 = 100.5 \text{ C} < 125^\circ \text{C}, \quad (4.12)$$

де  $T_c$  – температура теплопровідної пластини ( $T_c = 100 \text{ C}$ );

$R_{thj-cd}$  – термічний перехідний опір кристал-корпус для FWD частини модуля [2] ( $R_{thj-cd} = 2 \text{ C/Вт}$ ).

### 4.3.2 Розрахунок випрямляча

Середня випрямлена напруга згідно [4]:

$$U_d = k_{CX} \cdot U_L [B], \quad (4.13)$$

$$U_d = 1,35 \cdot 380 = 513 (B).$$

Максимальне значення середнього випрямленого струму:

$$I_d = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{I_{C\text{MAX}}}{\sqrt{2}} \cdot U_L \cdot \cos\varphi + N \cdot P_T}{U_d} [A], \quad (4.14)$$

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

$$I_d = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{1,313}{\sqrt{2}} \cdot 380 \cdot 0,78 + 6 \cdot 1,084}{513} = 0,941 (A).$$

Максимальний робочий струм діода:

$$I_{HT} = k_{CC} \cdot I_d = 1,045 \cdot 0,941 = 0,984 (A), \quad (4.15)$$

де  $k_{CC}$  – коефіцієнт, при оптимальних параметрах  $\Gamma$ -подібного фільтра для 3-фазной мостовой схеми приймає значення рівне 1,045.

Максимальна зворотна напруга вентиля:

$$U_{HT} = k_{3H} \cdot \sqrt{2} \cdot U_L \cdot k_{CX} \cdot k_C + \Delta U_n [B], \quad (4.16)$$

де  $k_C$  – коефіцієнт допустимого підвищення напруги мережі ( $k_C = 1.1$ );

$\Delta U_n$  – запас на комутаційні викиди напруги в ланці постійного струму ( $\Delta U_n = 120 \text{ B}$ ).

$$U_{HT} = 1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1,35 \cdot 1,1 + 120 = 1078 (B).$$

Діоди вибираються по постійному робочому струму та по класу напруги. Вибираємо діод типу EM518, який має наступні параметри:

- повторна постійна зворотна напруга:  $U_{обрmax} = 1300 \text{ В}$ ;
- максимальний прямий струм:  $I_{прmax} = 1 \text{ А}$ .

#### 4.3.3 Розрахунок фільтра

Коефіцієнт пульсацій на вході фільтра [4]:

$$q_{\text{ВХ}} = \frac{2}{m^2 - 1}, \quad (4.17)$$

де  $m$  – кількість пульсацій схеми випрямлення ( $m = 6$ ).

$$q_{\text{ВХ}} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057.$$

Величина мінімальної індуктивності фільтра:

$$L_{\text{0МН}} = \frac{0,013 \cdot U_{\text{Л}}}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot I_d} [\text{Гн}], \quad (4.18)$$

де  $I_d$  – номінальний середній струм ланки постійного струму ( $I_d = 0.94 \text{ А}$ ).

$$L_{\text{0МН}} = \frac{0,013 \cdot 380}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,94} = 17 \cdot 10^{-3} (\text{Гн}).$$

Для забезпечення коефіцієнта потужності на виході випрямляча  $k_m = 0.95$  індуктивність дроселя визначається умовою  $L_0 \geq L_{\text{0МН}}$ . Тоді необхідне значення індуктивності:

$$L_0 = 3 \cdot L_{\text{0МН}} = 3 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 51 \cdot 10^{-3} (\text{Гн}). \quad (4.19)$$

Вибираємо дросель типу РОБС-1АУЗ, який має такі параметри:

- струм згладжую чого дроселя:  $I = 3 \text{ А}$ ;
- індуктивність:  $L = 70 \text{ мГн}$ .

Ємність конденсатора, яка є необхідною для протікання реактивного струму навантаження інвертора:

$$C_{03} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{НОМ.}}}{2 \cdot U_d \cdot m \cdot f_s \cdot q_1} [\text{мкФ}], \quad (4.20)$$

$$C_{03} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,52}{2 \cdot 513 \cdot 6 \cdot 50 \cdot 0,057} = 51 (\text{мкФ}).$$

Вибираємо конденсатор типу К50-35, який має наступні параметри:

- номінальна напруга:  $U_n = 350 \text{ В}$ ;
- номінальна ємність:  $C_n = 220 \text{ мкФ}$ .

#### 4.4 Математичні модель системи електропривода

##### 4.4.1 Математична модель СДПМ

Рівняння синхронної магнітоелектричної машини в осях d-q:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \cdot \omega \cdot i_q \\ \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \cdot \omega \cdot i_d - \frac{\psi \cdot p \cdot \omega}{L_q} \\ M_e = 1,5 \cdot p \cdot (\psi \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q) \\ \frac{d}{dt} \omega = \frac{1}{J} (M_m - F \cdot \omega - M_e) \end{cases},$$

де  $i_d$ ,  $i_q$  – проекції струму статора на вісях d і q відповідно, А;

$u_d$ ,  $u_q$  – проекції напруги, які підводяться до статора на вісях d та q відповідно, В;

$L_d$ ,  $L_q$  – індуктивності синхронної машини по повздовжній та поперечній вісях, Гн;

$R$  – активний опір фази статора, Ом;

$p$  – число пар полюсів;

$\omega$  – частота обертання ротора, рад/с;

- $\psi$  – потокозчеплення фази статора, Вб,  
 $M_m$  – механічний момент привода, Н·м;  
 $F$  – коефіцієнт, який враховує тертя в підшипниках електричної машини, Н·м·с;  
 $J$  – момент інерції електричної машини;  
 $M_e$  – електромагнітний момент електричної машини, Н·м.

#### 4.4.2 Математична модель САЕП

Регулювання швидкості синхронного двигуна здійснюється шляхом керування не напругою, а струмом статора  $\bar{I}_1$  та частотою  $f_1$ . Такий спосіб управління відомий як частотно-струмовий. У цьому режимі перетворювач частоти функціонує як джерело струму.

Зв'язок між струмом  $\bar{I}_1$  і відповідним потокозчепленням описується одним з рівнянь, приведених в літературному джерелі. Всі три рівняння можна представити у вигляді

$$\bar{\Psi} = x \cdot \frac{1 + jd}{1 + jc} \cdot \bar{I}_1 = x \cdot \frac{1 + jd}{1 + jc} \cdot I_{1x} \left( 1 + j \frac{I_{1y}}{I_{1x}} \right), \quad (4.21)$$

де  $c$  і  $d$  – коефіцієнти, які залежать від ковзання та параметрів машини;

$I_{1x}$  і  $I_{1y}$  – складові струму статора.

Найбільш просто реалізується керування із потозчепленням

$$\bar{\Psi}_2 = const, \quad (4.22)$$

оскільки в даному випадку  $d = 0$ .

Якщо забезпечити виконання умов

$$\begin{cases} I_{1x} = const, \\ \frac{I_{1y}}{I_{1x}} = \frac{x_2 s_a}{r_2}, \end{cases} \quad (4.23)$$

тоді можна отримати рівність виду:

$$\bar{\Psi}_2 = \Psi_{2x} = x_\mu I_{1x} = \text{const.} \quad (4.24)$$

Такий метод керування називається векторним частотно-струмовим керуванням з поточчепленням рівним  $\bar{\Psi}_2 = \text{const}$ . Оскільки в даному випадку забезпечуються найкращі (лінійні) механічні характеристики, то зі всіх методів векторного частотно-струмового керування даний метод отримав переважне застосування.

Векторна діаграма асинхронного двигуна при живленні від джерела струму та його схема заміщення наведені на рисунках 7.1 а та б відповідно. Якщо умовно прийняти струм ротора як

$$\bar{I}'_2 = \bar{I}_2 \frac{x_2}{x_\mu} \quad (4.25)$$

тобто збільшити вектор струму  $\bar{I}_2$  на діаграмі в  $x_2/x_\mu$  разів, а вісь  $x$  спрямувати вздовж вектора  $\bar{\Psi}_2$ , тоді векторна діаграма прийме вигляд, показаний на рисунку 7.1 а., а схема заміщення прийме вигляд, приведений на рисунку 4.3 б.

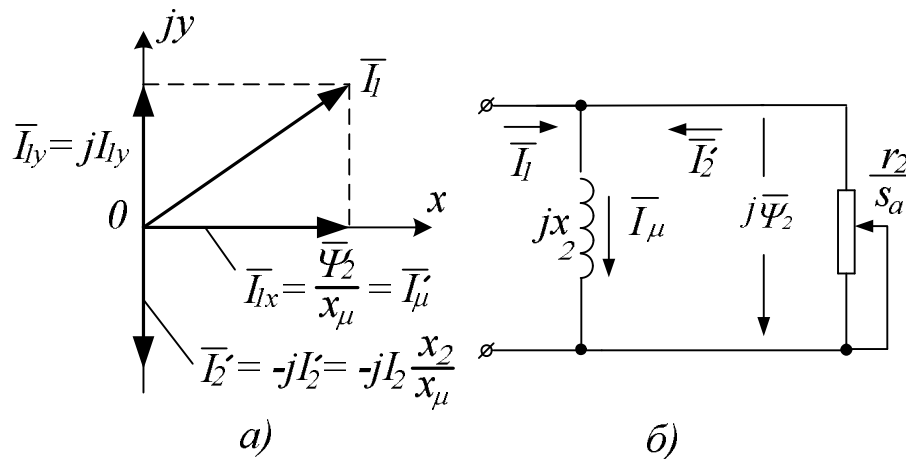


Рисунок 4.3 – Векторна діаграма (а) та схема заміщення СД (б) при частотно-струмовому векторному керуванню

Оскільки

$$\bar{I}_2 = \bar{I}'_2 \frac{x_\mu}{x_2} = -jI_{1y} \frac{x_\mu}{x_2}, \quad (4.26)$$

тому, згідно принципу частотно-струмового керування момент момент буде визначатись

$$\mu = x_{\mu} \operatorname{Im}(\bar{I}_1 \cdot \bar{I}_2^*) = x_{\mu} \operatorname{Im} \left[ (I_{1x} + jI_{1y}) jI_{1y} \frac{x_{\mu}}{x_2} \right] = \frac{x_{\mu}^2}{x_2} I_{1x} I_{1y} = \frac{x_{\mu}}{x_2} \Psi_{2x} I_{1y}. \quad (4.27)$$

Таким чином, формуючи дійсну частину вектора струму статора  $I_{1x}=\text{const}$ , а уявну частину  $I_{1y}$  та ковзання  $s_a$  згідно закону

$$s_a = \frac{r_2}{x_2} \cdot \frac{I_{1y}}{I_{1x}}, \quad (4.28)$$

Отримуємо результат, відповідно до якого виконуються рівності

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_2 = \Psi_{2x} = \text{const}, \\ \mu \equiv I_{1y}, \end{cases} \quad (4.29)$$

тобто керування струмом  $I_{1y}$ , при  $I_{1x}=\text{const}$  є еквівалентним керуванню моментом двигуна. При цьому вектор потокозчеплення  $\bar{\Psi}_2$  буде залишатися нерухомим в координатних вісях, які обертаються із частотою  $f_1$ .

Цей спосіб керування називається векторним частотно-струмовим керуванням з непрямою орієнтацією по полю двигуна, яка здійснюється через формування відповідного ковзання. У цьому випадку задаються струм  $I_{1y}$  та ковзання  $s_a$ , а частота  $f_1$  формується як сума сигналів від датчика швидкості та встановленого ковзання, що надходить з виходу блока завдання ковзання (БЗК).



На рисунку 4.4 позначено: РШ – регулятор швидкості; БПП – блок прямого перетворення; БЗК – блок задання величини ковзання; АД – асинхронний двигун; ДСа та ДСс – датчики струму, розташовані у фазах А і С відповідно; СШ – сенсор швидкості; ПЧ (АІН) – перетворювач частоти (автономний інвертор напруги).

Управління струмом  $I_{1yz}$  за допомогою регулятора швидкості РШ при  $I_{1xz} = \text{const}$  є еквівалентним управлінню моментом двигуна. При цьому вектор потокозчеплення ротора АД  $\bar{\Psi}_2$  при  $I_{1xz} = \text{const}$  буде залишатися нерухомим в координатних осях, що обертаються з частотою  $f_1 = v + s_a$ , яка формується як сума сигналів з датчика швидкості ДШ і задаваного ковзання з виходу блоку завдання ковзання БЗК. Блок БПП виконує пряме перетворення координат. Сигнали з релейними регуляторами струму надходять на ключі автономного інвертора напруги АІН перетворювача частоти ПЧ.

Функціональна схема регулювання положення СДПМ з частотно-струмовим векторним керуванням представлена на рисунку 4.5.

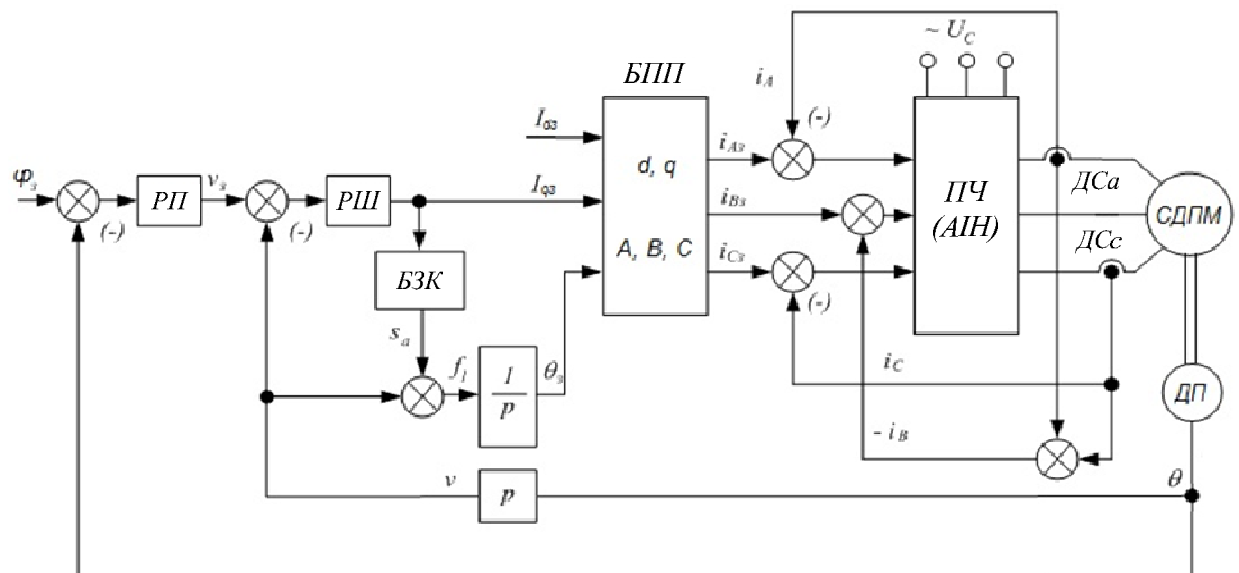


Рисунок 4.5 – Функціональна схема керування положенням СДПМ із частотно-струмовим векторним керуванням з непрямою орієнтацією по полю та регуляторами струмів, реалізованими в нерухомій системі координат

Різниця між сигналом завдання положення ротора  $\varphi$  та сигналом з датчика положення  $\Theta$  подається на регулятор положення (РП), який формує сигнал завдання швидкості для регулятора швидкості (РШ). Сигнал з РШ задає струм  $I_q$ , а також надходить на блок завдання ковзання (БЗК), який додає певну корекцію до частоти обертання ротора під час перехідних процесів, щоб синхронний двигун міг увійти в синхронізм. Після виконання прямого перетворення координат у блоці БПП, різниця між заданими струмами та струмами, знятих з фаз статора, формує керуючі сигнали для ключів автономного інвертора напруги (АІН). Теоретично обґрунтовану придатність цієї схеми для керування СДПМ перевірено в розділі 10 шляхом моделювання у середовищі Matlab Simulink.

Для реалізації закладених у систему керування функцій та з урахуванням особливостей сучасних високопродуктивних мікропроцесорних засобів, у якості основного елемента системи керування електроприводом промислового робота обирається мікроконтролер Texas Instruments TMS320F28. Цей пристрій буде виконувати роль векторного керування електроприводом.

Структурна схема сигнального процесора типу TMS320F2812, побудованого на платформі C2000 приведена на рисунку 4.6.

Контролер TMS320F28 має ряд переваг у порівнянні з більш дорогими аналогами:

- висока продуктивність із тактовою частотою від 60 до 100 МГц;
- достатній обсяг оперативної та флеш-пам'яті — від 68 до 512 КБ;
- підтримка операцій із плаваючою комою;
- широкі можливості підключення периферійних пристроїв;
- наявність спеціалізованих апаратних засобів для керування приводом;
- при цьому низька вартість.

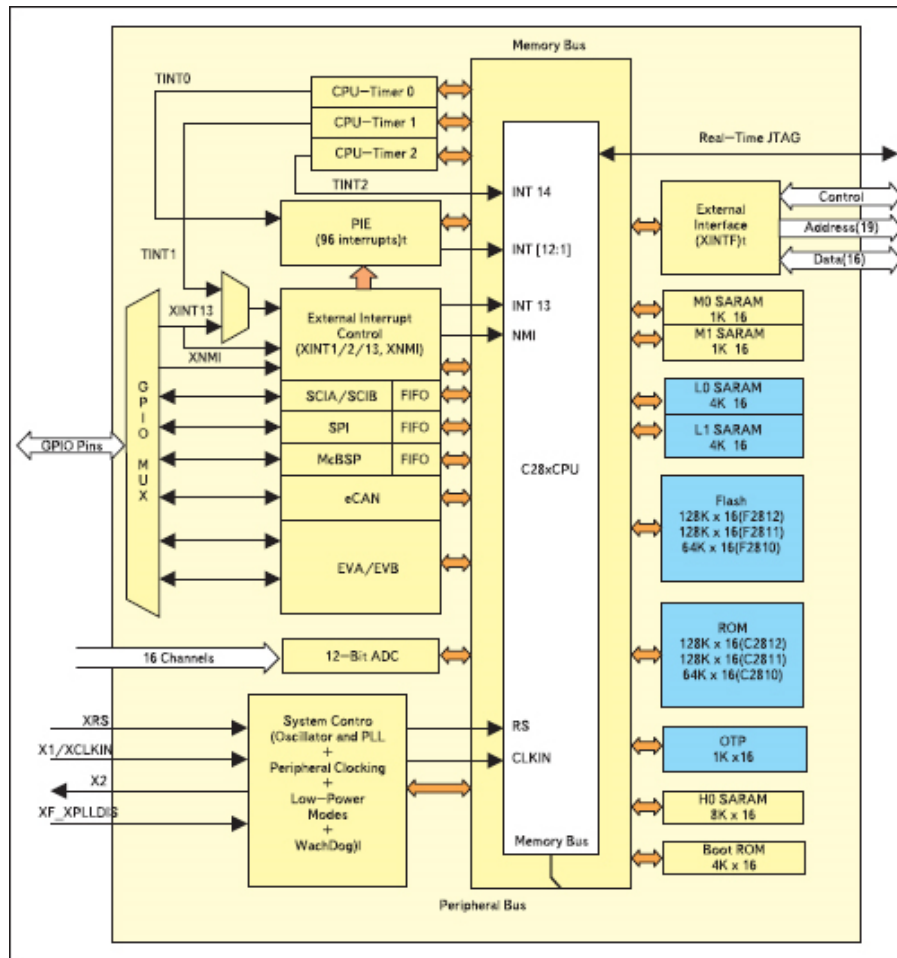


Рисунок 4.6 – Структурна схема сигнального процесора типу TMS320F2812

Характерні особливості цієї серії процесорів:

- наявність ШІМ-модулів;
- підтримка як векторного, так і скалярного керування асинхронним двигуном;
- можливість обробки сигналів від датчиків швидкості та моменту;
- здатність виконувати координатні перетворення змінних;
- для цього сімейства контролерів розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для роботи з перетворювачами частоти асинхронних двигунів.

Функціональна схема керування електроприводом одного ступеня рухомості А6 промислового робота, побудованої на базі мікроконтролера фірми Texas Instrument типу TMS320F28 приведена на рисунку 4.7.

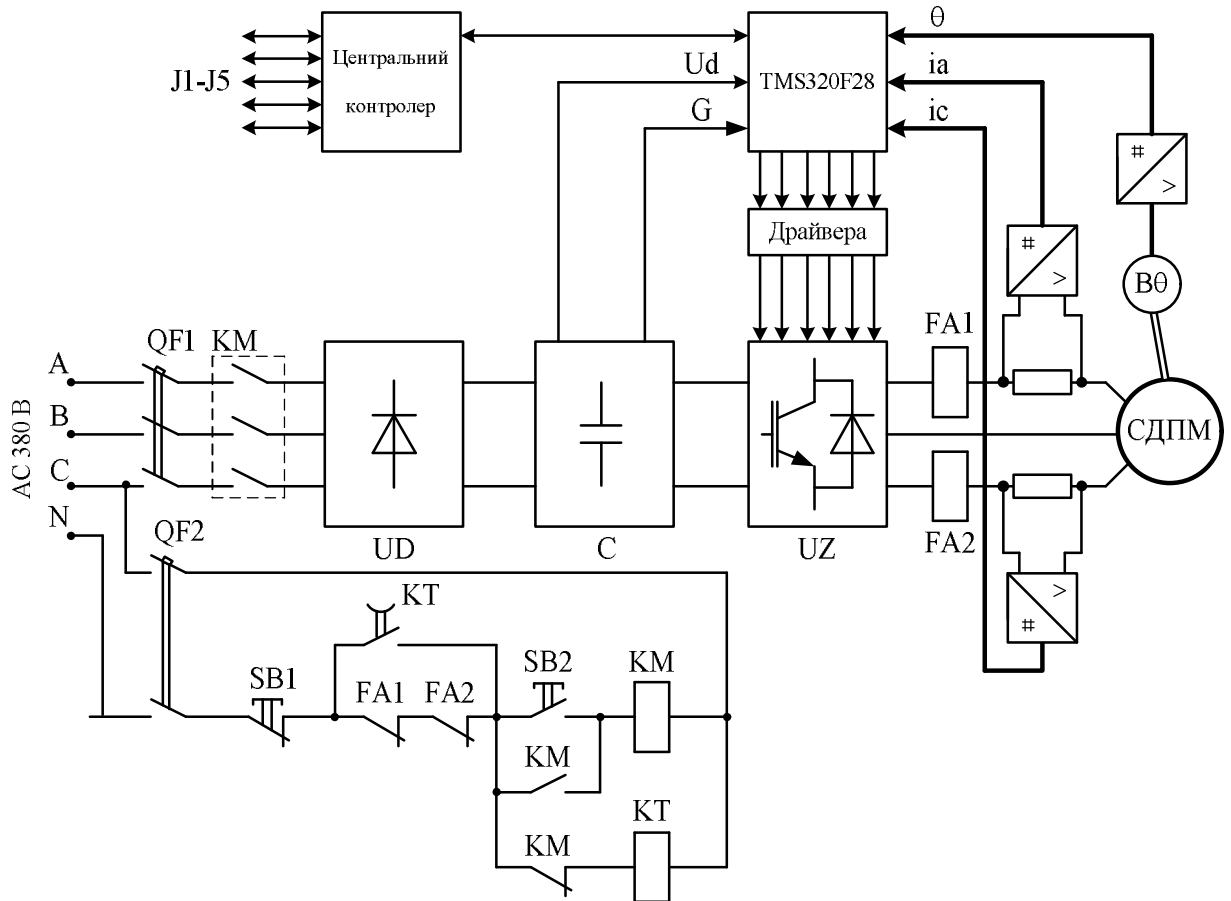


Рисунок 4.7 – Функціональна схема керування електроприводом ступеня рухомості ПР

Функціональна схема системи керування одним ступенем рухомості А6 промислового робота, крім раніше згаданих функціональних блоків, включає також сенсори струму та положення, центральний процесор для централізованого управління технологічним процесом шляхом керування кількома ідентичними роботами, струмові реле та апарати релейно-контакторної схеми, що відповідають за комутацію силових кіл електроприводу. Важливим компонентом системи керування є драйвери, які виконують роль інтерфейсних модулів між контролером TMS320F28 і частотним перетворювачем.

#### 4.6 Розробка схеми електричної принципової саеп промислового робота

Схема електрична принципова електропривода механічної руки ПР приведена на рисунку 4.8.

Управління двигунами осей реалізовано в пам'яті відповідних мікроконтролерів (MCU). Для цього обрано сімейство сигнальних процесорів Texas Instruments TMS320F28xx. Блоки вторинного живлення керуючих кіл (БВЖ КУ) забезпечують необхідні напруги для живлення мікроконтролерів, енкодерів, драйверів та інтерфейсів зв'язку. Світлодіоди VL сигналізують про наявність напруги в силовому колі.

Транзистор VT7 і діод VD7 відповідають за відведення енергії при гальмуванні на внутрішній резистор скидання Rсб або на зовнішній резистор Rвн, який підключається до клем Р і С (при цьому внутрішній резистор відключається розмиканням клем С і D).

Сигнали завдання центру мас, статичного моменту, швидкості та положення кожної осі передаються до контролерів через порти зв'язку CN1 з пульта управління. Контролер пульта розв'язує зворотну задачу кінематики і формує відповідні сигнали завдання, імітуючи роботу двигунів, розташованих безпосередньо на осях механічної руки.

Між контролерами керування осями руки встановлено зв'язок через порти CN2, що дозволяє враховувати кінематичну взаємодію механічної руки. Обробка сигналів енкодера здійснюється за допомогою спеціального блоку внутрішньої периферії мікроконтролера eQEP. На входи QEPA і QEPB подаються імпульсні сигнали: їхня частота дає інформацію про швидкість обертання, кількість імпульсів – про кут повороту, а фазовий зсув між сигналами визначає напрямок обертання. Сигнал QEPI, який називають індекс-маркером, слугує точкою відліку кута обертання і подається один раз за повний оберт диску енкодера. Пін QEPS є строб-сигналом, який можна запрограмувати як вхідний або вихідний.

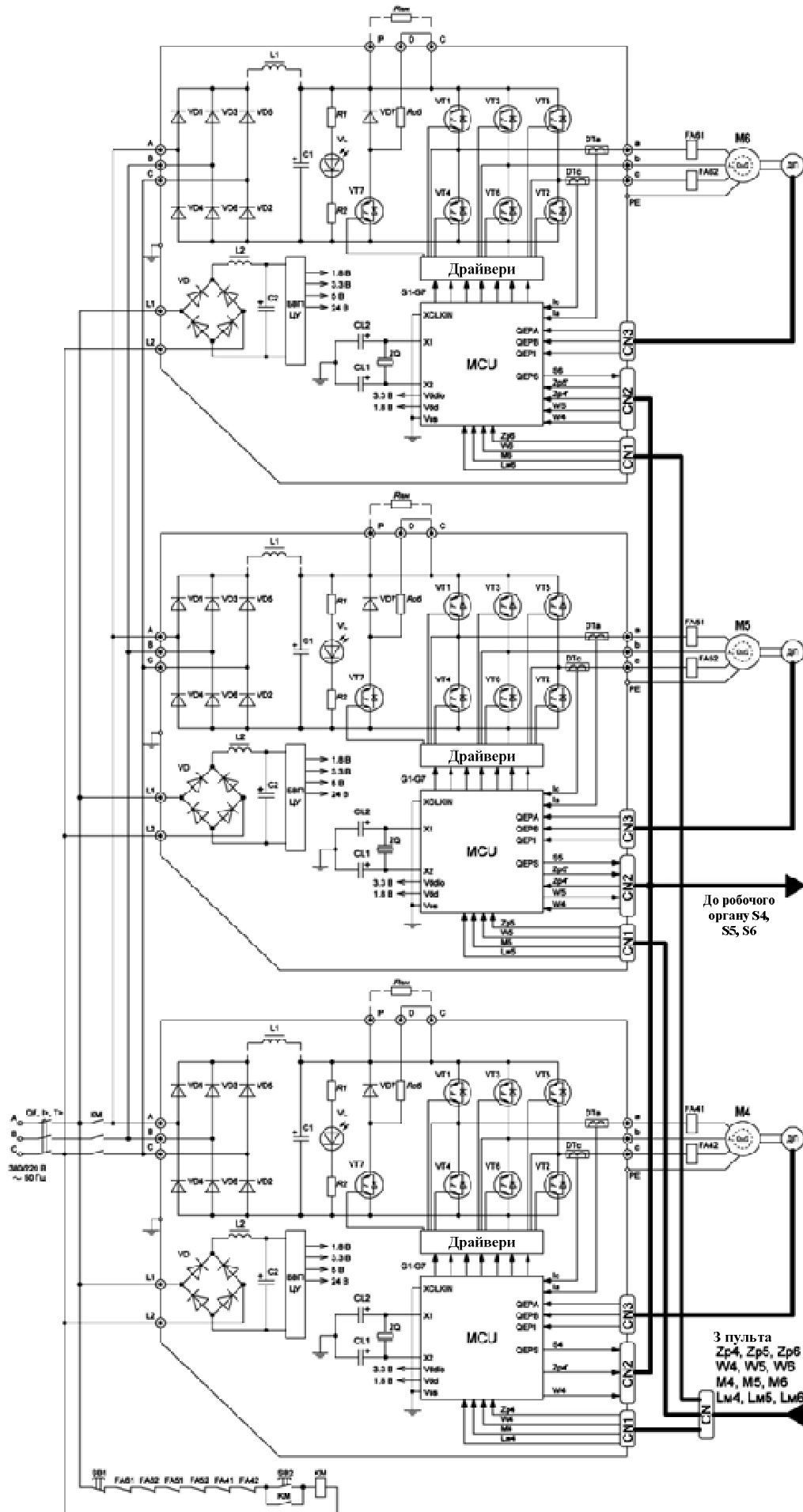


Рисунок 4.8 – Схема електрична принципова степенів рухомості промислового робота

У першому випадку цей пін використовується як сигнал про досягнення заданої позиції, а в другому — через нього можна передати інформацію про певну подію. У представленій схемі пін налаштований як вихід і передає сигнал про досягнення конкретного положення до системи керування робочим органом через порт зв'язку CN2. Після отримання сигналу QEPS від кожної осі робота, робочий орган починає працювати (наприклад, захват захоплює об'єкт, на електроди зварювання подається напруга, пульверизатор розпорошує фарбу тощо). При повторному надходженні строб-сигналу QEPS від кожної осі робочий орган вимикається. Налаштування строба дозволяє формувати фронт імпульсу при досягненні позиції увімкнення робочого органу, а зріз — при досягненні позиції вимкнення.

Максимальний струмовий захист реалізовано так, що при спрацьовуванні реле струму (яке має встановлену витримку часу) в колі статора будь-якого двигуна живлення силової частини приводу механічної руки автоматично вимикається. При цьому кола управління та енкодери продовжують отримувати живлення. Позапланова зупинка двигунів фіксується периферією eQEP контролерів, а робочий орган вимикається повторним сигналом QEPS. Якщо робочий орган не був увімкнений, сигнал QEPS не формує строб. Позиція, на якій сталася позапланова зупинка, зберігається в пам'яті контролера.

Після усунення причини спрацьовування реле струму, якщо осі встановлені в початкове положення, то залежно від технологічного процесу цикл або поновлюється, або робочий орган включається при досягненні збереженої позиції за допомогою сигналів QEPS від усіх осей. Якщо осі зберегли своє положення після зупинки, то, знову ж таки, залежно від технології, вони або повертаються у початкове положення з подальшим запуском циклу, або цикл триває без змін.

Переваги сімейства контролерів TMS320F28xx для розв'язання задач управління:

- висока продуктивність (при частоті 100 МГц час циклу становить близько 10 нс);
- достатній обсяг оперативної та флеш-пам'яті (128 КБ з 16-бітною шиною);
- широкі можливості підключення периферійних пристроїв;
- наявність спеціалізованих апаратних засобів для керування приводом, включаючи обробку сигналів інкрементального енкодера;
- підтримка виконання координатних перетворень змінних;
- до 35 програмованих входів/виходів;
- вбудовані таблиці стандартних математичних функцій.

**Висновок:**

Представлено принципову електричну схему керування електроприводом механічної руки промислового робота. Також обґрунтовано вибір мікроконтролера з сімейства TMS320F28xx.

## 5 РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

### 5.1 Аналіз САЕП без врахування кінематичної взаємодії ланок механічної руки

Для аналізу динамічних характеристик досліджуваного електроприводу використаємо можливості ППП Matlab Simulink.

Модель системи управління двигуном ASMT04250LBK осі A4 у Matlab Simulink наведена на рисунку 5.1.

На схемі, представлений на рисунку 5.1, позначення на моделі включають: ZP4 — задавач траєкторії, P4 — зміщення траєкторії завдання, RP4 — пропорційний регулятор положення, RS4 — пропорційний регулятор струму, PKP — блок прямого перетворення координат, RT4 — релейний регулятор струму, VId — блок обчислення завдання струму Id, MR4 — момент навантаження, UD4 — випрямляч та UZ4 — інвертор.

Блок PKP, приведений на рисунку 5.2, виконує пряме перетворення координат, тобто перехід від системи координат, що обертається з частотою  $f_1$ , до нерухомої системи за співвідношенням:

$$\begin{cases} i_{\alpha} = I_x \cos \theta - I_y \sin \theta; & i_{\beta} = I_x \sin \theta + I_y \cos \theta; \\ i_A = i_{\alpha}; & i_B = -\frac{1}{2}i_{\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{\beta}; & i_C = -\frac{1}{2}i_{\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{\beta}. \end{cases}, \quad (5.1)$$



Рисунок 5.1 – Модель системи управління двигуном ASMT04250LBK в ППП Matlab Simulink

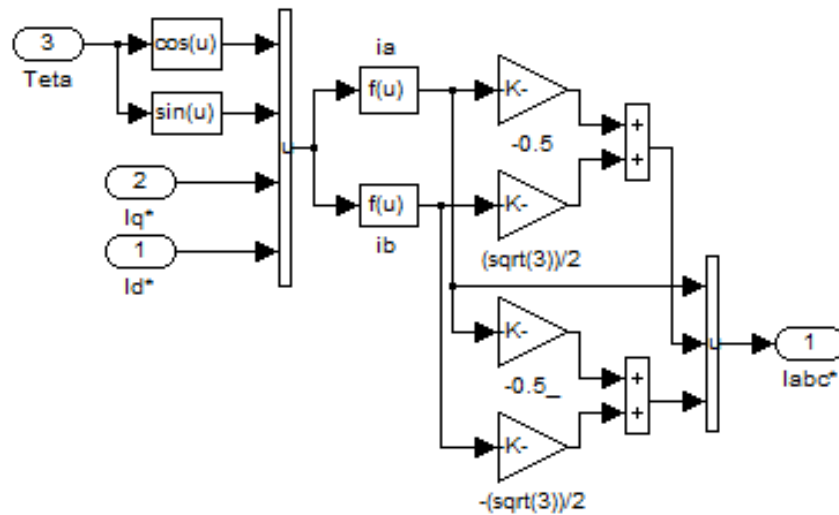


Рисунок 5.2 – Блок прямого перетворення координат РКР

Структура релейного регулятора струму RT4 ППП Matlab Simulink приведена на рисунку 5.3.

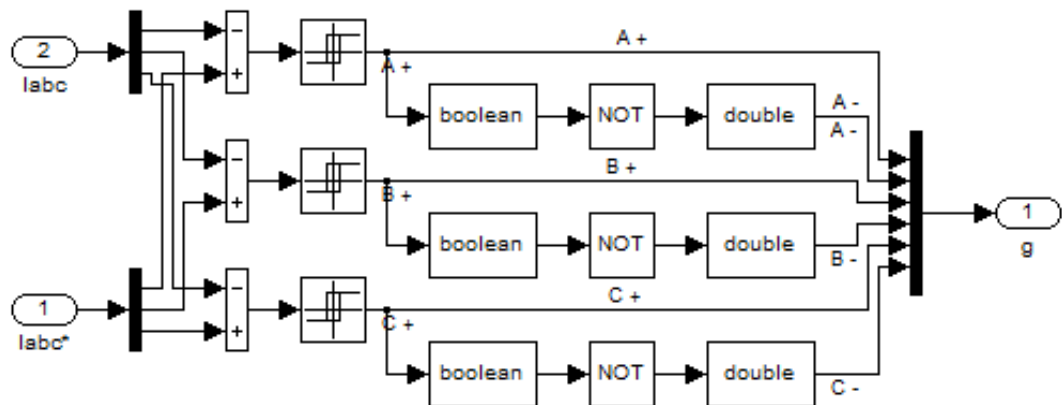


Рисунок 5.3 – Релейний регулятор струму RT4

Налаштування регулятора швидкості RS4:

$$K_{RS4} = \frac{2 \cdot J_{\Sigma} \cdot k_{от}}{3 \cdot p_{п} \cdot \left(\frac{L_q}{L_d}\right) \cdot k_{ос} \cdot a_w \cdot a_i \cdot T_{п}} = \frac{2 \cdot 0.379 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{3 \cdot 1 \cdot \left(\frac{0.011}{0.011}\right) \cdot 1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 0.63$$

Налаштування регулятора положення RP4 та блоку завдання ковзання BZS була виконана ітеративно, тобто шляхом підбору оптимальних значень:

$$K_{RP4} = 1950; K_{BZS} = 100., \quad (9.2)$$

Блок VId розраховує струм Id, необхідний для забезпечення динамічних характеристик приводу. Обчислення струму завдання базується на пропорційній залежності між моментами та струмами в динаміці синхронної двигуна з постійними магнітами (СДПМ). Структура блоку та його параметри наведені на рисунку 5.4. Спершу за сигналом швидкості визначається прискорення, після чого обчислюється динамічний момент. Сума статичного і динамічного моментів ділиться на величину статичного моменту. Отримана кратність моментів множиться на номінальний струм, що дає величину заданого струму.

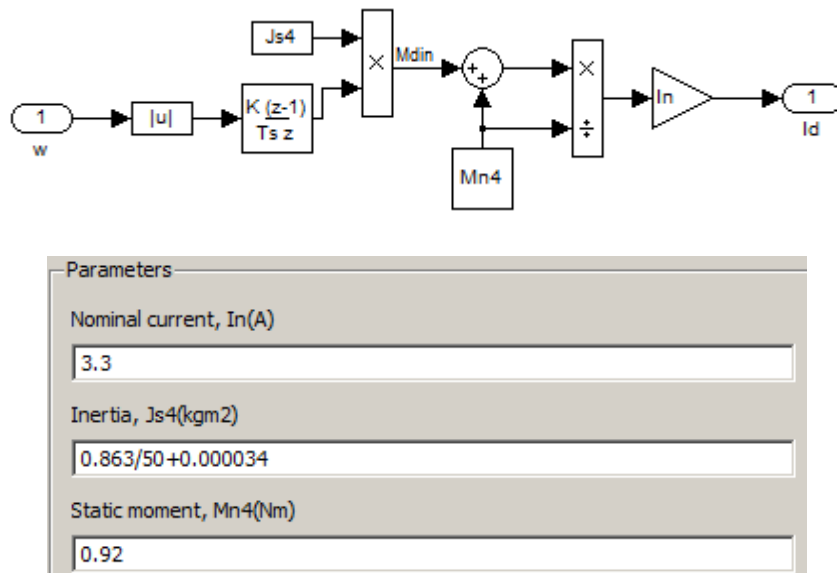


Рисунок 5.4 – Блок обчислення завдання струму VId та його параметри

Помилка стеження системи приведена на рисунку 5.5.

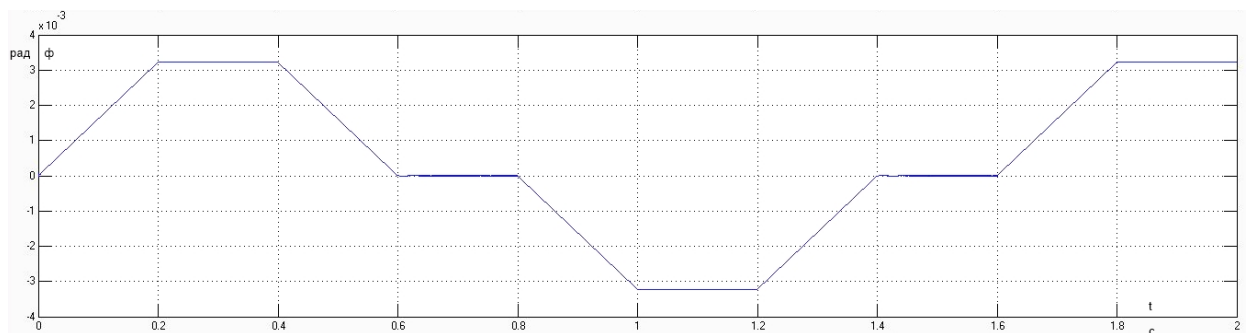


Рисунок 5.5. Вихідна помилка стеження системи

З рисунку 5.5 можна зробити висновок про те, що вихідна максимальна помилка стеження дорівнює  $3,25 \cdot 10^{-3}$  рад =  $0.186^\circ$  11'10"  $\Rightarrow$  18", тобто не задовольняє вимогу точності стеження приводу, незважаючи на все ще високу точність позиціонування (близько десятитисячних градуса).

Для підвищення точності стеження до сигналу завдання положення додається зміщення  $+\Delta\varphi$ . Це зміщення компенсує помилку неузгодженості в регуляторі положення і необхідне для формування сигналу завдання регулятора швидкості. Величина зміщення дорівнює вихідній помилці стеження  $\Delta\varphi$ . Ця помилка динамічно повторює форму швидкості (див. рисунок 5.5) і в кожен момент часу визначається як відношення миттєвої кутової швидкості осі до коефіцієнта регулятора положення.

$$\Delta\varphi = \frac{\omega_{A4}}{K_{RP}}$$

Додане зміщення  $+\Delta\varphi$  повторює форму вихідної помилки, окрім моменту часу  $t = 0$ , коли зміщення відсутнє. Це необхідно для забезпечення потрібної динаміки роботи двигуна. Налаштування блоку зсуву наведені на рисунку 5.6. На практиці зміщення розраховується паралельно із завданням траєкторії руху.

З наведеного вище співвідношення між миттєвою кутовою швидкістю осі та коефіцієнтом регулятора положення можна визначити максимальну глибину регулювання швидкості осі промислового робота, при якій доцільно застосовувати зміщення.

$$\omega_{A4\min} = K_{RP}\Delta\varphi_{\lim} = 1950 \cdot 8.72 \cdot 10^{-5} = 0.17 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \rightarrow \frac{6.283}{0.17} = 36.96,$$

Таким чином, при глибині регулювання 37:1 необхідна точність стеження досягається без зміщення, що продемонстровано на рисунках нижче при швидкості в 50 разів менше номінальної швидкості осі A6.

Результати моделювання в діапазоні швидкостей 50:1 приведені на рисунках 5.6 та 5.7 відповідно.

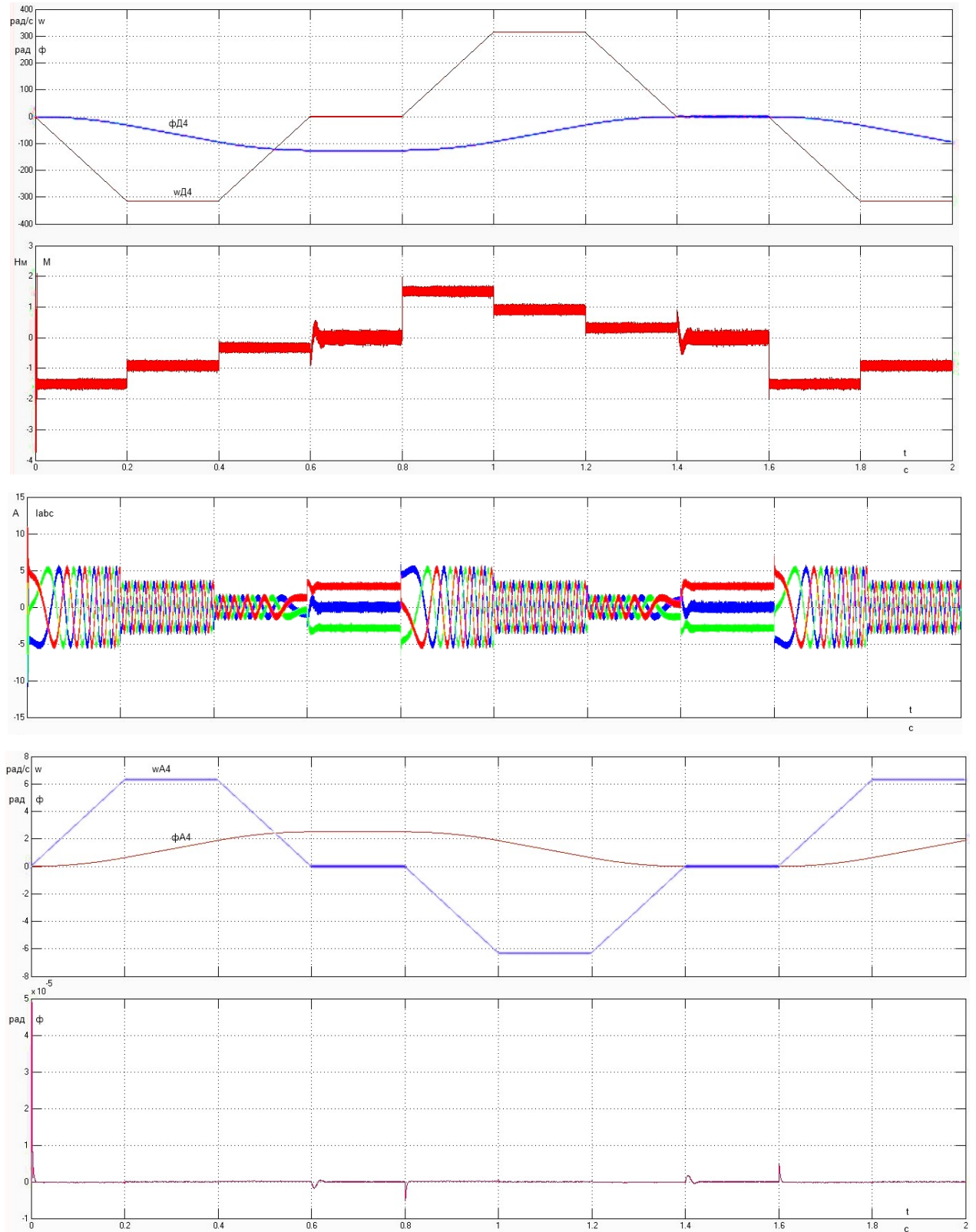


Рисунок 5.6 – Результати моделювання системи управління

На рисунку 5.6, зверху та знизу, представлені такі графіки: швидкість і кутове переміщення вала двигуна, момент на валу двигуна, струми в статорі, кутове переміщення та швидкість осі, а також помилка стеження осі.

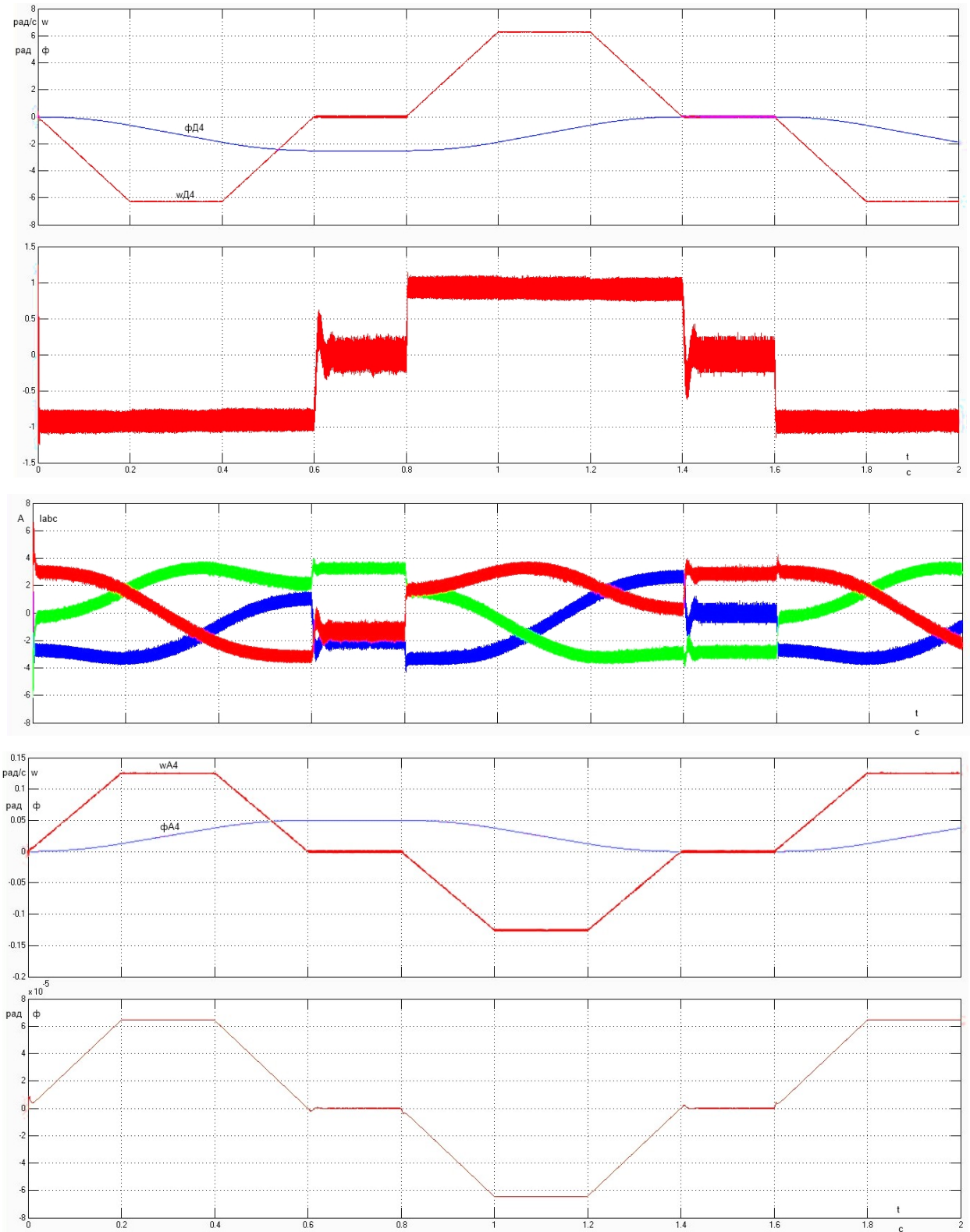


Рисунок 5.7 – Результати моделювання системи управління

На рисунку 5.7 (зверху та знизу) наведені графіки швидкості і кутового переміщення вала двигуна, моменту на валу, струмів у статорі, кутового переміщення і швидкості осі, а також помилки стеження осі.

Отримані результати збігаються з розрахунковими даними, що підтверджує придатність запропонованої схеми керування для синхронних двигунів із збудженням від постійних магнітів на роторі.

Максимальна помилка стеження осі A4 зі зміщенням завдання спостерігається при розгоні двигуна до номінальної швидкості і складає  $4,8 \cdot 10^{-5}$  рад ( $0,0028^\circ$  або приблизно  $9,9''$ ), що є меншим за допустимі  $18''$  і відповідає вимогам точності приводу. Точність позиціонування становить не менше  $0,2 \cdot 10^{-5}$  рад ( $0,0000115^\circ$  або  $0,4''$ ), що також є нижчим за нормативні  $18''$ .

Якщо технологічний процес не вимагає стеження під час пуску двигуна (наприклад, у випадку зварювання, де потрібна постійна швидкість), то помилка стеження не перевищує  $0,5 \cdot 10^{-5}$  рад ( $0,000286^\circ$ , або приблизно  $1''$ ), що також відповідає вимогам.

Налаштування приводів осей A5 і A6 виконано аналогічно налаштуванню осі A4, оскільки для них теоретично використовується той самий тип двигуна. Варто зазначити, що вимоги до електроприводів для цих осей також повністю виконуються.

## **5.2 Аналіз САЕП із врахуванням кінематичної взаємодії ланок механічної руки**

Модель системи управління двигуном ASMT04250LBK в ППП Matlab Simulink приведена на рисунку 5.8.

Суматори S5 та S6 забезпечують взаємодію між каналами завдання положення для осей A5 і A6. Для коректного зняття характеристик переміщення цих осей також необхідно враховувати їхній взаємовплив, який реалізується через суматори в відповідних каналах. При цьому враховується

редукція передавальних механізмів осей промислової руки. У блоках обчислення струмів  $I_d$  —  $VId5$  і  $VId6$  — взаємодія враховується через канали швидкості.

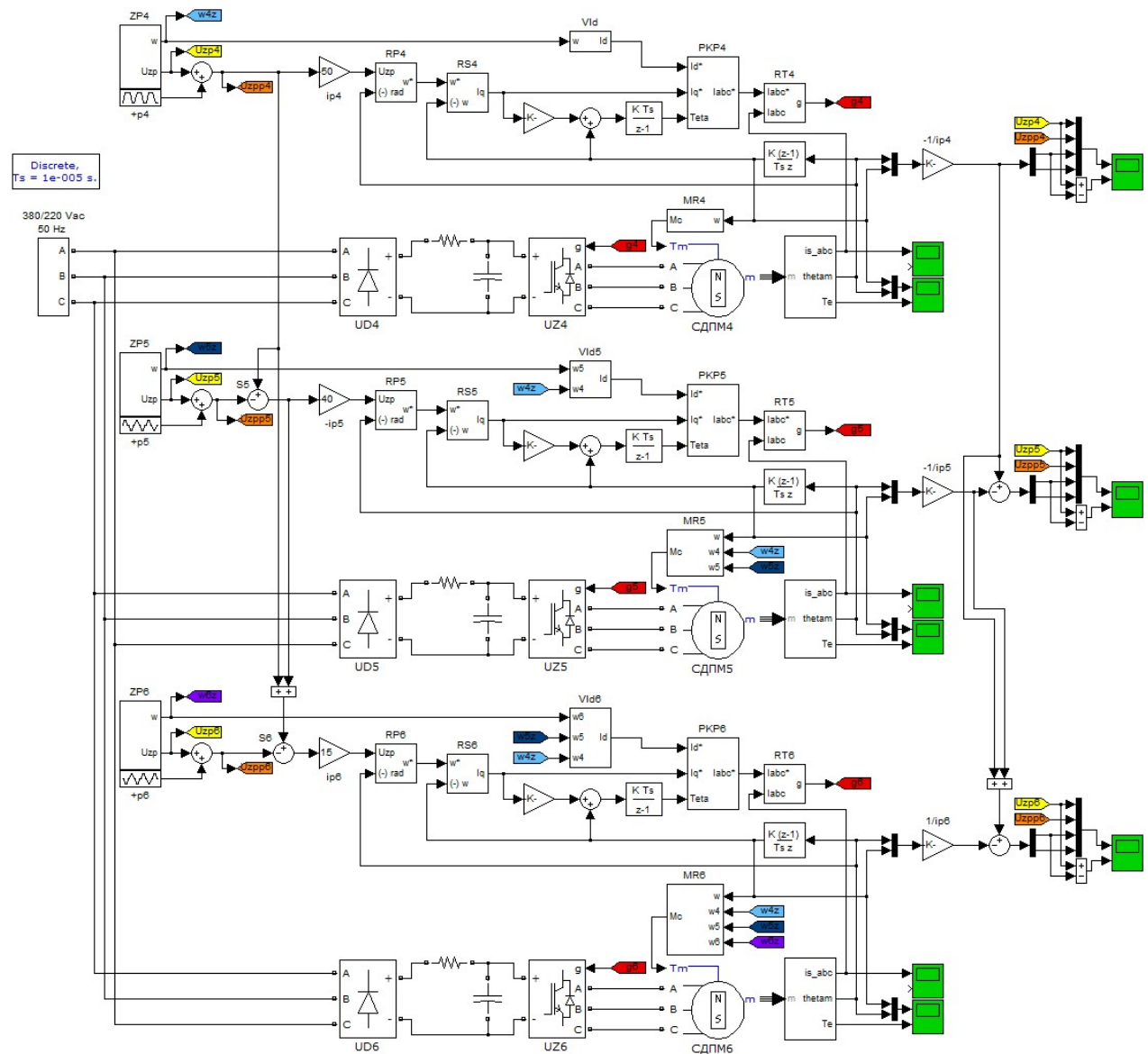


Рисунок 5.8 – Модель системи керування ЕП механічної руки ПР

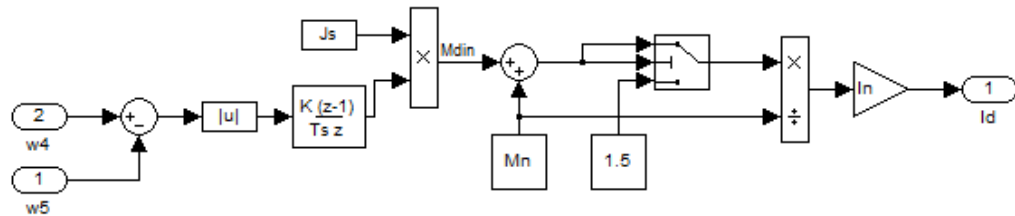
## Налаштування регуляторів:

$$K_{RS4} = 0.63; K_{RS5} = 1.1; K_{RS5} = 1.16;$$

$$K_{RP4} = K_{RP5} = K_{RP6} = 1950; K_{BZS} = 100$$

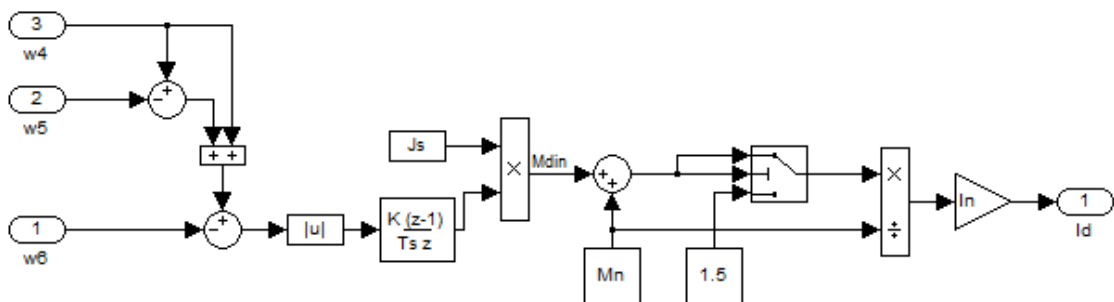
Результати моделювання представлені на рисунках 9.9-9.11.

Відзначимо, що зміна центру мас, а отже, і зміна моментів не враховується і прийнята максимально можливою.



| Parameters                |                     |
|---------------------------|---------------------|
| Nominal current, $I_n(A)$ | 3.3                 |
| Inertia, $J_s(kgm^2)$     | $0.996/40+0.000034$ |
| Static moment, $M_n(Nm)$  | 1                   |

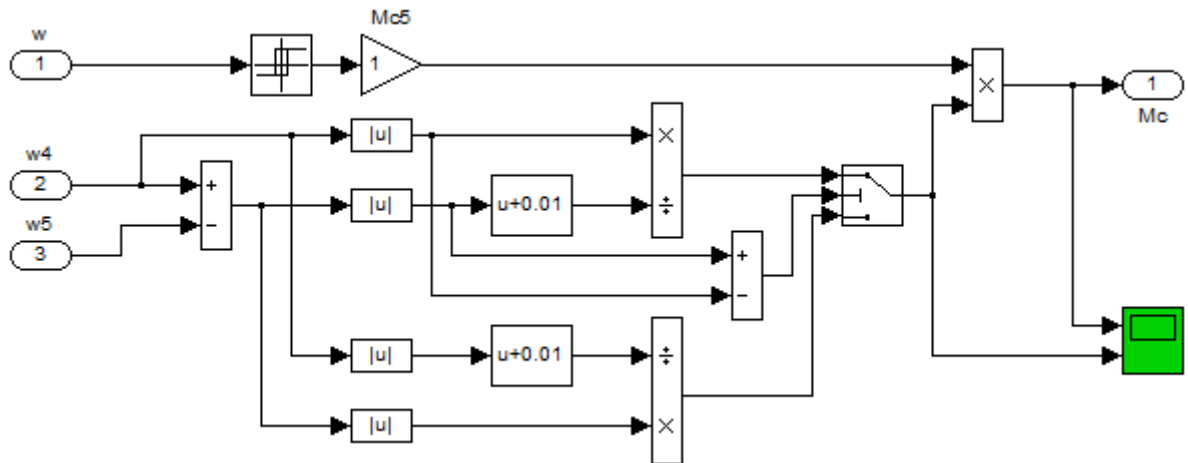
Рисунок 5.9 – Блок обчислення завдання струму  $V_{Id5}$  вісі A5 та його параметри



| Parameters                |                    |
|---------------------------|--------------------|
| Nominal current, $I_n(A)$ | 3.3                |
| Inertia, $J_s(kgm^2)$     | $0.15/15+0.000034$ |
| Static moment, $M_n(Nm)$  | 0.96               |

Рисунок 5.11 – Блок обчислення завдання струму  $V_{Id6}$  вісі A6 та його параметри

При кінематичній взаємодії змінюються не лише швидкість, а й момент, при цьому через планетарні варіатори коефіцієнт редукції передавальних механізмів є змінним і не залишається сталим. Блоки навантаження MR5 та MR6, що враховують цей вплив, показані на рисунках 5.12–5.15.



5.12 – Блок обчислення навантаження MR5 із  
врахуванням кінематичного впливу

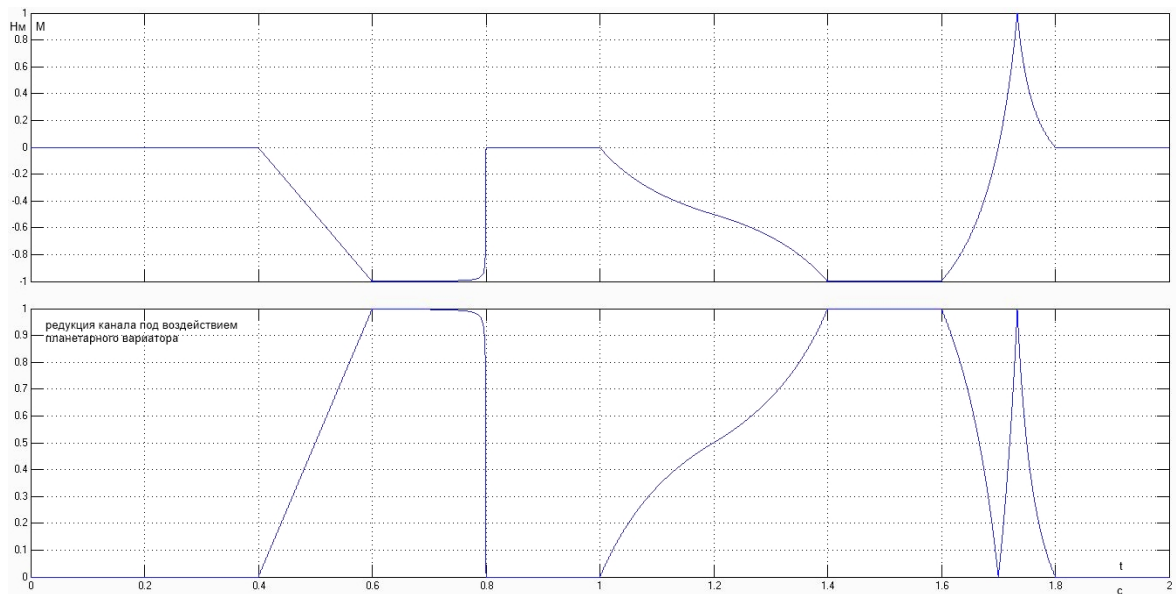


Рисунок 5.13 – Графіки моменту навантаження та редукція передаточних механізмів осі A5 під дією планетарного варіатора

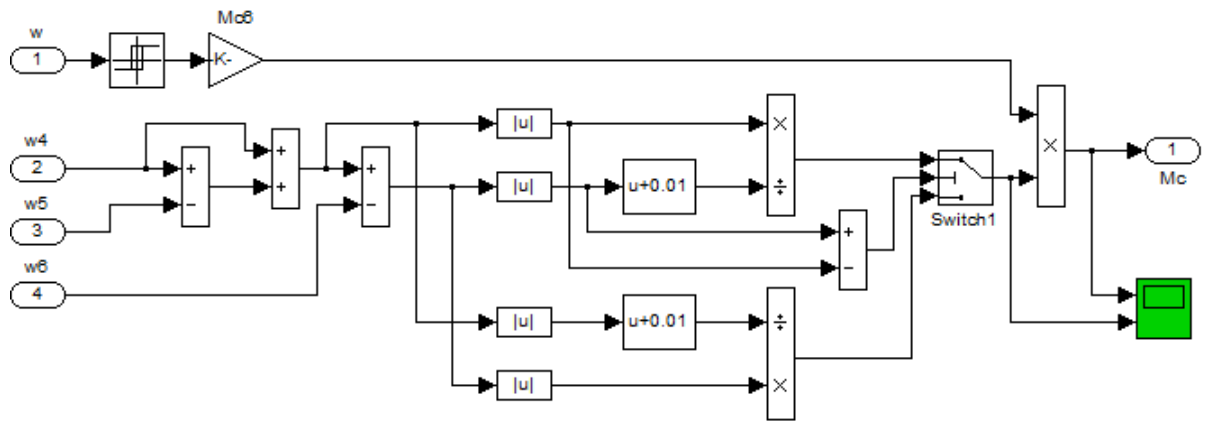


Рисунок 5.14 – Блок обчислення навантаження MR6 із  
врахуванням кінематичного впливу

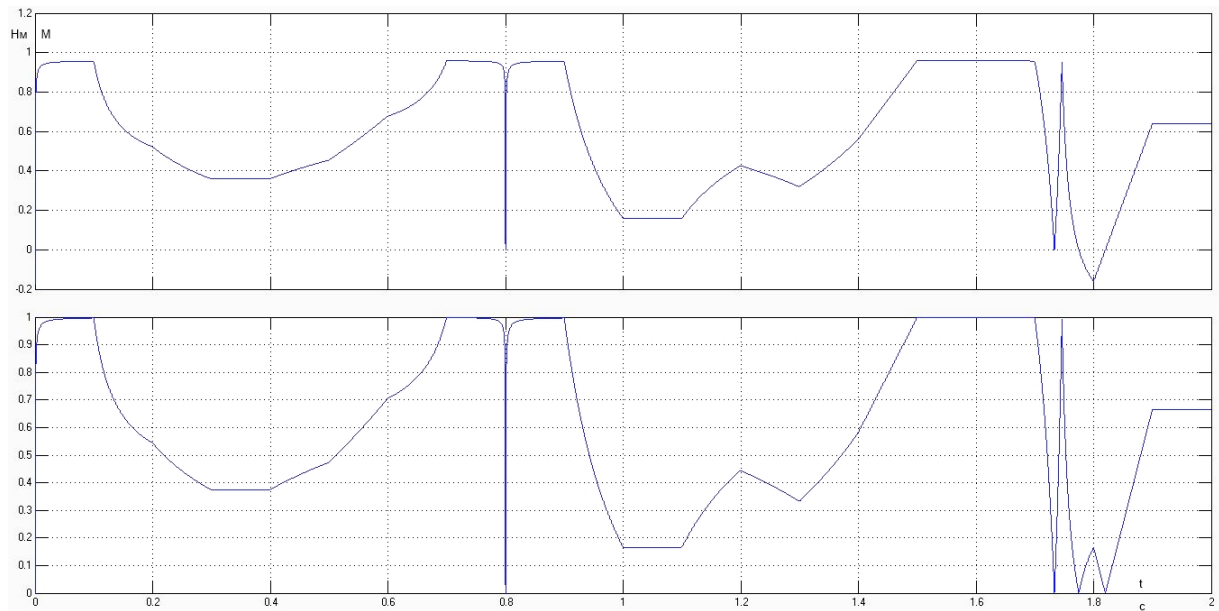


Рисунок 5.15 – Графіки моменту навантаження та  
редукція передаточних механізмів

Результати моделювання моделі на рисунку 5.8 приведені на рисунках 5.16-5.18.

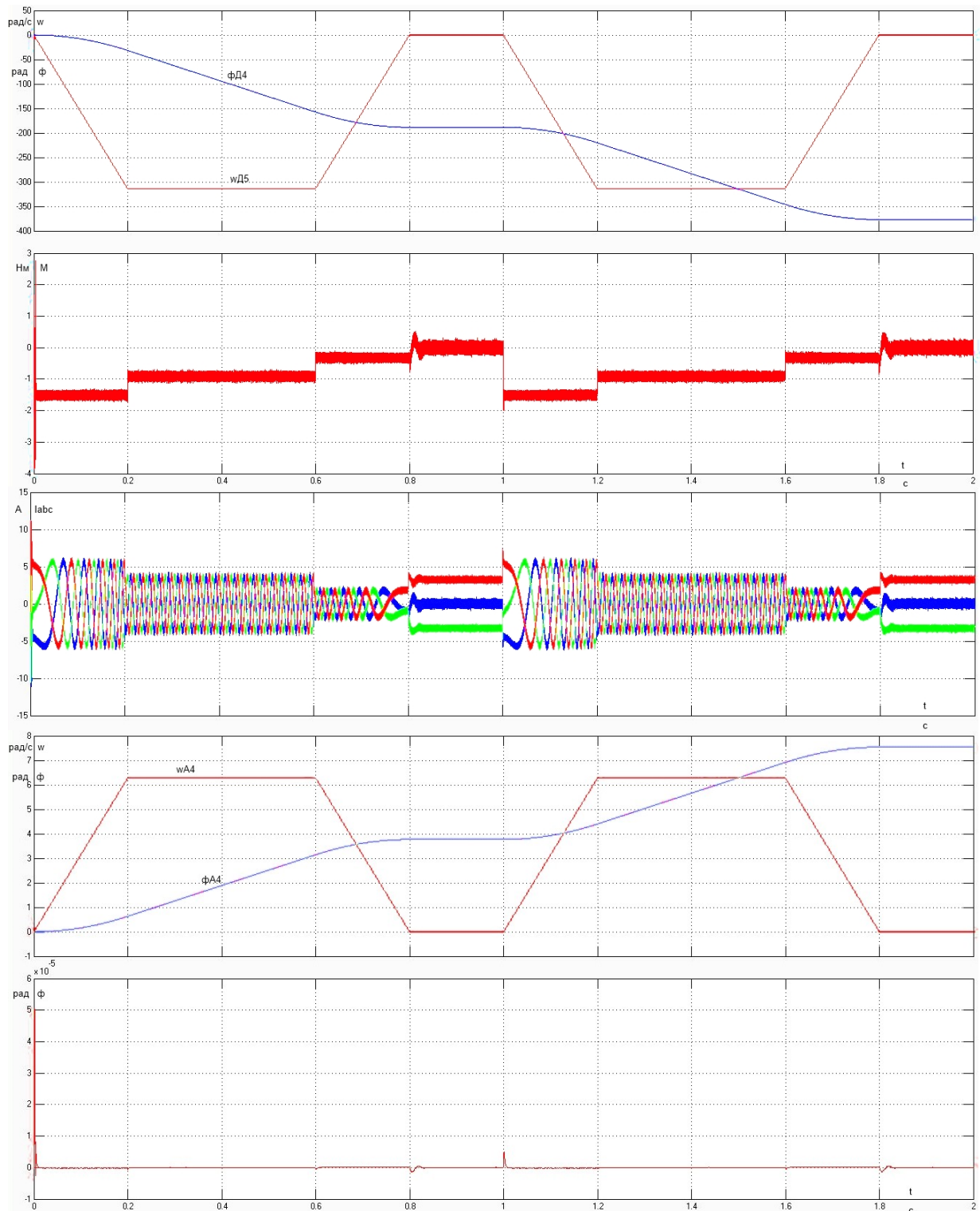


Рисунок 5.16 – Результати моделювання системи управління вісі A4

На рисунку 5.16 (у верхній та нижній частинах) представлені такі параметри: швидкість і кутове переміщення вала двигуна, момент на валу, струми в статорі, кутове переміщення та швидкість осі, а також помилка стеження осі.

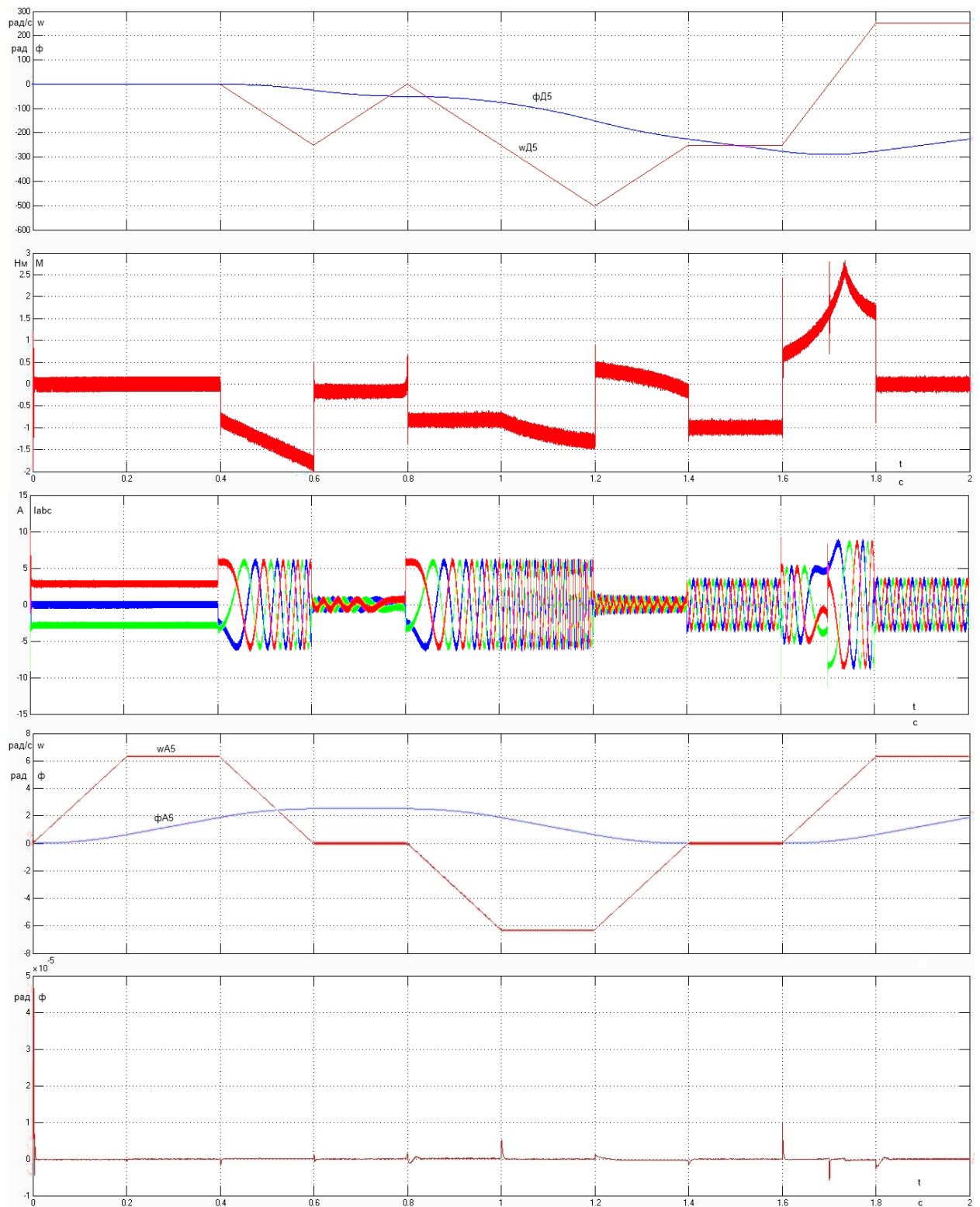


Рисунок 5.17 – Результати моделювання системи управління вісі A5

На рисунку 5.17 (у верхній та нижній частинах) показані такі параметри: швидкість і кутове переміщення вала двигуна, момент на валу двигуна, струми в статорі, кутове переміщення і швидкість осі, а також помилка стеження осі.

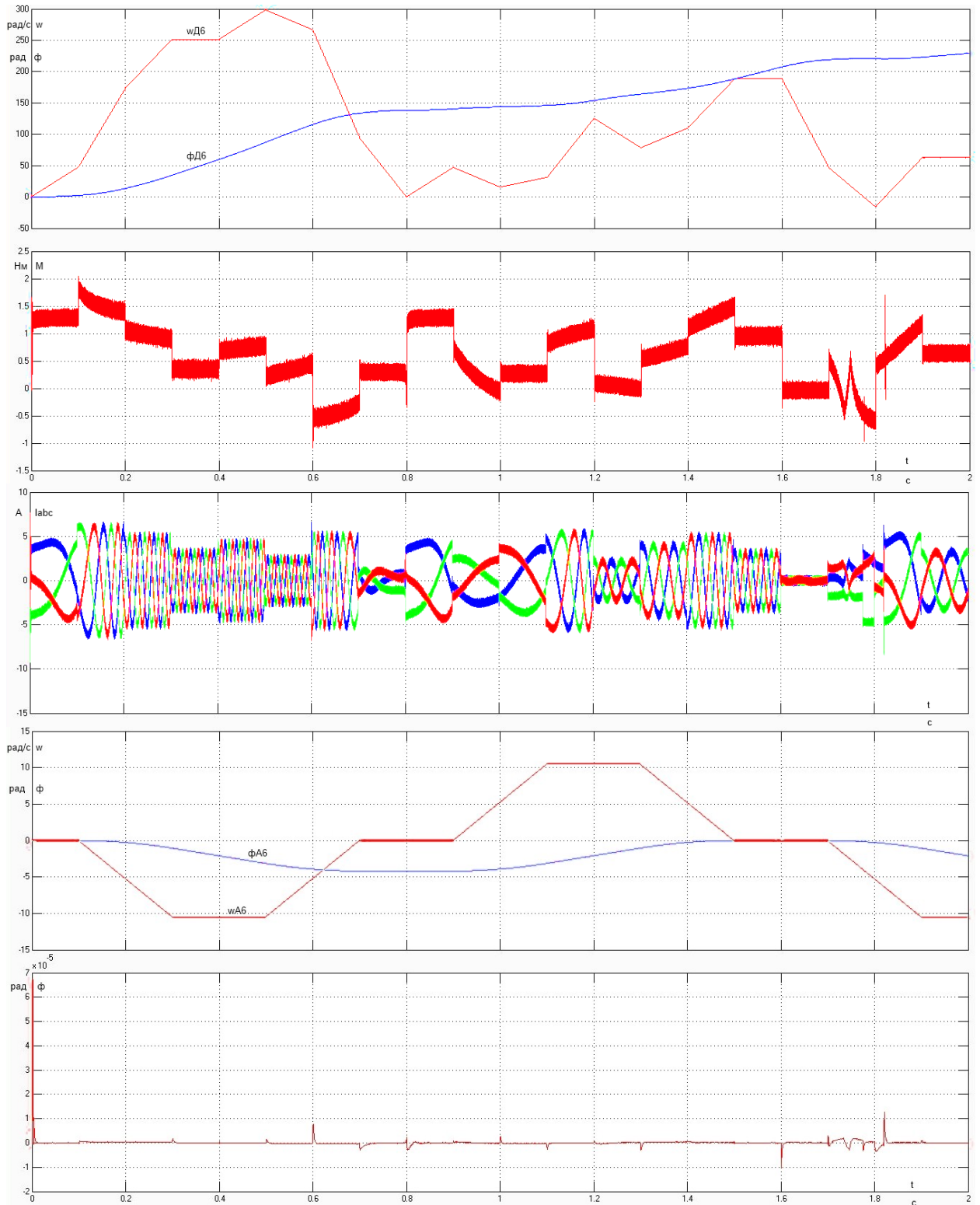


Рисунок 5.18 – Результати моделювання системи управління вісі A6

**Висновок:** Точність переміщення осей механічної руки відповідає вимогам до точності електроприводу, оскільки максимальна помилка положення кожної осі не перевищує 18 кутових секунд. Запропонована схема керування визнана придатною для управління синхронними двигунами з постійними магнітами (СДПМ).

## **6 ОХОРОНА ПРАЦІ**

### **6.1 Загальні положення**

Підприємство, на якому використовується промисловий робот, має у своєму складі велику кількість обладнання з різними виробничими потужностями, умовами експлуатації, та характером середовища, в якому встановлене дане обладнання. На оператора, який здійснює нагляд за роботою роботів та станків-напіваавтоматів, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

а) фізичні:

- підвищена та знижена температура повітря робочої зони;
- підвищена вологість повітря у робочій зоні;
- підвищена запиленість повітря робочої зони;
- недостатність природного освітлення;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може відбутись через тіло людини;
- підвищений рівень вібрації,

в) психофізіологічні:

- фізичні перевантаження (статичні)
- нервово-психічні перевантаження (монотонність праці, перенапруга аналізаторів).

### **6.2 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта**

#### **6.2.1 Технічні рішення з безпечної організації робочого місця**

Система електропривода степенів рухомості промислового робота потребує постійного контролю працездатності з боку оперативно-ремонтного персоналу. Оперативно-ремонтний персонал, який здійснює обслуговування електропривода на підприємстві, повинен дотримуватись наступних основних правил безпеки:

1. Необхідно візуально обстежити установку у відповідності з інструкцією по експлуатації і переконатися в її повній справності;
2. Забороняється експлуатація установок з несправним керуванням, гальмами і звуко/світловими сигналами. Якщо немає можливості усунення пошкодження на місці своїми силами, необхідно залучити до робіт фахівців спеціалізованої організації.
3. Забороняється керування установкою вологими або замасленими руками;
4. Забороняється збільшувати вантажопідйомність установки;
5. Рух установки повинен здійснюватись на безпечній швидкості;
6. Роботи по монтажу і модернізації системи керування проводяться за допомогою справного інструменту.

Для забезпечення безпечного ведення робіт обслуговуючий персонал зобов'язаний суворо дотримуватись правил техніки безпеки при експлуатації, технічному обслуговуванні, ремонті кранів. Недотримання правил техніки безпеки може призвести до отримання травм та втрати працездатності.

Живлення привода, що розробляється здійснюється від трифазної промислової мережі напругою 380В з частотою 50Гц.

В чотирьох провідних мережах з заземленою нейтралю металеві корпуси електрообладнання з'єднують з нульовим провідником.

Обладнання повинно бути надійно заземлене. Справність і опір контуру заземлення один раз на рік перевіряється.

Всі обертові частини механізму повинні мати добре закріплену огорожу. Забороняється виконувати всі види ремонту під час роботи установки.

Для надання першої медичної допомоги при нещасних випадках повинна бути аптечка з набором необхідних перев'язочних матеріалів та медикаментів.

Під час роботи, пов'язаної з дотиком до струмопровідних частин електродвигуна, що обертаються, і механізму, який вони приводять в рух, необхідно зупинити двигун і на його пусковому пристрої або ключі керування, якщо можливе обертання електродвигунів від з'єднаних з ним механізмів, слід зачинити і замкнути на замок засуви і шибери цих механізмів, а також вивісити плакат «Не вмикати! Працюють люди».

Забороняється знімати огороження тих частин електродвигунів, що обертаються під час їх роботи.

Під час роботи електродвигунів заземлення може бути встановлене на будь-якій ділянці кабельної лінії, що з'єднують електродвигуни з РУ (збіркою). Під час роботи на механізмі, не пов'язаній з доторканням до частин, що обертаються, і у випадку роз'єднання з'єднувальної муфти, заземлювати кабельну лінію не слід.

На однотипних або близьких за габаритом електродвигунах, встановлюють поряд з тим, на якому проводять роботи, слід вивісити плакат «Стій! Напруга» незалежно від того, чи перебувають вони у роботі чи у резерві.

### **6.3 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії**

#### **6.3.1 Мікроклімат**

Мікроклімат приміщення - це сукупність фізичних параметрів повітря в виробничому приміщенні, які діють на людину в процесі праці на її робочому місці, в робочій зоні.

Параметри мікроклімату характеризуються такими показниками: температурою повітря і відносною вологістю повітря, швидкістю його переміщення, потужністю теплових випромінювань. При цьому слід розрізняти оптимальні та допустимі мікрокліматичні умови.

Допустимі мікрокліматичні умови - поєднання кількісних показників мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливові на людину можуть викликати скороминучі зміни, що швидко нормалізують тепловий стан організму, і які супроводжуються напруженням механізмів терморегуляції, не виходячи за межі фізіологічних пристосувальних можливостей. При цьому виникає пошкодження або порушення стану здоров'я, але можуть спостерігатися дискомфортні тепловідчуття, погіршення самопочуття та зниження працездатності.

Допустимі величини показників мікроклімату встановлюють тоді, коли за технологічними умовами, технічними і економічними причинами не забезпечуються оптимальні норми.

Оптимальні параметри мікроклімату в кабіні за технологічними вимогами забезпечити неможливо по технічним та економічним причинам, тому встановлюються допустимі параметри. Крім того, між людиною та навколишнім середовищем відбуваються процес безперервного теплового обміну, при цьому слід враховувати, що незалежно від температури навколишнього середовища (влітку сонце нагріває кабіну оператора крану до температури 50-60 °С, а взимку до 0 °С) температура людини залишається постійною - 36,5-37 °С. вологість в свою чергу значно впливає на терморегуляцію організму людини.

Нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони. Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт). Робота оператора лінії відноситься до легкої фізичної роботи категорія Ia, бо людина-оператор практично весь свій робочий день проводить сидячи. Параметри мікроклімату в виробничому приміщенні, де встановлена лінія, наведено в таблиці 6.1

Таблиця 6.1 – Нормування параметрів мікроклімату

| Період року | Категорія<br>робіт | Температура,<br>°С | Відносна<br>вологість | Швидкість руху |
|-------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------|
| Теплий      | Ia                 | 22-28              | 55 при 28°С           | 0,1-0,2        |
| Холодний    | Ia                 | 21-25              | 75 при 25°С           | Не більше 0,1  |

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату на робочому місці оператора лінії передбачається:

- в холодну пору року використання калорифера;
- в літню пору застосування вентиляторів обдуву;
- провітрювання приміщення.

### 6.3.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони оператора лінії

| Назва речовини      | ГДК, мг/м <sup>3</sup> |                    | Клас небезпечності |
|---------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
|                     | Максимально<br>разова  | Середньо<br>добова |                    |
| Вуглецю оксид ( CO) | 3                      | 1                  | 4                  |
| Пил нетоксичний     | 0,5                    | 0,15               | 4                  |

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено:

Провітрювання приміщення;

Цілісність вікон для перешкоджання попадання пилу в приміщення під час роботи лінії;

Встановлення пиловловлюючих засобів.

### 6.3.3 Штучне та природне виробниче освітлення

Раціональне освітлення - один з основних факторів створення сприятливих робочих умов праці. Недостатнє освітлення викликає передчасне стомлення працюючих, знижує продуктивність праці, може стати причиною нещасного випадку.

Для забезпечення найбільш сприятливих умов зорової праці нормують мінімальну освітленість на найбільш темній ділянці робочої поверхні.

При періодичному нагляді за ходом виробничого процесу освітленість повинна складати не менше 50 лк. Оскільки в приміщенні знаходяться вимірювальні прилади та система управління, то освітленість повинна

складати 300 лк. Рівень аварійного освітлення складає 15% освітленості основної роботи.

Для забезпечення найбільш сприятливих умов зорової праці нормуємо освітлення на робочому місці оператора. Приміщення відноситься до IV розряду зорової праці, тобто розряду середньої точності. Наведено норми при штучному та комбінованому освітленні в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Норми освітлення робочих поверхонь у виробничих приміщеннях.

| Характеристики зорової роботи             |             | Малої точності |
|-------------------------------------------|-------------|----------------|
| Мінімальний розмір об'єкту розпізнавання, |             | Від 1 до 5     |
| Розряд зорової роботи                     |             | V              |
| Підрозряд зорової роботи                  |             | б              |
| Контраст об'єкта розпізнавання з фоном    |             | Середній       |
| Освітленість                              | Загальне    | 150            |
| Штучне освітлення                         | Комбіноване | 200            |

В приміщенні , особливо в зимовий період, коли світлий день досить короткий, природнього освітлення може бути недостатньо, тому використовується місцеве штучне освітлення (таблиця 6.4). Штучне освітлення здійснюється лампами розжарювання.

Таблиця 6.4 – Вибір освітлюваного пристрою

|                     |                    |
|---------------------|--------------------|
| Тип світильника     | Лампа розжарювання |
| Світло розподілення | Несиметричне       |
| Потужність ламп, Вт | До 200             |

Характер зорової роботи – середня точність; розряд - IV; бокове значення коефіцієнта природної освітленості, %: природне 1,5, суміщене 0,9.

$$e_N = e_H \cdot m_N, \quad (6.1)$$

$m_N$  – коефіцієнт світлового клімату,  $m_N = 0,9$ .

$$e_N = 1,5 \cdot 0,9 = 1,4\%.$$

Для забезпечення нормативного значення  $e_N$  передбачено:

- використання додаткового штучного освітлення, а саме ламп розжарювання;
- необхідна кількість природного світла (великі вікна);
- для підтримки постійної освітленості повинно бути організовано систематичне, не рідше двох разів на місяць, очищення арматури світильників і ламп від пилу та бруду, а в приміщеннях із значним виділенням пилу, диму та кіптяви - не рідше чотирьох разів на місяць згідно з графіком

#### 6.4 Виробничий шум

Рівень звука вимірюється в децибелах і визначається по формулі:

$$L = 20 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_0}\right) = 20 \cdot \lg\left(\frac{U}{U_0}\right), \quad (6.2)$$

де  $L$  – рівень шуму, дБ;

$P$  – звуковий тиск, Па;

$U_0$  – коливальна швидкість,  $5 \cdot 10^{-8}$  м/с;

$P_0$  – нульове значення звукового тиску на нижньому порозі чутності в октавній смузі зі середньгеометричною частотою 1000 Гц, умовно прийняте рівним  $2 \cdot 10^{-5}$  Па.

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки».

Таблиця 6.5 – Рівень звукового тиску

| Характер робіт                                  | Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц |    |     |     |     |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
|                                                 | 32                                                                                                           | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| Постійні робочі місця в промислових приміщеннях | 107                                                                                                          | 95 | 87  | 82  | 78  | 75   | 73   | 71   | 69   |

Шум порушує нормальну роботу шлунка, особливо впливає на центральну нервову систему. Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі.
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

## 6.5 Вібрація

Вібрація відноситься до факторів, які мають велику біологічну активність. Як загальна, так і локальна вібрація несприятливо впливає на організм людини, викликає зміну у функціональному стані вестибулярного апарату, центральної нервової, серцево-судинної систем, погіршує самопочуття та може призвести до розвитку професійних захворювань.

У нашому цеху присутня вібрація типу - За. Тобто технологічна вібрація діюча на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання.

Джерелами вібрацій в умовах, що розглядаються в проекті, являються сама лінія та вентилятори, які відносяться до типу загальної вібрації.

Основні параметри вібрації, такі як середньоквадратичне значення віброприскорення та віброшвидкості, логарифмічні рівні приведені у таблиці 6.6.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено:

- динамічне погашення вібрації - приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи;
- зміна конструктивних елементів машин;
- застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

Таблиця 6.6 – Середньоквадратичні значення

| Категорія вібрації по санітарним нормам | Напрямок дії | Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані значення |     |                                              |    |
|-----------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----|----------------------------------------------|----|
|                                         |              | Віброприскорення                                                            |     | Віброшвидкість                               |    |
|                                         |              | $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$                                              | ДБ  | $\text{м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 10^{-2}$ | ДБ |
| За                                      | Zo, Yo, Xo   | 0,1                                                                         | 100 | 0,2                                          | 92 |

## 6.6 Пожежна безпека

Пожежа в кабіні оператора може виникнути з наступних причин:

- заміна запобіжника або проведення якого-небудь ремонту електричного устаткування при підключеному живленні; застосування запобіжників, які по номінальному струму не відповідають даному колу;

- при появі перехідного опору, який виникає в місцях з'єднання проводів, електричних контактів машин, апаратів тощо.

Не можна продовжувати роботу, якщо у кабіні відчувається запах гару і диму, якщо не з'ясована причина цього і не усунено несправність.

При виникненні пожежі оператор повинен припинити всі виконувані роботи та залишити кабіну. Потім від'єднати живлення та приступити до гасіння пожежі вуглекислотним вогнегасником. Ці вогнегасник можна використовувати для гасіння пожеж будь-якої речовини, машин і устаткування, у тому числі і електричного. Для гасіння пожеж можна також використовувати пісок з пісочниць.

На території цеху слід виконувати наступні правила протипожежної безпеки:

- забороняється встановлювати кран так, щоб він перекривав проїзну частину, виходи і входи, закривав пожежні колодязі, пожежні щити та інші протипожежні пристрої, або утруднював доступ до них;

- при постановці крана на місце стоянки необхідно відключити рубильник, виключити усі високовольтні електричні кола (опалення кабіни, освітлення, двигуни, робочі органи);

- якщо виникло займання мастильних матеріалів потрібно запобігти розповсюдженню горючого середовища, ізолювати його, застосувати заходи пожежогасіння, евакуювати людей у безпечну зону, викликати пожежників.

Необхідно проводити організаційні заходи по забезпеченню пожежної безпеки; навчання робітників правилам пожежної безпеки, проведення інструктажу та ознайомлення з нормами пожежної безпеки, проведення навчальних робіт з пожежної охорони об'єкта.

Приміщення дільниці, де розташована лінія, за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д - негорючі речовини і матеріали в холодному стані.

Таблиця 6.7 – Мінімальні межі вогнестійкості та мінімальні межі розповсюдження полум'я по будівельних конструкціях.

| Стіни  |            |                 |                     | Колони | Сходові клітини,<br>балки, марші | Плити, настили та інші<br>несучі конструкції,<br>перекриття | Елементи<br>перекриття     |              |
|--------|------------|-----------------|---------------------|--------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------|
| Несучі | Самонесучі | Зовнішні несучі | Внутрішні<br>несучі |        |                                  |                                                             | Плити настили і<br>прогони | Балки, ферми |
| 2/0    | 1/0        | 0,25/0          | 0,25/0              | 2/0    | 1/0                              | 0,75/0                                                      | 0,25/0                     | 0,25/0       |

Найбільшу відстань до евакуаційного виходу визначаємо за об'ємом приміщення та ступені вогнестійкості будівлі.

В проектуваному приміщенні, відстань при щільності людського потоку в загальному проході, чол/м<sup>2</sup> наступна: до 1 - 100 м<sup>2</sup>.

Кількість людей для розрахунку ширини евакуаційних виходів показана в таблиці 6.8.

Таблиця 6.8 – Розрахунок ширини евакуаційних виходів

| Об'єм приміщення, тис. м <sup>3</sup> | Категорія приміщення | Ступінь вогнестійкості будівлі | Кількість людей на 1 м ширини Евакуаційного виходу(дверей) |
|---------------------------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 2940                                  | Д                    | IIIa                           | 35                                                         |

На території підприємства встановлено 1 пожежний щит. До комплексу засобів пожежогасіння, які розміщуються в ньому, включенні: вогнегасники ВП-5 - 3шт., ящик з піском - 1шт., покривало з негорючого теплоізоляційного матеріалу або повсті 2м х 2м - 1шт., гаки – 3шт, лопати - 2шт., ломы - 2шт., сокири – 2шт. Ящик для піску має місткість 3м<sup>3</sup> та укомплектований совковою лопатою.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему «Система керування електроприводом ступенів рухомості промислового робота» була виконана модернізація електропривода механічної руки ПР.

У межах кваліфікаційної роботи було проведено дослідження кількох варіантів електроприводів, придатних для застосування в конкретному типі виробничого механізму. На основі техніко-економічного аналізу та попереднього розрахунку потужності двигуна було обрано оптимальну систему приводу — синхронний двигун з постійними магнітами (СДПМ), що працює з частотно-струмовим векторним керуванням та непрямою орієнтацією по полю. У системі застосовано струмові регулятори, реалізовані в нерухомій системі координат. В якості виконавчого елемента обрано електродвигун змінного струму.

Особлива увага була приділена розробці системи керування електроприводом, яка повинна забезпечити точне виконання технологічних завдань. Розроблена схема керування повністю відповідає вимогам технологічного процесу, забезпечує необхідний діапазон регулювання швидкості, а також високу динамічну точність позиціонування.

Проектування електропривода для ступенів рухомості промислового робота є надзвичайно важливим етапом, оскільки від нього залежить точність, швидкість і стабільність роботи всієї роботизованої системи. Електропривод має забезпечувати ефективне керування рухом виконавчих ланок, здатність витримувати змінні навантаження, а також узгодження із зворотними зв'язками за швидкістю та положенням для точного позиціонування.

Було проведено комп'ютерне моделювання та аналіз перехідних процесів у замкнутій системі керування. Результати підтвердили стабільність системи, точність відслідковування положення та необхідний діапазон регулювання швидкості.

Крім того, сформульовано основні принципи безпечної експлуатації автоматизованого електропривода промислового робота, що є важливою складовою для довготривалої та безаварійної роботи обладнання в умовах інтенсивного виробничого середовища.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гулець К. Ю., Іванців Д. Б. **Синтез системи керування електроприводом повороту промислового робота** [Електронний ресурс] // Наукові праці НТУ "ХПІ". – 2021. – №10. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/2bc5db43-347d-448c-9f4d-02d55de1d74b>
2. Белов М. П. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів і технологічних комплексів: підручник для студ. вищ. навч. закладів / М.П. Белов, В.А. Новіков, Л. Н. Розсудів. - 3-є изд., вип. - М.: Видавничий центр Академіям, 2007. - 576 с. ISBN 978-5-7695-4497-2
3. Кузнецов В. Р., Сушко Р. Р. **Синтез системи спільного керування електроприводами промислового робота** [Електронний ресурс] // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – 2020. – №15. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/b769da51-6341-41d2-8687-119ffc5627d1>
4. Довгань С.М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання. - Дніпропетровськ: НГА України, 2001. -137с.
5. Голуб А.П., Кузнецов Б.І., Опришко І.О., Соляник В.П.. Системи керування електроприводами: Навчальний посібник. - К.: НМК ВО, 1992. – 352 с.
6. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; За ред. П.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. - К.: Либідь, 2005. - 680 с.
7. Білюк І., Савченко О., Васильєв О., Смирнова І., Мельниченко О., Меркулов Д. **Підвищення ефективності системи керування електропривода промислового робота** // Scientific Collection «InterConf+». – 2023. – №45. – С. 101–105. – Режим доступу: <https://archives.interconf.center/index.php/2709-4685/article/view/326>

8. Белов М. П. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів і технологічних комплексів: підручник для студ. вищ. навч. закладів / М.П. Белов, В.А. Новіков, Л. Н. Розсудів. - 3-є изд., вип. - М.: Видавничий центр Академіям, 2007. - 576 с. ISBN 978-5-7695-4497-2

9. Розподілені мікропроцесорні системи: конспект лекцій [Електронний ресурс]: для підготовки докторів філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікація за спеціальністю 171 Електроніка за спеціалізацією «Електронні системи» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Т. О. Терещенко – Електронні текстові данні (1 файл:5544 кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 192 с.

10. Texas Instruments. TMS320F2809, TMS320F2808, TMS320F2806, TMS320F2802, TMS320F2801, TMS320C2802, TMS320C2801, TMS320F28016, TMS320F2801 Digital Signal Processors. Data Manual. Literature Number: SPRS230M. October 2003 – Revised March 2011.

11. Texas Instruments. TMS320x280x, 2801x, 2804x Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) Module. Reference Guide. Literature Number: SPRU790D. November 2004 – Revised December 2008.

12. Shen Zhang, Oliver Wallscheid, Mario Porrmann Machine Learning for the Control and Monitoring of Electric Machine Drives: Advances and Trends. arXiv, 2021.

13. Казачковський М. М. Комплектні електроприводи: Навчальний посібник. - Дніпропетровськ :Національний гірничий університет,2003.-226 с.

14. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. - Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. - 404 с.

15. Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й. Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. Моделювання електромеханічних систем. – Кременчук, 2001. – 376 с.

16. Методичне забезпечення лекційного курсу з дисципліни «Налагодження електроустаткування» Уклав Ліх Т. В., 2020. – 92 с.

17. Казачковський М. М. Комплектні електроприводи: Навчальний посібник. - Дніпропетровськ:Національний гірничий університет,2003 – 226 с.
18. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Харків: ТОВ «Видавництво «Форт», 2017. – 759 с.
19. Кобилянський О.В., Терещенко О.П. Методичні вказівки щодо опрацювання розділу охорона праці в дипломних проектах і роботах студентів електротехнічних спеціальностей. – Вінниця 2003. –46 с. управління моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами. Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 4.
20. Модернізація системи керування електропривода транспортної лінії припортового заводу / О.А. Паянок, М.М. Матевосян – *Матеріали конференції «LII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету»,* Вінниця, 2023. [Електронний ресурс]. URL:<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2023/paper/view/17445/14518>– Вінниця : ВНТУ, 2023. – 3 с.
21. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
22. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profdom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv>.

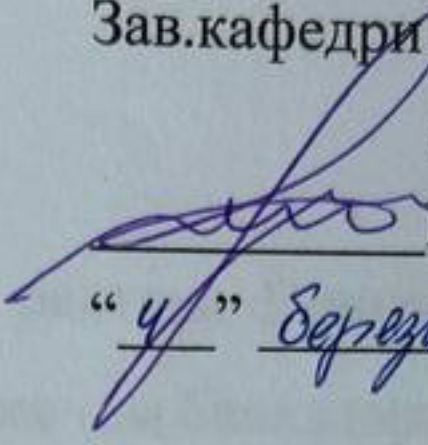
## Додаток А

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедри КЕМСК

К.Т.Н., доц.

 Микола МОШНОРИЗ

« 4 » березня 2025 р.

## ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на бакалаврську дипломну роботу

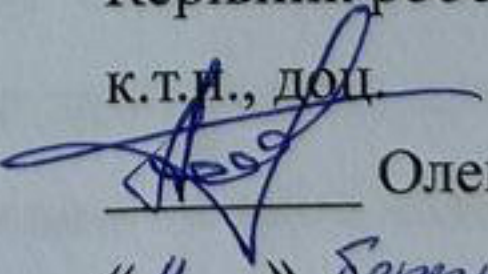
**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СТУПЕНІВ**

**РУХОМОСТІ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА**

08-24.БДР.011.00.000 ТЗ

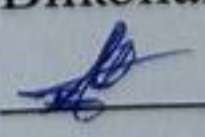
Керівник роботи

К.Т.Н., доц.

 Олександр ПАЯНОК

« 4 » березня 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕМСА-216

 Денис МАНІЛЕНКО

« 4 » березня 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025

## **1. Загальні відомості**

Повне найменування розробки – «Система керування електроприводом ступенів рухомості промислового робота».

Скорочене найменування розробки – «Система керування електроприводом ступенів рухомості промислового робота».

Замовник – Кафедра компютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

## **Підстави для розробки**

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем бакалаврських кваліфікаційних робіт.

## **3. Призначення розробки і галузь використання**

Промисловий робот (ПР) – це універсальний, автономний та автоматичний пристрій із пам'яттю та програмним управлінням, призначений для відтворення рухових і деяких розумових функцій людини при виконанні основних та допоміжних виробничих операцій.

## **4. Вимоги до розробки**

Розрахунок потужності двигуна та подальший вибір електропривода ступенів рухомості промислового робота здійснюють, враховуючи необхідні динамічні властивості при пуску, гальмуванні та зміні навантаження; діапазон регулювання швидкостей; різновид необхідної механічної характеристики режиму роботи в часі та необхідна точність підтримання заданого режиму; частоту включень приводного механізму.

## **5. Комплектація розробки**

Виріб складається з перетворювальних агрегатів, синхронних двигунів з постійними магнітами та системи керування на основі сигнального контролера

типу TMS320F28xx, а також комутаційних пристроїв та периферійних пристроїв керування.

## 6. Елементна база

Система керування генерації електроенергії, апаратура керування і захисту, провідники, кабелі і т. ін. виробництва України чи країн близького зарубіжжя.

## 7. Конструктивне виконання

Складові установки виготовляються окремими блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки у пило-вологозахищеному виконанні.

## 8. Технічні характеристики

Таблиця 1 – Паспортні характеристики двигуна типу ASMT04250LBK

| Параметр, одиниця вимірювання | Позначення       | Значення |
|-------------------------------|------------------|----------|
| Потужність, Вт                | $P_{\text{ном}}$ | 180      |
| Частота обертання, об/хв      | $n_{\text{ном}}$ | 3000     |
| Номінальний струм, А          | $I_{\text{ном}}$ | 0,52     |
| Коефіцієнт потужності         | $\cos\varphi$    | 0,78     |
| ККД                           | $\eta$           | 0,92     |
| Напруга статора, В            | $U_{\text{IH}}$  | 380      |

## 9. Показники технологічності

Електропривод промислового робота – двигун, апаратура керування, провідники, кабелі і т.п. виконується на сучасній елементній базі, його монтаж, заземлення, струмопровід повинен відповідати правилам влаштування електроустановок.

## **10. Джерела розробки**

1. Гулець К. Ю., Іванців Д. Б. **Синтез системи керування електроприводом повороту промислового робота** [Електронний ресурс] // Наукові праці НТУ "ХПІ". – 2021. – №10. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/2bc5db43-347d-448c-9f4d-02d55de1d74b>
2. Белов М. П. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів і технологічних комплексів: підручник для студ. вищ. навч. закладів / М.П. Белов, В.А. Новіков, Л. Н. Розсудів. - 3-є изд., вип. - М.: Видавничий центр Академіям, 2007. - 576 с. ISBN 978-5-7695-4497-2
3. Кузнєцов В. Р., Сушко Р. Р. **Синтез системи спільного керування електроприводами промислового робота** [Електронний ресурс] // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – 2020. – №15. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/b769da51-6341-41d2-8687-119ffc5627d1>

## **11. Технічне обслуговування і ремонт**

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями-електромонтажниками відповідної кваліфікації та відповідний контингент фахівців, які займаються програмуванням робота. Технічний огляд механізму здійснюється мінімум один раз на 3 місяці. Ремонт здійснюється інженерами-електромеханіками та техніками-електромеханіками, фахівцями з електромеханічних систем автоматизації та електропривода.

## **12. Порядок контролю та прийняття**

Виконання етапів графічної та розрахункової документації бакалаврської дипломної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

### **13. Матеріали, що подаються до захисту БКР**

Пояснювальна записка БКР, ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту БКР на кафедрі, відгук наукового керівника, відгук рецензента, протоколи складання державних іспитів, анотації до БКР українською та іноземною мовами, довідка про відповідність оформлення БКР діючим вимогам.

### **14. Вимоги до оформлення БКР**

Вимоги викладені в «Положенні про кваліфікаційні роботи у Вінницькому національному технічному університеті (БКР, МКР)», 2024 р.

**Додаток Б**  
**(обов'язковий)**

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СТУПЕНІВ**  
**РУХОМОСТІ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА**

## Мета, задачі та об'єкт дослідження

**Об'єктом** дослідження є процеси перетворення енергії, які протікають у електротехнічній системі електропривода степенів рухомості промислового робота.

**Предметом** є математичні моделі та структури, які дозволяють підвищити енергетичну ефективність електропривода степенів рухомості промислового робота.

**Метою** бакалаврської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності та надійності функціонування електричного привода промислового робота за рахунок вдосконалення його системи електропривода та модернізації структури електромеханічної частини електроприводу.

В процесі досягнення поставленої в роботі мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

- привести коротку характеристику та режими роботи виробничого механізму;
- виконати розрахунок та вибір потужності електродвигуна механізму;
- провести розрахунки економічної доцільності використання найбільш оптимального з технічної та економічної точки зору варіанту системи електропривода промислового робота;
- виконати необхідні розрахунки та розробити функціональну та принципову електричні схеми електропривода електромеханічного промислового робота типу «антропоморфна рука»;
- провести моделювання запропонованої системи керування з метою перевірки адекватності поведінки системи реальним фізичним та електромеханічним процесам.

## Характеристики об'єкта дослідження



Промислові Роботи на виробництві масово поширилися наприкінці XX століття в зв'язку зі значним зростанням промислового виробництва. Великі серії продукції зумовили потребу в інтенсивності та якості такої роботи, виконання якої перевищує об'єктивні людські можливості. У процесі розрахунків і досліджень розглядається варіант промислового робота, створеного за найпоширенішою та універсальною кінематичною схемою типу «антропоморфна рука». Зовнішній вигляд типового робота з такою конструкцією представлено на рисунку.

Основним напрямом розвитку машинобудування є підвищення ефективності виробництва. Це забезпечується вдосконаленням існуючих та впровадженням нових видів обладнання, технологічних процесів та засобів автоматизації.

До таких засобів автоматизації, які є досить відповідальними ланками будь-якого промислового виробництва, можна віднести «Промислові роботи» (ПР).

ПР застосовуються в різних галузях промисловості, як в дрібносерійному так і в масовому виробництві.



## Будова механізму промислового робота

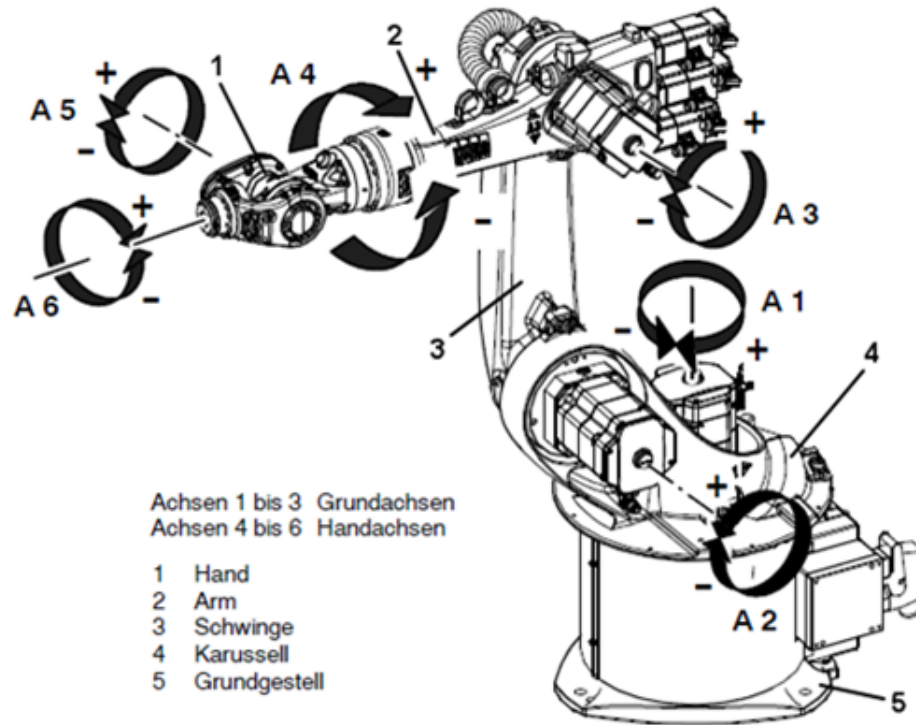


Рисунок 1.2 – Структура 6-осьової антропоморфної кінематичної схеми промислового робота

На рисунку 1.2 приведені такі позначення: вісі A1-A3 – це основні вісі; вісі A4-A5 – вісі зап'ястя; 1 – зап'ястя; 2 – рука; 3 – плече; 4 – карусель; 5 – опора.

Подібна КС дозволяє застосовувати маніпулятор в наступних галузях діяльності:

- маніпулювання, навантаження і розвантаження;
- упаковка та вибіркоче комплектування;
- електродугове зварювання;
- пайка;
- металолivarне виробництво;
- операції обробки, збірки / розбирання;
- формувальне обладнання;
- обслуговування верстатів;
- вимірювання, тестування та перевірка;
- палетування.

## Кінематичні вузли та кінематичний взаємний вплив ланок ПР

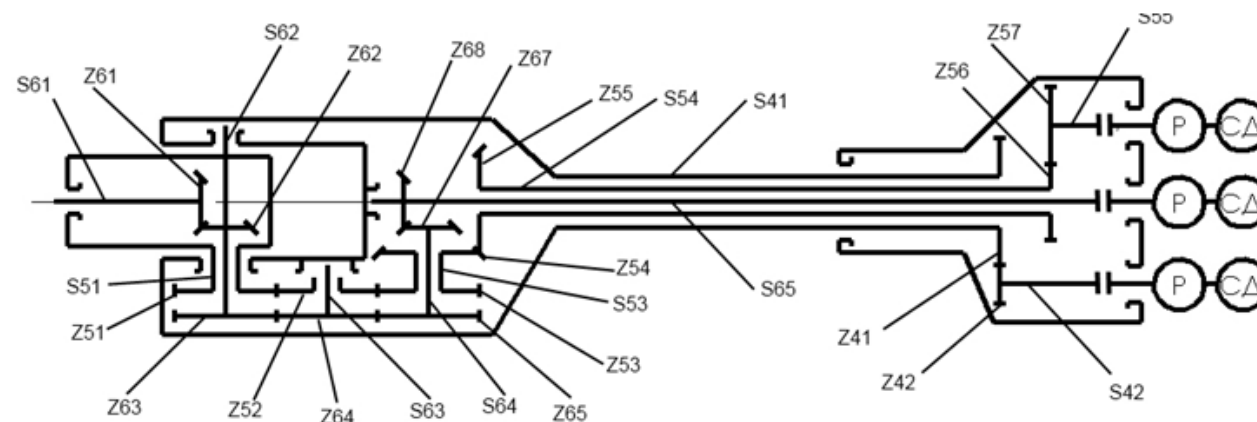


Рисунок 4 – Кінематична схема модуля руки промислового робота

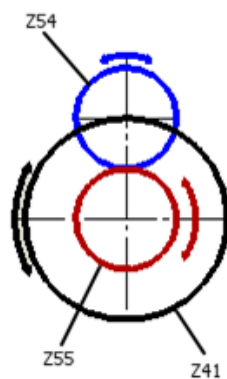
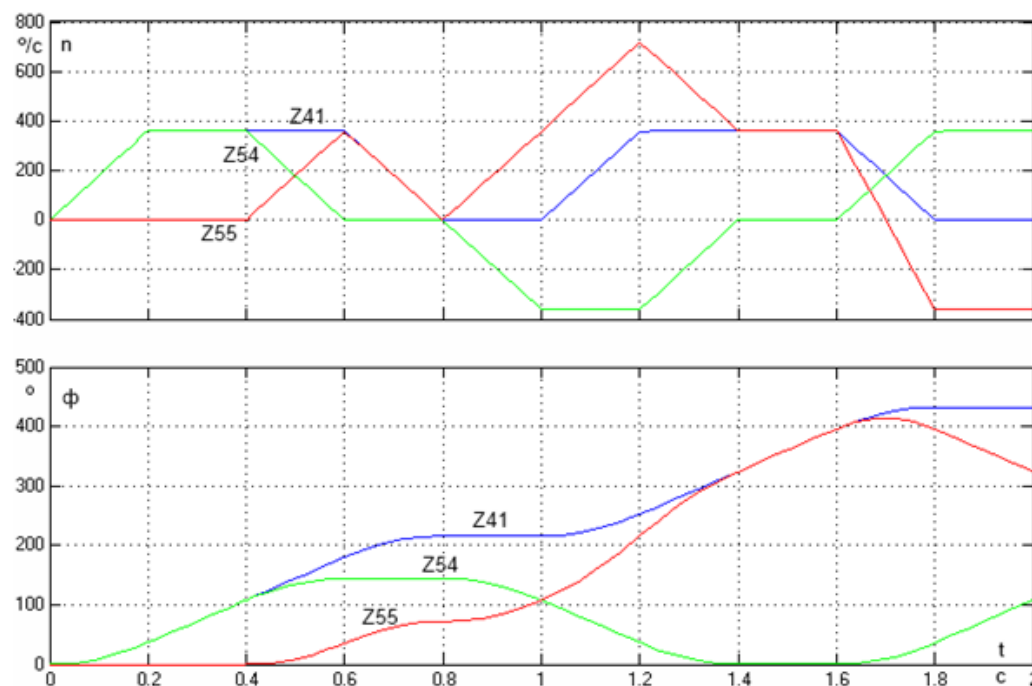


Рисунок 4 – Приведена схема взаємодії осей A5 та A4 та кутове переміщення та кутова швидкість ланок Z54, Z55, Z41



## Розрахунок потужності, техніко-економічне обґрунтування ЕП ПР

Таблиця 3.1 – Економічне порівняння варіантів систем електропривода

| Показники                                                                      | Тип системи електроприводу |        |         |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------|---------|
|                                                                                | ТП-ДПС                     | ШП-ДПС | ПЧ-СДПМ |
| Потужність двигуна $P_n$ , кВт                                                 | 0,18                       |        |         |
| Вартість двигуна (Д), грн.                                                     | 7432                       | 7432   | 5088    |
| Вартість системи керування (СК), грн.                                          | 12960                      | 13576  | 12332   |
| Капіталовкладення $K = Д + СК$ , грн                                           | 20392                      | 21008  | 17420   |
| Амортизаційні відрахування,<br>$Ca = Ea * K$ , грн.                            | 1427                       | 1471   | 1219    |
| Витрати на обслуговування і ремонт,<br>$Co = Eo * K$ , грн.                    | 408                        | 420    | 348     |
| Вартість електроенергії<br>$mo$ , грн/кВт год                                  | 10,93                      |        |         |
| ККД $\eta_d$ , %                                                               | 0,85                       | 0,85   | 0,92    |
| Втрати потужності,<br>$\Delta P = k_s * P_n * (1 - \eta_d / \eta_n)$ , кВт     | 0,022                      | 0,022  | 0,011   |
| Кількість втраченої електроенергії за рік<br>$\Delta W = \Delta P * T_p$ , кВт | 132                        | 132    | 66      |
| Витрати на електроенергію,<br>$C_{\Delta W} = mo * \Delta W$ , грн             | 1443                       | 1443   | 721,4   |
| Собівартість<br>$C = Ca + Co + C_{\Delta W}$ , грн.                            | 3278                       | 3333   | 2289    |
| Зведені витрати<br>$Z = E_n * K + C$ , грн.                                    | 6336,8                     | 6484,7 | 4902,2  |

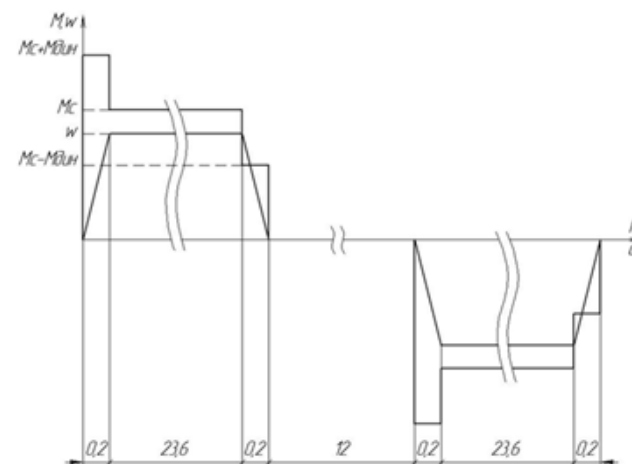


Рисунок 5 - Тахограма та навантажувальна діаграма механізму

Таблиця 4.1 – Паспортні характеристики двигуна ASMT04250LBK

| Параметр, одиниця вимірювання     | Позначення    | Значення             |
|-----------------------------------|---------------|----------------------|
| Потужність, Вт                    | $P_{ном}$     | 180                  |
| Частота обертання, об/хв          | $n_{ном}$     | 3000                 |
| Номинальний струм, А              | $I_{ном}$     | 0,52                 |
| Коефіцієнт потужності             | $\cos \phi$   | 0,78                 |
| ККД                               | $\eta$        | 0,92                 |
| Напруга статора, В                | $U_{1н}$      | 380                  |
| Кратність критичного моменту      | $\lambda_k$   | 2,2                  |
| Кратність пускового моменту       | $\lambda_{п}$ | 2                    |
| Момент інерції, кг·м <sup>2</sup> | $J_p$         | $0,42 \cdot 10^{-3}$ |
| Частота мережі живлення, Гц       | $f$           | 50                   |
| Кількість фаз                     | $m$           | 3                    |

## Огляд можливих варіантів електроприводу

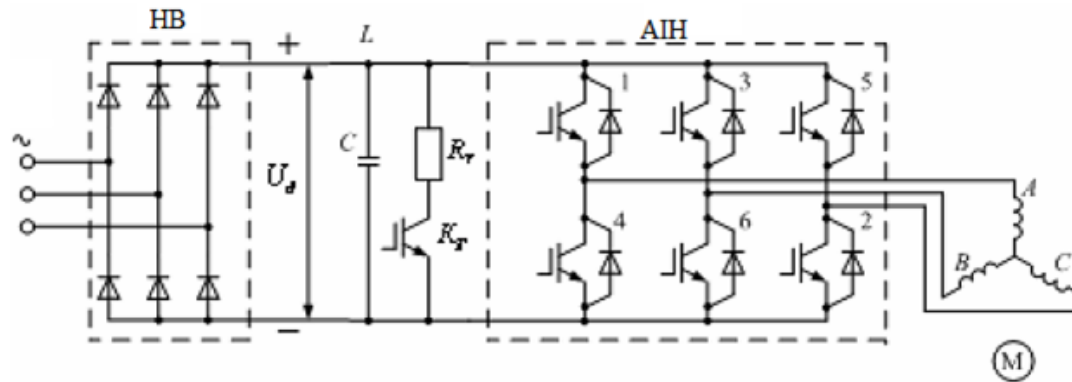


Рисунок 8 – Структура силової частини ПР

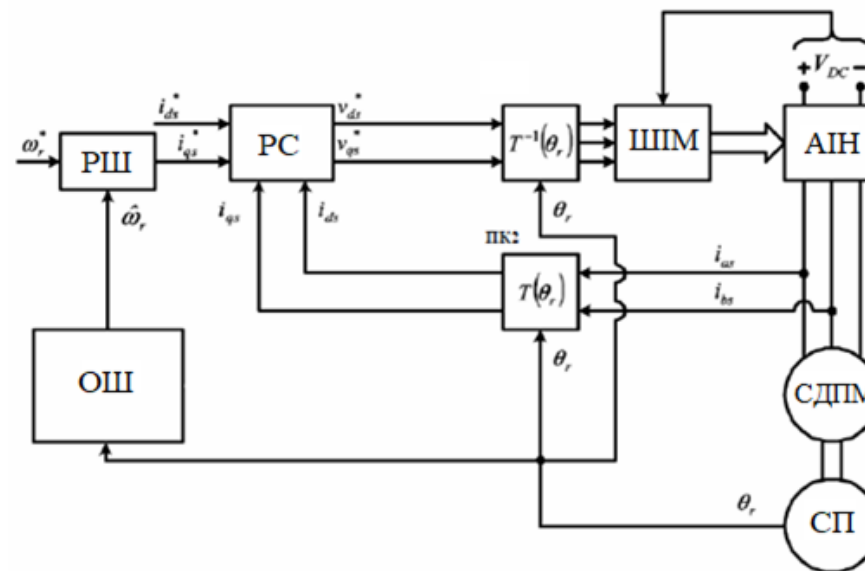


Рисунок 9 – Функціональна схема управління СДПМ змінного струму з безпосередньою орієнтацією системи координат, що обертається, за положенням ротора двигуна

## Розробка схеми електричної функціональної

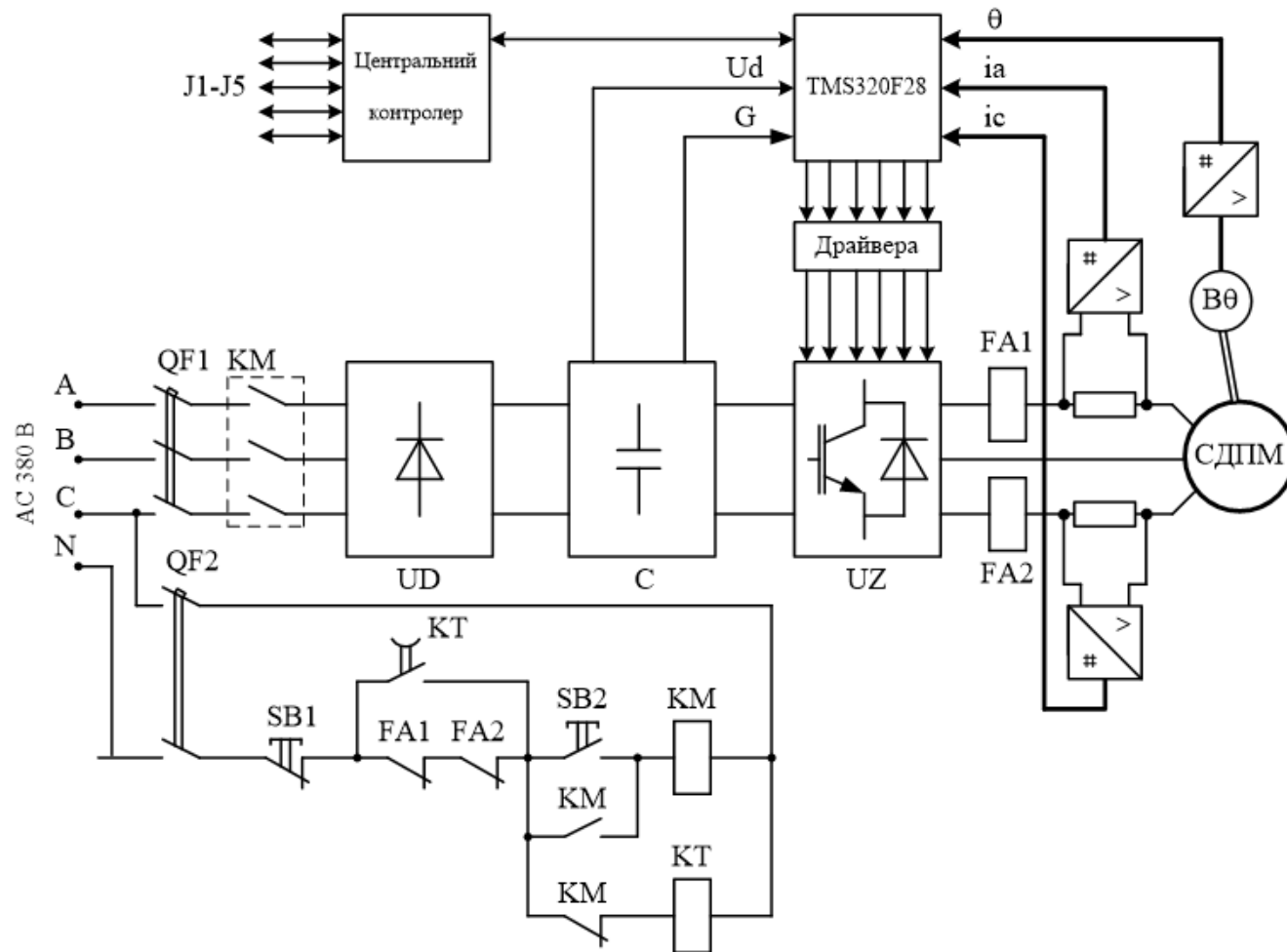


Рисунок 10 - Функціональна схема керування електроприводом одного ступеня рухомості промислового робота

## Розробка схеми електричної принципової системи керування трьох ступенів рухомості

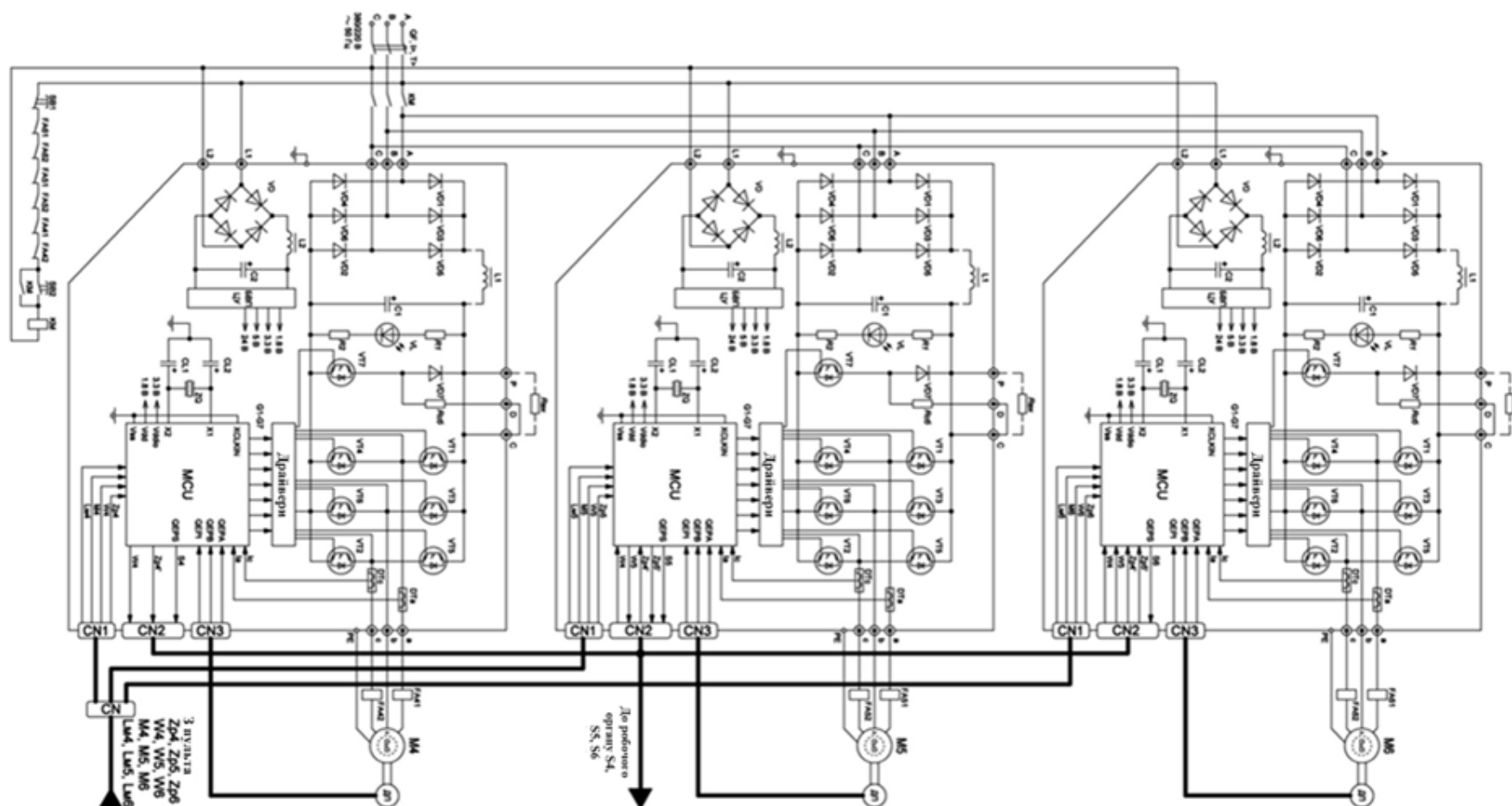


Рисунок 11 – Схема електрична принципова ступенів рухомості промислового робота

## Дослідження динамічних характеристик СЕАП ПР

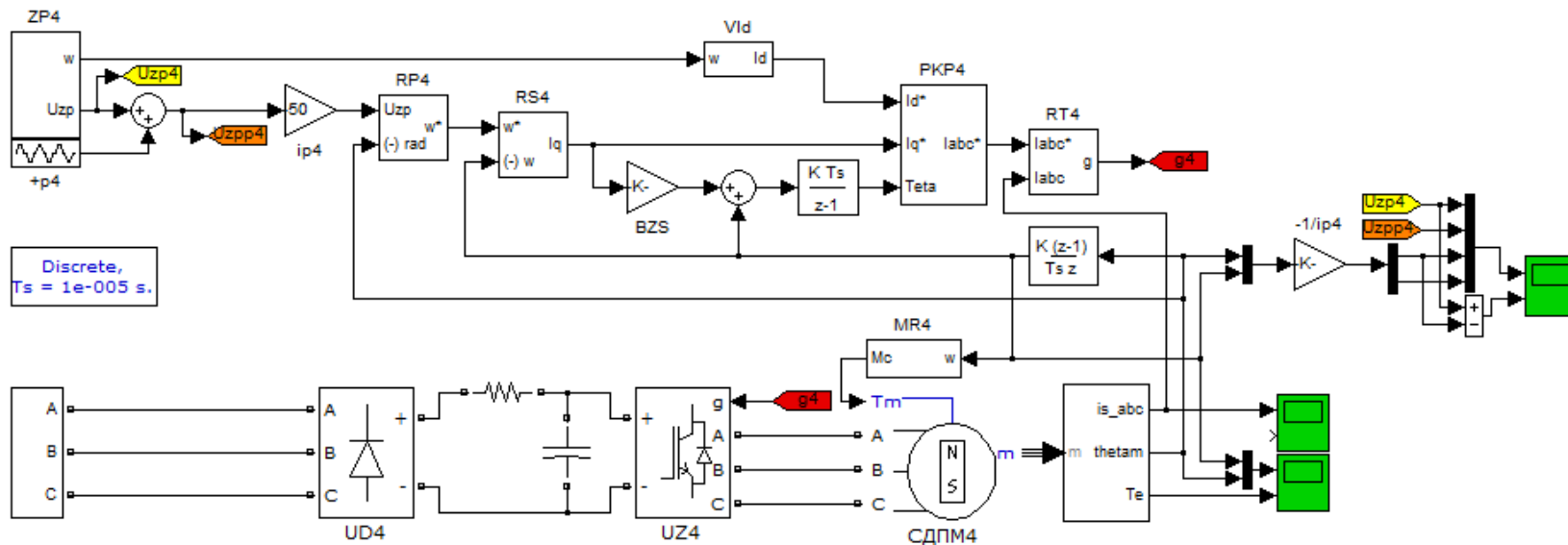


Рисунок 12 – Модель системи електропривода в ППП Matlab Simulink

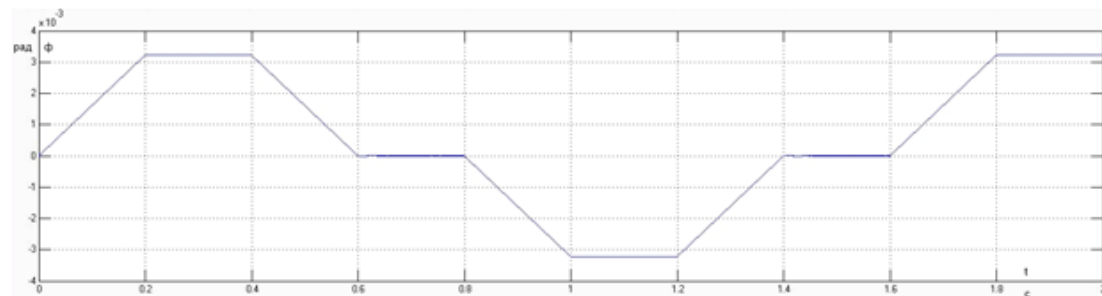


Рисунок 13 Блок обчислення завдання струму  $V_{Id}$  та його параметри

Рисунок 14 – Вихідна помилка стеження системи

## Модель системи керування ЕП

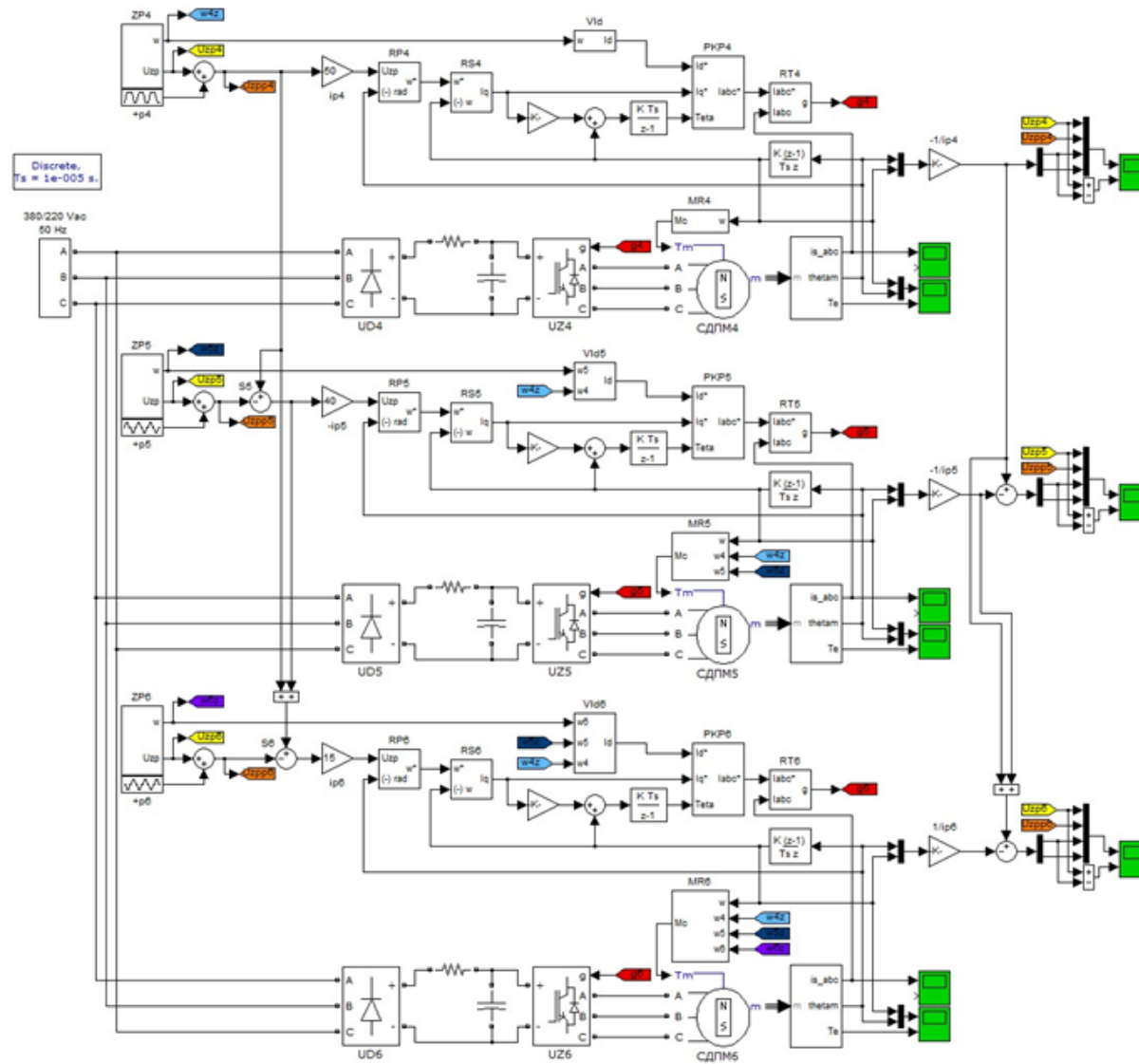


Рисунок 15 – Модель системи керування ЕП механічної руки ПР

## Дослідження динамічних характеристик СЕАП ІР

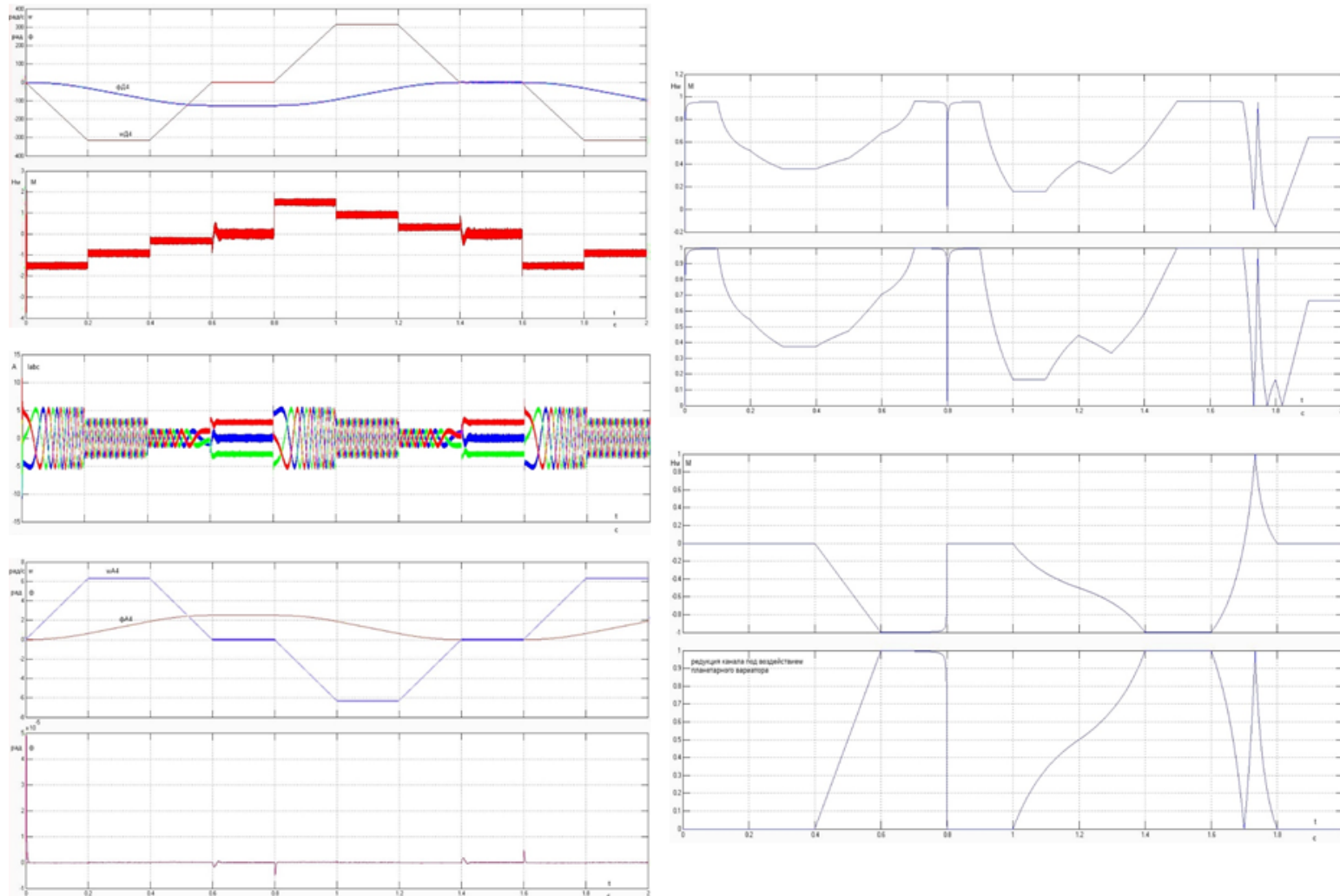


Рисунок 16 – а) Результати моделювання системи управління САЕП; б) Графіки моменту навантаження та редукція передаточних механізмів осі А5 під дією планетарного варіатора

## ВИСНОВКИ

У межах кваліфікаційної роботи було проведено дослідження кількох варіантів електроприводів, придатних для застосування в конкретному типі виробничого механізму.

На основі техніко-економічного аналізу та попереднього розрахунку потужності двигуна було обрано оптимальну систему приводу — синхронний двигун з постійними магнітами (СДПМ), що працює з частотно-струмовим векторним керуванням та непрямою орієнтацією по полю. У системі застосовано струмові регулятори, реалізовані в нерухомій системі координат. В якості виконавчого елемента обрано електродвигун змінного струму.

Особлива увага була приділена розробці системи керування електроприводом, яка повинна забезпечити точне виконання технологічних завдань. Розроблена схема керування повністю відповідає вимогам технологічного процесу, забезпечує необхідний діапазон регулювання швидкості, а також високу динамічну точність позиціонування.

Проектування електропривода для ступенів рухомості промислового робота є надзвичайно важливим етапом, оскільки від нього залежить точність, швидкість і стабільність роботи всієї роботизованої системи. Електропривод має забезпечувати ефективне керування рухом виконавчих ланок, здатність витримувати змінні навантаження, а також узгодження із зворотними зв'язками за швидкістю та положенням для точного позиціонування.

Було проведено комп'ютерне моделювання та аналіз перехідних процесів у замкнутій системі керування. Результати підтвердили стабільність системи, точність відслідковування положення та необхідний діапазон регулювання швидкості.

Крім того, сформульовано основні принципи безпечної експлуатації автоматизованого електропривода промислового робота, що є важливою складовою для довготривалої та безаварійної роботи обладнання в умовах інтенсивного виробничого середовища.

# ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Система керування електроприводом ступенів рухомості промислового робота

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕМСА-23мс

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 29,45 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Гарант ОП

Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Маніленко Д.І.

(прізвище, ініціали)