

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр

Освітній рівень

Автоматизація системи керування електроприводом руки-маніпулятора  
промислового робота

Назва теми

КвРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Шифр, назва

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

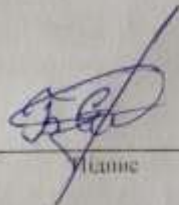
Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Назва

Виконав:

студент 4 курсу, група АКІТ-19-1

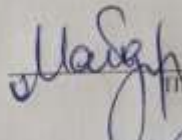


Підпис

Євген БОНДАР

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник




Підпис, дата

Павло МАЙДАН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер



Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:  
зав. кафедри автоматизації,  
комп'ютерно-інтегрованих  
технологій та робототехніки



Підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

« 6 » червня 2023 р.

Хмельницький 2023

Хмельницький національний університет

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та  
робототехніки

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня-професійна програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою АКТІ та Р  
В. Мержинич  
«01» 02 2023р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Бондар Свген Сергійович

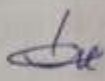
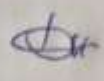
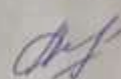

- 1 Тема роботи: Автоматизація системи керування електроприводом руки-маніпулятора промислового робота  
керівник роботи Майдан П.С., к.т.н, доцент  
Затверджено наказом по університету від «01» березня 2023р. №5.
- 2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 03.06.2023р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на дипломне проектування
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Огляд та аналіз конструкції та технології роботи руки-маніпулятора ПР. Основна частина. Розробка системи керування електроприводом руки-маніпулятора ПР. Розробка системи керування електроприводом руки-маніпулятора промислового робота. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) 1. Функціональна схема регулювання положення СДПМ. 2. Моделювання системи керування електроприводом руки-маніпулятора ПР. 3. Схема електрична принципова електроприводу руки-маніпулятора ПР

Завдання отримав

Науковий керівник

Бондар Свген Сергійович  
Майдан П.С.

Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М.В., доцент кафедри АКІТтаР		
Нормоконтроль	Корецька Л.О., доцент кафедри АКІТтаР		

7. Дата видачі завдання « 01 » 02 2023 р.

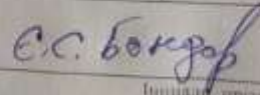
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

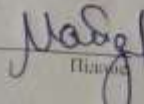
№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Вступ	15.02.2023р.	Виконано
2	Огляд та аналіз конструкції та технології роботи руки-маніпулятора ПР	15.03.2023р.	Виконано
3	Основна частина	10.04.2023р.	Виконано
4	Розробка системи керування електроприводом руки-маніпулятора ПР. Розробка системи керування електроприводом руки-маніпулятора промислового роботу.	10.05.2023р.	Виконано
5	Висновки	15.05.2023р.	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки до КРБ	25.05.2023р.	Виконано
7	Оформлення презентаційних матеріалів	1.06.2023р.	Виконано

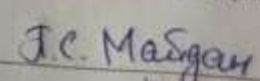
Студент

Керівник роботи

  
Підпис

  
Ініціали, прізвище

  
Підпис

  
Ініціали, прізвище

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизація системи керування електроприводом руки-маніпулятора промислового робота».

Автор роботи: Бондар Євген Сергійович

Керівник роботи: Майдан П.С. к.т.н., доцент

Пояснювальна записка: 62 с., 29 рис., 1 табл., 2 дод., 40 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ, МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА, МІКРОКОНТРОЛЕР, РУКА-МАНІПУЛЯТОР, ЕЛЕКТРОПРИВОД, СИНХРОННИЙ ДВИГУН, SOLIDWORKS, ПРОМИСЛОВИЙ РОБОТ.

Метою роботи є розробка системи керування електроприводом ступенів рухливості промислового робота. В якості розроблюваних осей прийнято осі руки-маніпулятора промислового робота. Встановлено оптимальну кінематичну схему універсального промислового робота. Запропоновано необхідні вимоги до механізму, зібрано необхідний матеріал для зворотного інжинірингу, спроектовано трансмісію руки-маніпулятора. Визначено параметри, необхідні для вибору електроприводу. Враховано кінематичні взаємодії ланок руки-маніпулятора. Обрано двигуни для осей руки-маніпулятора промислового робота, наведено можливі варіанти електроприводу. У середовищі MATLAB R2009b виконано моделювання та симуляцію системи керування електроприводом, проаналізовано динамічні процеси. Базуючись на результатах моделювання, встановлено, що запропонована функціональна схема придатна для використання при керуванні СДПМ. Запропоновано та розроблено принципову електричну схему керування електроприводом руки-маніпулятора промислового робота.

06.06.2023р.

дата



Підпис

## Зміст

ВСТУП	с. 3
1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІ ТА ТЕХНОЛОГІЇ РОБОТИ РУКИ-МАНІПУЛЯТОРА ПР	5
1.1 Опис конструкції та технології роботи руки-маніпулятора ПР	5
1.2 Розробка трансмісії руки-маніпулятора ПР	7
1.3 Кінематичний взаємовплив ланок руки-маніпулятора ПР	13
1.4 Висновки до першого розділу	16
2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ РУКИ-МАНІПУЛЯТОРА ПР	17
2.1 Розробка системи електропривода руки-маніпулятора ПР	17
2.2 Розробка системи керування електроприводом руки-маніпулятора ПР	32
2.3 Висновки до другого розділу	34
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ РУКИ-МАНІПУЛЯТОРА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТУ	35
3.1 Моделювання та аналіз системи електроприводу без урахування кінематичного взаємовпливу ланок руки-маніпулятора ПР	35
3.2 Моделювання та аналіз системи електроприводу з урахуванням кінематичного взаємовпливу ланок руки-маніпулятора ПР	43
3.3 Розробка схеми керування електроприводом руки-маніпулятора ПР	51
3.4 Висновки до третього розділу	54
ВИСНОВКИ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57
ДОДАТКИ	62

				КВРАКІТ.2019040.01.02 ПЗ		
Зм.	Арк.	Недокум.	Підпис	Дата		
Виконав	Бондар Є.С.			08.06.2023	Автоматизація системи керування електроприводом руки-маніпулятора промислового робота. Пояснювальна записка	Літера
Перевір.	Майдан П.С.			06.06.23		у
Н.контр.	Корешька Л.О.			06.06.23		Аркуш
Затвер.	Мартинюк В.В.			06.06.23		Аркушів
						2
						62
						ХНУ гр. АКІТ-19-1

## ВСТУП

Промислова робототехніка розташовується на передньому плані використання нових технологій, поєднуючи в собі як механіку так і електроніку, даний напрямок автоматизації технологічних процесів продовжує розвиватися особливо швидко за рахунок бурхливого розвитку саме електроніки. Застосування нових технологій та матеріалів дає змогу суттєво розширити можливості використання мікропроцесорної техніки за стабільного зменшення її габаритів і збільшення продуктивності, що в свою чергу має вплив як на збільшення спектра завдань, які можуть виконувати промислові роботи (ПР), так і на загальну якість їх виконання.

Серед найпоширеніших дій, що виконуються за допомогою ПР, можна вказати наступні:

- електродугове та точкове зварювання;
- транспортування заготовок та деталей від верстата до верстата або від верстата до систем змінних палет;
- фарбування поверхонь;
- виконання операцій різання, при якому рух інструменту відбувається за складною траєкторією.

До основних переваг ПР відносять:

- виключення впливу людського фактору на конвеєрних виробництвах, а також під час виконання монотонних робіт, що вимагають досить високої точності;
- можливість використання технологічного обладнання в три зміни, 365 днів на рік;
- відносно швидка окупність;
- раціональність використання виробничих приміщень;
- підвищення точності виконання технологічних операцій і, як наслідок, поліпшення якості;

					<i>КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ</i>	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- унеможливлення впливу шкідливих факторів на робочий персонал на виробництвах із підвищеною небезпекою.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка системи керування електроприводом ступенів рухливості ПР. В якості розроблюваних осей прийнято осі руки-маніпулятора ПР. У зв'язку з відсутністю конкретних кінематичних схем і даних, необхідних для розрахунку потужності електроприводів, прийнято рішення сконструювати трансмісію руки-маніпулятора ПР шляхом аналізу доступних матеріалів та на основі отриманих аналітичних даних розробити систему керування електроприводом руки-маніпулятора ПР.

					<i>КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ</i>	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ РОБОТИ РУКИ-МАНІПУЛЯТОРА ПР

## 1.1 Опис конструкції та технології роботи руки-маніпулятора ПР

У результаті детального аналізу сучасних універсальних маніпуляторів ПР [1-13] (рис. 1.1), із вантажопідйомністю більше 5 кг, було встановлено, що в абсолютній більшості випадків використовується антропоморфна кінематична схема (КС) із шістьма обертовими осями (рис. 1.2).



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд найбільш поширених маніпуляторів ПР, на прикладі: KAWASAKI RS20N, FANUC Arc Mate 120iC, KUKA KR 16, YASKAWA MOTOMAN MA1800, ABB IRB 2400

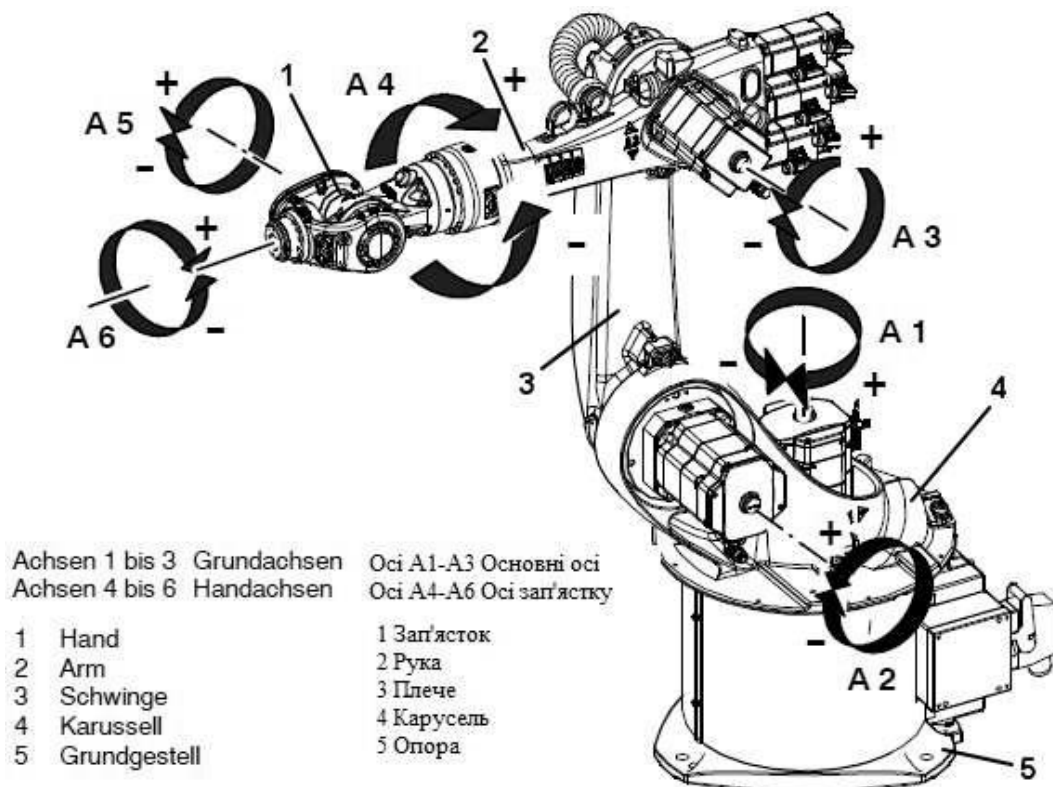


Рисунок 1.2 - Шести осьова антропоморфна КС на прикладі маніпулятора ПР  
KUKA KR16

Подібна КС дає можливість використовувати маніпулятор ПР у наступних галузях промисловості [2, 3]:

- пакування та вибіркове комплектування;
- маніпулювання, навантаження та розвантаження;
- палетування;
- металолivarні виробництва;
- електродугове зварювання та пайка;
- формувальне обладнання;
- операції з обробки чи складання/розбирання;
- обслуговування верстатів;
- вимірювання, тестування та перевірка.

Порівняльний аналіз основних даних маніпуляторів ПР, необхідних для розроблення системи керування електроприводом, наведено в Додатку Г табл. Г.1.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

KBPAKIT.2019040.01.02.ПЗ

Арк.  
6

## 1.2 Розробка трансмісії руки-маніпулятора ПР

Жоден із виробників не надає даних про кінематику трансмісії руки-маніпулятора ПР, яка дає змогу позбутися необхідності встановлювати електродвигун безпосередньо в зчленуваннях. За вантажопідйомності від 10 кг це дає можливість збільшити швидкодію, істотно знизити масо-габаритні показники руки-маніпулятора ПР, знизити інерційність руки-маніпулятора, покращити її маневреність та, відповідно, полегшити проблему підведення інформаційних та силових кабелів до обертових електроприводів [14-16].

У зв'язку з цим, під час проектування електроприводу маніпулятора ПР буде виникати проблема конструювання трансмісії руки-маніпулятора від КС, передаточних відношень до масових характеристик модуля руки-маніпулятора. При цьому дані табл. А.1. будуть використовуватися для виконання порівняння показників розробленої конструкції руки-маніпулятора ПР із існуючими аналогами.

Для отримання надійної та досконалої конструкції трансмісії слід забезпечити наступні вимоги [16]:

- застосування найбільш раціональні та надійні схеми редукторів, що, в свою чергу, забезпечують необхідну жорсткість та міцність конструкцій, виготовлених із матеріалу із високою питомою міцністю та зміцненою робочою поверхнею зубів коліс при суттєвих навантаженнях;
- зниження матеріаломісткості за рахунок, з однієї сторони - компактності конструкції та з іншої – через вибір раціональної форми деталей;
- надійне стопорення різьбових з'єднань та, відповідно, фіксацію деталей від взаємного зміщення;
- використання уніфікації, або стандартних деталей та досягти повної взаємозамінності елементів конструкцій;
- мінімізацію енергоспоживання під час експлуатації, шляхом зниження втрат на тертя та підвищенням ККД;

					<i>КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		7



внутрішнього діаметра підшипника, який здатний витримати необхідні навантаження, водночас вал повинен мати потрібну жорсткість, тобто не прогинатися під впливом прикладеного навантаження.

Внутрішній діаметр порожнистого валу буде обиратись виходячи із вимоги забезпечення зазору між валами, зовнішній діаметр буде обиратись виходячи із вимоги забезпечення необхідної жорсткості. Аналіз міцності виконано в програмному середовищі SolidWorks Simulation. Характеристики міцності повинні забезпечити необхідну жорсткість механізму.

3. Визначення типів зубчастих передач. При цьому норми кінематичної точності, плавності роботи, контакту зубів не розглядаються, оскільки не мають суттєвого впливу на загальну конструкцію. В конструкції будуть застосовуватись лише евольвентні зубчасті передачі. Зубчасті передачі Z57-Z56; Z42-Z41 обираються косозубими, що порівняно з прямозубими передачами мають більшу навантажувальну здатність у зв'язку з високою міцністю на вигин, більш високу плавність зачеплення, нижчий шум та нижчі динамічні навантаження [17]. У косозубих передачах існує осьова сила, яка може призвести до вигину колеса, тому потрібна наявність маточини у колеса, також необхідно встановлювати в таких типах передач упорні підшипники. Оскільки використання маточин призводить до збільшення габаритів коліс, тому будуть використовуватись прямозубі передачі Z53-Z52-Z51 та Z65-Z64-Z63. Передачі Z55-Z54; Z68-Z67 та Z61-Z62 є конічними передачами із круговими зубами. Переваги порівняно із прямим зубом у цьому випадку такі самі, як і в циліндричних передачах із непрямым зубом [17]. Саме модулі зубів та їх кількість повинна забезпечити плавність та точність передачі.

4. Підбір типів підшипників виходячи із прикладених навантажень та габаритних розмірів [17].

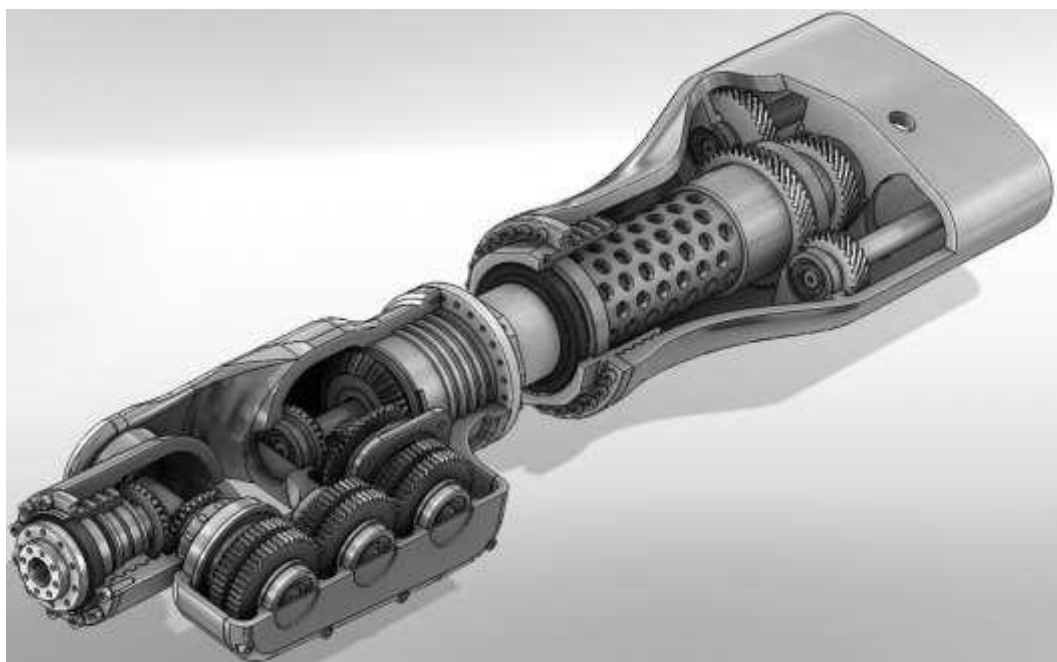
5. Конструювання складальних вузлів із урахуванням технології збирання та розбирання маніпулятора.

6. Формування корпусів вузлів.

					<i>КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		9



а



б

а – зовнішній вигляд модуля руки-маніпулятора ПР; б – розріз корпусу модуля  
руки-маніпулятора ПР

Рисунок 1.4 – Вигляд модуля руки-маніпулятора ПР спроектованого в  
програмному середовищі SOLIDWORKS:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

*КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ*

Арк.
10

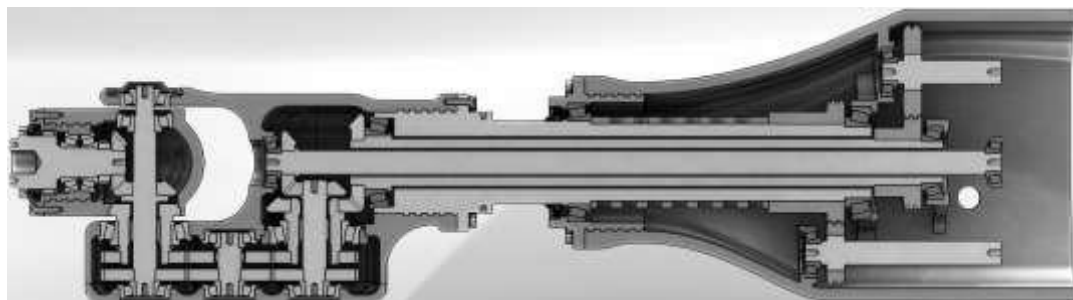
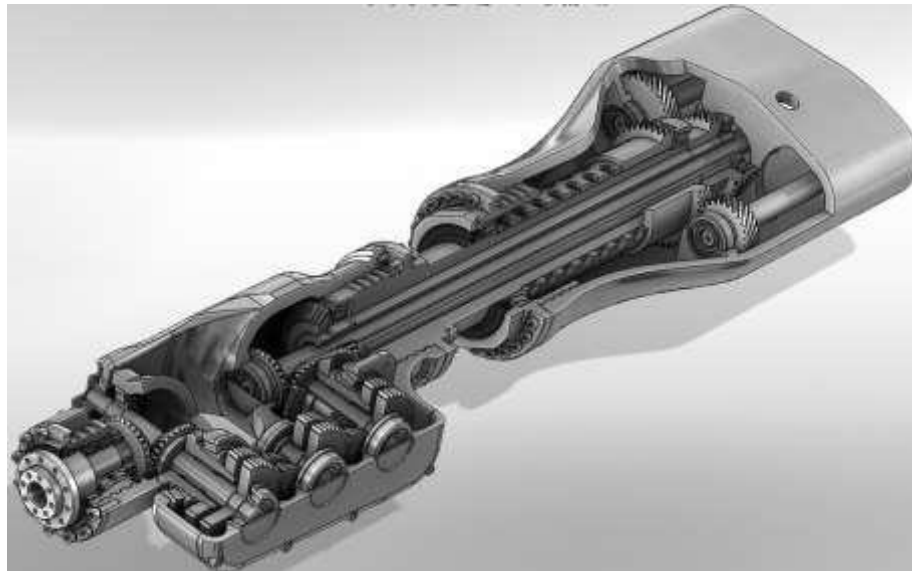


Рисунок 1.5 – Місцеві розрізи модуля руки-маніпулятора ПР

Спроектована трансмісія конструктивно не є закінченою та, відповідно, потребує певних змін. Наявні недоліки не впливають на загальну кінематику всього механізму, але значною мірою визначають придатність до ремонту, надійність, технологію складання, зношування.

Певні зауваження до спроектованої трансмісії:

- у більшості вузлів не уточнено фіксацію зубчастих коліс на валу, в деяких випадках доцільно виточування колеса та валу із суцільної заготовки;
- деякі вузли підшипників потребують зміни орієнтації роликової обойми, що вимагає заново проаналізувати питання регулювання осьового зазору;
- не виключено використання в деяких вузлах інших типів підшипників, а саме підшипників ковзання;
- деякі схеми встановлення підшипників та їх фіксація на валах та в корпусі можуть бути змінені якщо враховувати температурну деформацію валів;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

*КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ*

Арк.  
11

- питання змащення не розглянуто, а саме марка мастила та необхідний об'єм;
- не вирішена проблема ущільнень;
- на валах немає розвантажувальних канавок;
- не встановлені необхідні посадки та допуски на розміри;
- можлива зміна масо-габаритних показників при використанні інших матеріалів, наприклад полімеру ZEDEX для виготовлення зубчастих коліс;
- конструкції деяких вузлів потребують технологічного спрощення;
- в конструкції відсутній блок редукторів та двигунів, що приєднуються за допомогою сильфонних муфт;
- відсутні посадкові місця під електродвигун та редуктор на осі А3;
- конічні прямозубі шестерні доцільно замінити на конічні з криволінійним зубом;
- конічні шестерні необхідно перевірити на потребу використання маточин;
- корпуси доцільно доопрацювати, врахувавши специфіку та можливості лиття.

Незважаючи на вказані зауваження, ми робимо припущення, що їх усунення в сукупності суттєво не матиме вплив на моменти інерції, приведені до валів електродвигунів.

Основною метою даної трансмісії є передача руху, редукція здійснюється тільки в каналі осі А4 з передаточним відношенням  $i_p = 0,5$ . Безпосередня редукція швидкостей виконуватиметься саме в блоці редукторів Р (див. рис. 1.3).

Параметри спроектованої трансмісії руки-маніпулятора ПР, необхідні для розрахунку електроприводів осей руки:

- $\omega_{A6} = 720^\circ/C$ ;  $\omega_{A5} = 360^\circ/C$ ;  $\omega_{A4} = 360^\circ/C$ ;
- ЕЦМН (див. табл. А.1) відносно осі А6 – 0,1м;
- ЕЦМН відносно фланця - 0,15м;

$$Z61=Z62=Z68=Z67;$$

$$Z63=Z64=Z65=Z51=Z52=Z53;$$

-  $Z55=Z54;$

$$Z56=Z57;$$

$$Z41:Z42=1:2.$$

Передаточні відношення редукторів, що приєднуються:

-  $iPA6=15; iPA5=40; iPA4=25;$

Моменти інерції осей із урахуванням ЕЦМН:

-  $JA6=0,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; JA5=1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; JA4=0,863 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$

Моменти інерції, приведені до валів електродвигунів:

-  $JA6_{\text{прив}}=JA6/iPA6^2=0,15/15^2=6,67 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$

-  $JA5_{\text{прив}}=JA5/iPA5^2=1/40^2=6,25 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$

-  $JA4_{\text{прив}}=JA4/(iPA4 \cdot i_{z41:z42})^2=0,863/(25 \cdot 2)^2=3,45 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$

### 1.3 Кінематичний взаємовплив ланок руки-маніпулятора ПР

Запропонована КС (див. рис. 1.3) має властивість кінематичного взаємовпливу. У загальному випадку це означає, що рухливість кожної осі залежить від рухливості попередніх, тобто рухливість осі А6 залежить від рухливості осей А5 та А4, а рухливість осі А5 залежить від рухливості осі А4.

Подібні взаємодії можна усунути за допомогою використання механічних компенсаторів, але найраціональнішим та найнадійнішим є використання способу програмної компенсації, тобто безпосередньо алгоритмом керування електроприводами та завданням, так званих, компенсувальних переміщень.

За використання будь-якого варіанта компенсації програма керування верхнього рівня розглядатиме механічну руку-маніпулятор так, ніби електродвигуни розташовані в шарнірах самої руки [15]. Продемонструємо це на прикладі взаємодії осей А4 та А5 за допомогою передачі Z42-Z41, що обертає через вал S41 корпус із передачею Z55-Z54.

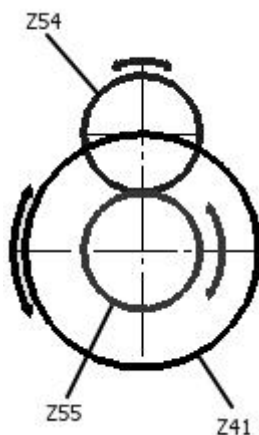


Рисунок 1.6 – Приведена схема взаємодії осей A4 та A5

На рис. 1.6 схематично представлено три шестерні: Z41; Z55 та Z54. Шестерня Z41 умовно використовується в якості корпусу для передачі Z55-Z54, утворюється, так званий, планетарний механізм. Передача Z55-Z54 приведена до циліндричної передачі для наочності.

Оскільки ця взаємодія є синтезом конічної та планетарної передач, то описується вона наступним рівнянням:

$$n_{Z54} = n_{Z41} \cdot \left( \cos \beta + \frac{Z54}{Z55} \right) - n_{Z55} \cdot \frac{Z55}{Z54} \rightarrow$$

$$\rightarrow n_{Z55} = \left( n_{Z41} \cdot \left( \cos \beta + \frac{Z54}{Z55} \right) - n_{Z54} \right) \cdot \frac{Z54}{Z55} = \left( n_{Z41} \cdot (\cos 90^\circ + 1) - n_{Z54} \right) \cdot 1; (1.1)$$

$$n_{Z55} = n_{Z41} - n_{Z54}.$$

На рисунку 1.7 представлено графічні залежності кутового переміщення та кутових швидкостей ланок за максимальних швидкостей Z41; Z54, що дорівнюють 360 °/с або 60 об/хв.

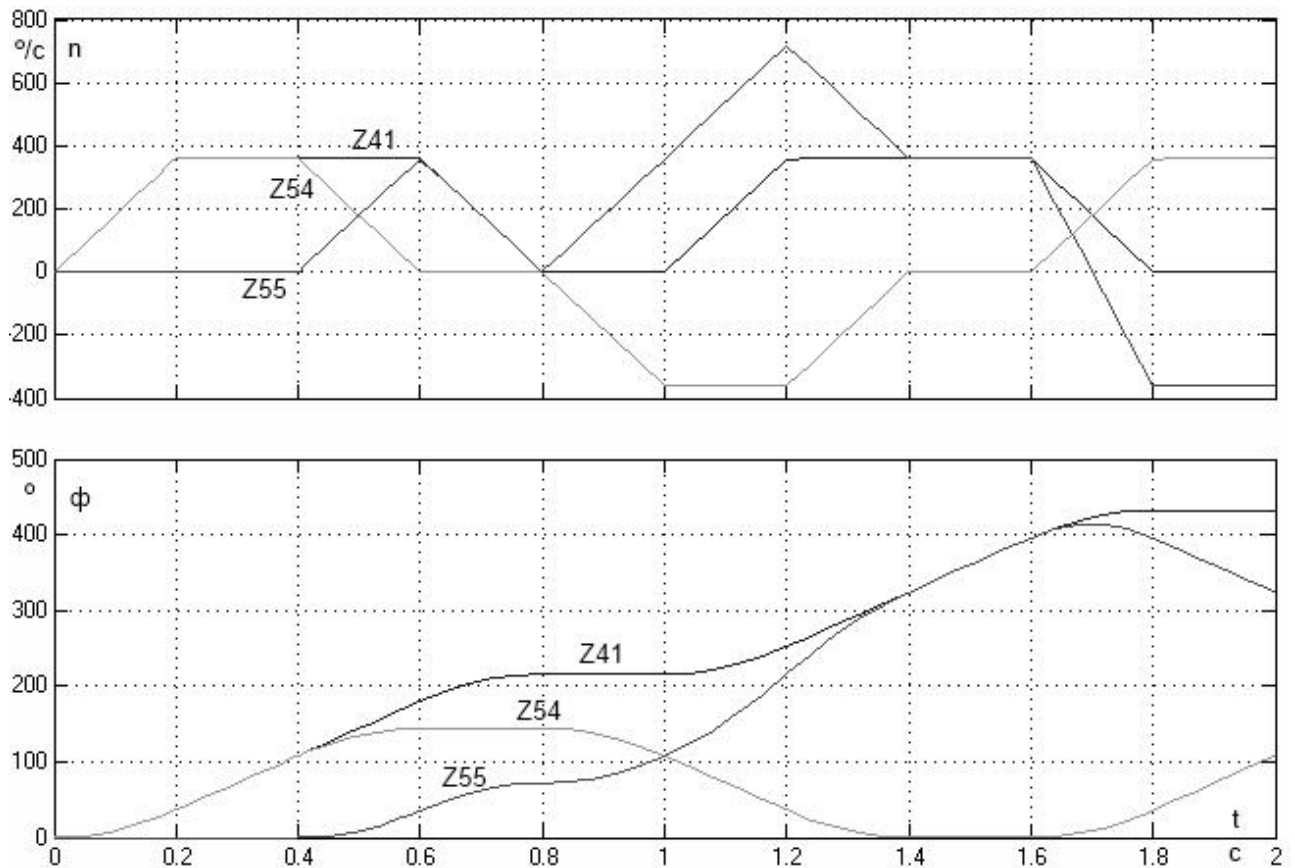


Рисунок 1.7 – Графічні залежності кутового переміщення та кутової швидкості ланок Z41; Z55 та Z54

Таким чином, максимальна кутова швидкість, яку має забезпечувати електропривід осі A5:

$$\omega_{DA5} = |\omega_{\max Z55}| \cdot i_{pA5}; \quad (1.2)$$

$$\omega_{DA5} = 120 \cdot 40 = 480 \text{ об/хв.}$$

На швидкість шестерні Z61 мають вплив швидкості шестерень Z41, Z62 та Z51. Наприклад, у разі скомпенсованої взаємодії осей A5 та A4, унаслідок якої вісь A5 нерухома, а вісь A4 обертається зі швидкістю 60 об/хв, вісь A6 буде обертатися через вплив осі A4. Цей взаємовплив описується наступним рівнянням:

$$\begin{aligned}
 n_{Z61} &= n_{Z41} + n_{Z51} - n_{Z62} = n_{Z41} + (n_{Z41} - n_{Z51}) - n_{Z62} \rightarrow \\
 \rightarrow n_{Z62} &= 2 \cdot n_{Z41} - n_{Z51} - n_{Z61}.
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

Максимальна швидкість електродвигуна осі А6 відповідно до (1.2):

$$\omega_{дА6} = 280 \cdot 15 = 4200 \text{ об/хв.}$$

#### 1.4 Висновки до першого розділу

Виконано аналітичний огляд існуючих конструкцій сучасних рук-маніпуляторів ПР. Встановлено оптимальну КС універсального ПР. Запропоновано необхідні вимоги до механізму, зібрано необхідний матеріал для зворотного інжинірингу, спроектовано трансмісію руки-маніпулятора ПР. Визначено параметри, необхідні для вибору електроприводу. Враховано кінематичні взаємодії ланок руки-маніпулятора ПР.

					<i>КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		16

## 2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ РУКИ-МАНІПУЛЯТОРА ПР

### 2.1 Розробка системи електропривода руки-маніпулятора ПР

#### 2.1.1 Вимоги до електроприводу руки-маніпулятора ПР

Основні вимоги до електроприводу:

- для зниження кінематичних зусиль під час переміщень необхідне обмеження прискорення робочого органу -  $\varepsilon \leq 52,36 \text{ рад/с}^2$  ;
- час запуску не більше 0,2 с ;
- діапазон регулювання швидкості  $D$  повинен складати 50:1 для забезпечення точної зупинки електроприводу;
- допустиме зниження напруги живлення не повинне перевищувати 10% ;
- точність стеження робочого органу -  $\Delta\varphi \leq 18'' (0,005^\circ)$  .

#### 2.1.2 Вибір типу електродвигуна для електроприводу руки-маніпулятора ПР

В електроприводі ПР із вантажопідйомністю від 5 кг та вище, зазвичай, використовуються синхронні двигуни зі збудженням від постійних магнітів (СДПМ), розглянемо переваги даного типу електродвигунів [18], з огляду на те, що СДПМ може бути залежно від форми ЕРС обертання як машиною змінного струму, так і постійного (БДПТ або ВД):

- велика перевантажувальна здатність за моментом (короткочасно допустимий момент та, відповідно, струм СДПМ можуть перевищувати номінальні значення в 5 та більше разів);

- безконтактність та відсутність вузлів, що потребують обслуговування. Відсутність у СДПМ ковзних електричних контактів істотно підвищує їх ресурс та, відповідно, надійність, якщо порівнювати із електричними машинами постійного струму або асинхронними двигунами з фазним ротором, а також

									Арк.
									17
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ				

розширює діапазон можливих частот обертання. Обмотку якоря ВД можна живити вищою номінальною напругою, тому конструктивна постійна моменту  $C_m$  значно перевищує аналогічну постійну класичних машин постійного струму, що дає змогу використовувати під час під'єднання кабелі меншого поперечного перерізу та перетворювачі електричної енергії на нижчі струми;

- достатньо висока швидкодія при перехідних процесах за моментом;

- абсолютно жорстка механічна характеристика та практично необмежений діапазон регулювання частоти обертання (1:10000 та вище). Можливість регулювання частоти обертання як вниз відносно номінальної (зі сталістю тривало допустимого і максимального моментів), так і вгору (зі сталістю потужності);

- мінімальні струми при холостому ході;

- найкращі енергетичні показники (тобто ККД та коефіцієнт потужності).

ККД СДПМ перевищує 90% та має незначні відхилення від номінального під час варіацій навантаження, тоді як у серійних асинхронних двигунів потужністю до 10 кВт максимальний ККД становить не більше ніж 87,5% та суттєво залежить від моменту на валу. Так, уже при половинному навантаженні на валу він може впасти до рівня 60...70%.

- мінімальні масо-габаритні показники при інших рівних умовах. Оскільки основні електричні та магнітні втрати в роторі СДПМ відсутні, а сучасні рідкісноземельні постійні магніти, наприклад, на базі «неодим-залізо-бор» здатні забезпечити максимальну індукцію в повітряному зазорі навіть без концентрації потоку на рівні асинхронних машин (до 0,8 Тл), у СДПМ може бути значно збільшене лінійне навантаження при збереженні сумарних втрат у машині на постійному рівні, що й пояснює більш високу електромеханічну ефективність ВД якщо порівняти із іншими типами безконтактних електродвигунів змінного струму.

СД із синусоїдальною формою ЕРС обертання та, звичайно, із синусоїдально розподіленими по розточці статора трифазними обмотками якоря

									Арк.
									18
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ				

складніші у виготовленні, мають значні лобові частини обмоток і потребують, таким чином, більшої витрати міді. Однак вони перевершують БДПТ (що відрізняються від СДПМ тільки трапецеїдальною формою ЕРС обертання та, відповідно, розподілом обмотки) за масо-габаритними показниками, забезпечують мінімально можливу пульсацію обертового моменту і тому використовуються в глибоко регульованих і прецизійних системах електроприводу [18]. Саме цей тип СДПМ і буде використовуватись далі.

### 2.1.3 Розрахунок потужності та вибір електродвигунів [18].

Оскільки обертання робочих органів у просторі залежить від обертання кожної із осей руки-маніпулятора ПР, то можливий варіант, коли рух центру тяжіння вантажу буде завжди протидіяти силі тяжіння, саме з такого випадку і будемо виконувати розрахунок статичних моментів.

Статичні моменти на осях А6-А4:

$$M_{c6} = g \cdot m_{ep} \cdot L_{цм6} \cdot (1 + k_{mp}); \quad (2.1)$$

$$M_{c6} = 9,81 \cdot 15 \cdot 0,1 \cdot (1 + 0,08) = 15,89 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{c5} = g \cdot (m_{ep} + m_{po5}) \cdot L_{цм5} \cdot (1 + k_{mp}); \quad (2.2)$$

$$M_{c5} = 9,81 \cdot (15 + 2,3) \cdot 0,24 \cdot (1 + 0,08) = 43,98 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{c4} = g \cdot (m_{ep} + m_{po5} + m_{po4}) \cdot L_{цм4} \cdot (1 + k_{mp}); \quad (2.3)$$

$$M_{c4} = 9,81 \cdot (15 + 2,3 + 10,24) \cdot 0,177 \cdot (1 + 0,08) = 51,64 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Вкажемо параметри для наведеної тахограми (рис. 2.1), що враховує найбільш навантажені технологічні процеси:

- час запуску:  $t_z = 0,2$  с ;
- час циклу:  $t_u = 60$  с ;
- час роботи електродвигуна:  $t_p = t_u \cdot ПВ = 60 \cdot 0,8 = 48$  с ;
- час роботи на сталій швидкості:  $t_y = t_p - 4 \cdot t_n = 48 - 4 \cdot 0,2 = 47,2$  с .

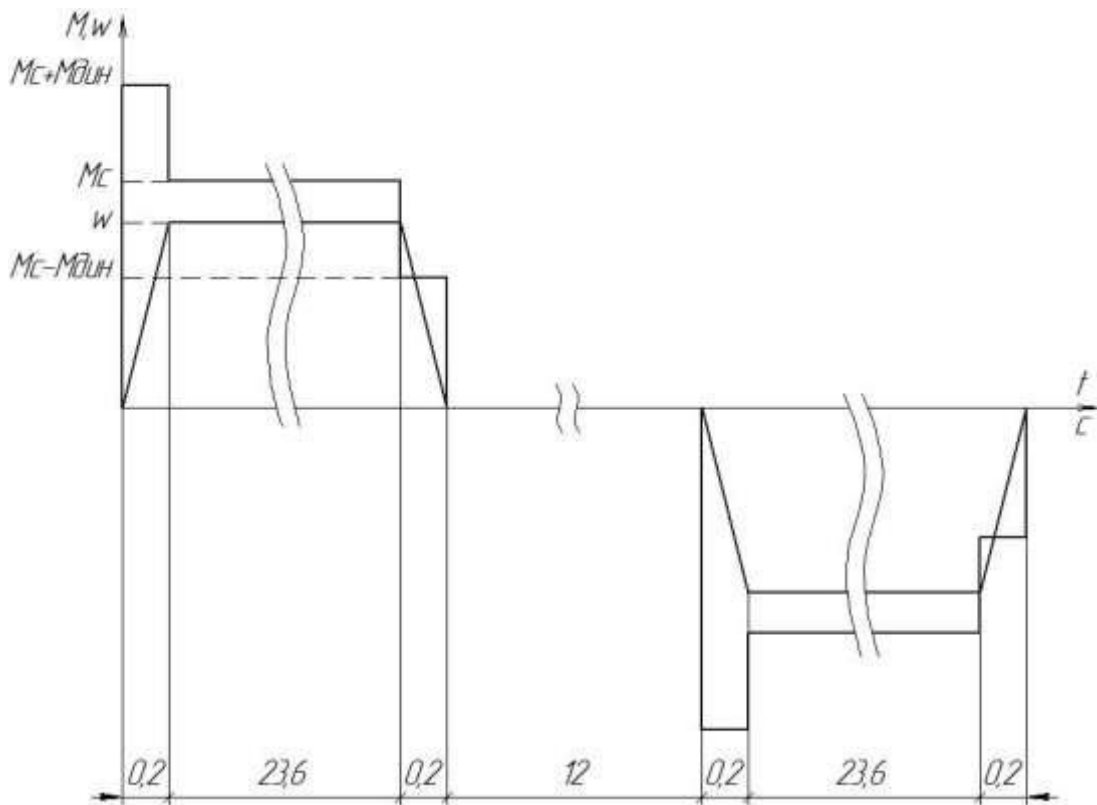


Рисунок 2.1 - Навантажувальна діаграма та наведена тахограма електропривода осі руки-маніпулятора ПР

Кутові прискорення для осей А4-А6:

$$\varepsilon_6 = \frac{\omega_6}{t_p}; \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_5 = \varepsilon_4 = \frac{\omega_5}{t_p}; \quad (2.5)$$

$$\omega_6 = 600 \cdot \frac{\pi}{180} = 10,47 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_5 = \omega_4 = 360 \cdot \frac{\pi}{180} = 6,28 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\varepsilon_6 = \frac{10,47}{0,2} = 52,36 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2};$$

$$\varepsilon_5 = \varepsilon_4 = \frac{6,28}{0,2} = 31,41 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Динамічні моменти та моменти інерції на осях А4-А6:

$$J_6 = m_{zp} \cdot L_{цм6}^2; \quad (2.6)$$

$$J_6 = 15 \cdot 0,1^2 = 0,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$M_{дин6} = J_6 \cdot \varepsilon_6; \quad (2.7)$$

$$M_{дин6} = 0,15 \cdot 52,36 = 7,86 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$J_5 = (m_{zp} + m_{pо5}) \cdot L_{цм5}^2; \quad (2.8)$$

$$J_5 = (15 + 2,3) \cdot 0,24^2 = 0,996 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Згідно із (2.7) знайдемо динамічний момент для осі А5:

$$M_{дин5} = 0,996 \cdot 52,36 = 27,11 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$J_4 = (m_{zp} + m_{po5} + m_{po4}) \cdot L_{цм4}^2; \quad (2.9)$$

$$J_4 = (15 + 2,3 + 10,24) \cdot 0,177^2 = 0,863 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$M_{дин4} = 0,863 \cdot 52,36 = 31,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Розрахуємо еквівалентні моменти:

$$M_{екв6} = \sqrt{\frac{[(M_{c6} + M_{дин6})^2 + (M_{c6} - M_{дин6})^2] \cdot 4 \cdot t_n + M_{c6}^2 \cdot t_y}{t_p}}; \quad (2.10)$$

$$M_{екв6} = \sqrt{\frac{[(15,89 + 7,86)^2 + (15,89 - 7,86)^2] \cdot 4 \cdot 0,2 + 15,89^2 \cdot 47,2}{48}} = 16,08 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{екв5} = \sqrt{\frac{[(43,98 + 27,11)^2 + (43,98 - 27,11)^2] \cdot 4 \cdot 0,2 + 43,98^2 \cdot 47,2}{48}} = 44,89 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{екв4} = \sqrt{\frac{[(51,64 + 31,3)^2 + (51,64 - 31,3)^2] \cdot 4 \cdot 0,2 + 51,64^2 \cdot 47,2}{48}} = 52,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Розрахуємо еквівалентні моменти до валів електродвигунів з урахуванням ПВ:

$$M_{еквд6} = \frac{M_{екв6}}{i_{p6}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_д}}; \quad (2.11)$$

$$M_{екв\delta 6} = \frac{16,08}{15} \cdot \sqrt{\frac{80}{100}} = 0,96 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{екв\delta 5} = \frac{44,89}{40} \cdot \sqrt{\frac{80}{100}} = 1,0 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{екв\delta 4} = \frac{52,3}{50} \cdot \sqrt{\frac{80}{100}} = 0,92 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Розрахуємо ККД каналів передач, враховуючи кінематичні взаємовпливи:

$$\eta_{nA6} = \eta_{зуб}^4 \cdot \eta_{PA6}, \quad (2.12)$$

де  $\eta_{зуб} = 0,99$  - ККД однієї зубчастої передачі відповідного класу точності, враховуючи втрати в парі підшипників;  $\eta_{PA6} = 0,97, \eta_{PA5} = \eta_{PA4} = 0,95$  - ККД одноступеневого та двоступеневих планетарних редукторів передавальних каналів осей А6, А5 та А4 відповідно.

$$\eta_{nA6} = 0,99^4 \cdot 0,97 = 0,932;$$

$$\eta_{nA5} = 0,99^5 \cdot 0,95 = 0,903;$$

$$\eta_{nA4} = 0,99^8 \cdot 0,95 = 0,877.$$

Розрахуємо необхідну потужність електродвигунів:

$$P_{розр} = \frac{M_{екв\delta} \cdot \omega \cdot i_p}{\eta_{nA}}; \quad (2.13)$$

$$P_{розр6} = \frac{0,96 \cdot 10,47 \cdot 15}{0,932} = 161,7 \text{ Вт};$$

					<i>КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		23

$$P_{розр5} = \frac{1 \cdot 6,28 \cdot 40}{0,903} = 279,2 \text{ Вт};$$

$$P_{розр4} = \frac{0,92 \cdot 6,28 \cdot 40}{0,877} = 331 \text{ Вт}.$$

Знайдемо максимальні кутові швидкості електродвигунів, враховуючи кінематичні взаємовпливи:

$$\omega_{дв6 \max} = 345,58 \frac{\text{рад}}{\text{с}} = 4200 \frac{\text{об}}{\text{хв}};$$

$$\omega_{дв5 \max} = 418,88 \frac{\text{рад}}{\text{с}} = 4800 \frac{\text{об}}{\text{хв}};$$

$$\omega_{дв4 \max} = 314,16 \frac{\text{рад}}{\text{с}} = 3000 \frac{\text{об}}{\text{хв}}.$$

Розрахованим моментам та потужностям відповідають СДПМ із номінальною швидкістю 3000 об/хв, але з огляду на те, що кутові швидкості електродвигунів осей А6 та А5 досягають вищих значень, варто вказати, що для них визначальним параметром під час вибору є не номінальна кутова швидкість, а саме максимальна. При цьому буде спостерігатися падіння моменту при перевищенні номінальної кутової швидкості (рис. 2.2). Однак у цьому разі такі кутові швидкості досягаються в руці-маніпуляторі ПР тільки в разі кінематичного взаємовпливу, і збільшення кутової швидкості, своєю чергою, редукує момент, тобто передавальне відношення каналу осі варіативне і залежить від співвідношення кутових швидкостей. На валах електродвигунів осей А6 та А5 моменти за кінематичного взаємовпливу на максимальних

кутових швидкостях будуть більш ніж удвічі нижчими, ніж моменти без кінематичної взаємодії:

$$M_{\text{взаємод}A6} = \frac{M_{\text{екв}6}}{\frac{n_{A4} + n_{A5} - n_{A6}}{n_{A6}}} = \frac{M_{\text{екв}6}}{\frac{n_{\text{ДА}6}}{n_{A6}}} \Bigg|_{\frac{n_{\text{ДА}6}=\max}{n_{A6}}} = \frac{M_{\text{екв}6}}{\frac{280}{100}}; \quad (2.14)$$

$$M_{\text{взаємод}A6} = \frac{0,96}{2,8} = 0,34 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{взаємод}A5} = \frac{M_{\text{екв}5}}{\frac{n_{A4} - n_{A5}}{n_{A5}}} = \frac{M_{\text{екв}5}}{\frac{n_{\text{ДА}5}}{n_{A5}}} \Bigg|_{\frac{n_{\text{ДА}5}=\max}{n_{A5}}} = \frac{M_{\text{екв}5}}{\frac{120}{60}}; \quad (2.15)$$

$$M_{\text{взаємод}A5} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Таким чином робота електродвигунів А6 та А5 на підвищених кутових швидкостях не виходить за межі їхньої перевантажувальної здатності (рис. 2.2).

Умови вибору електродвигунів:

$$P_{\text{розр}} \leq P_H; \omega_{\text{дв}} \leq \omega_{\text{max}}; M_{\text{екв}} \leq M_H.$$

Обираємо 3 електродвигуни ASMT04250LBK із вбудованими гальмом та енкодером із роздільною здатністю 2500 імп/об:

- електрична потужність  $P_{\text{ном}} = 400 \text{ Вт}$ ;



Рисунок 2.2 – Механічна характеристика серводвигунів із низькою інерцією ротора [18]

- номінальна частота обертання  $n_{ном} = 3000$  об/хв;
- максимальна частота обертання  $n_{max} = 5000$  об/хв;
- номінальна сила струму  $i_{ном} = 3,3$  А;
- максимальна сила струму  $i_{max} = 9,3$  А;
- номінальний момент  $M_{ном} = 1,27$  Н·м;
- максимальний допустимий момент  $M_{max} = 3,82$  Н·м;
- момент інерції ротора  $J_p = 0,34 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>;
- опір  $R = 3,1$  Ом;
- індуктивність  $L = 11 \cdot 10^{-3}$  Гн;
- постійна напруги  $KE = 41,6$  В /1000 об;
- постійна моменту  $KT = 0,4$  Н·м/А;
- кількість фаз 3.

#### 2.1.4 Огляд можливих варіантів електроприводу

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ

Арк.

26

Дві найбільш підходящі системи керування для СДПМ із синусоїдальною формою ЕРС обертання - це векторне керування (ВК) та пряме керування моментом (ПКМ). Такі системи були створені в 70-80-х рр. минулого століття. Обидві системи контролюють магнітний потік та, відповідно, момент для точного відпрацювання заданої траєкторії руху, незважаючи на зміну параметрів електродвигуна та навантаження за різних впливів збурення [18].

Силова схема для цих двох систем є однаковою та представляє з себе дволанковий перетворювач частоти із некерованим випрямлячем (НВ) та автономним інвертором напруги (АІН) (рис. 2.3) [18].

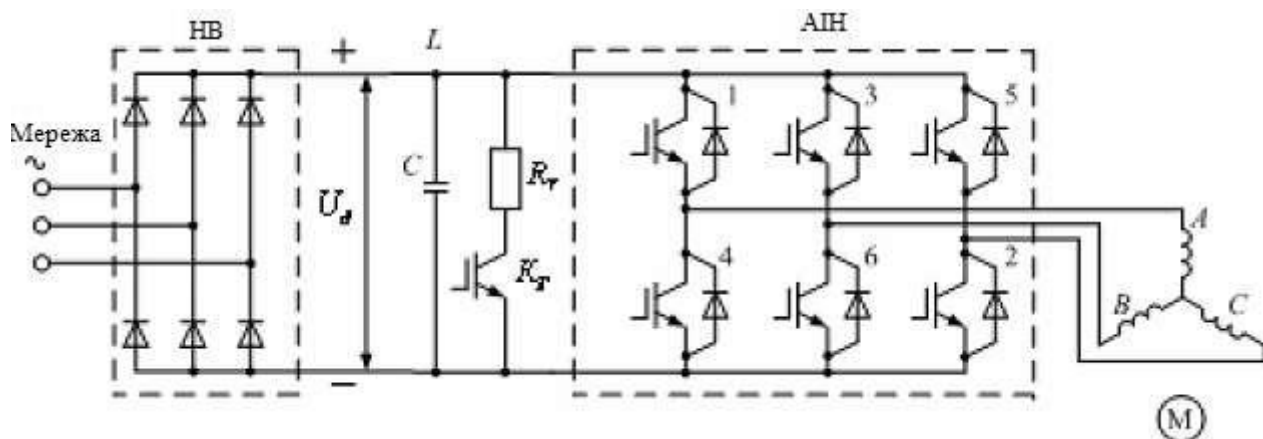


Рисунок 2.3 – Структурна схема силової частини системи керування

Керуючий вплив на вихідні змінні трифазного інвертора напруги - середні за період ШІМ значення фазних струмів та напруги електродвигуна - формують в обертовій декартовій системі координат  $(d,q)$ , вісь абсцис якої  $(d)$  направлена вздовж напрямку поздовжньої осі ротора СДПМ або, в деяких випадках, за вздовж напрямку вектору магнітного поля в повітряному зазорі електродвигуна. Значення струму якоря СДПМ за поперечною віссю  $q$ , пропорційне електромагнітному моменту (це твердження суворо виконується для неявнополюсних машин із однаковими індуктивностями обмотки якоря за поздовжньою та поперечною осями), задають аналогічно струму якоря класичної МПС, зазвичай, з виходу регулятора швидкості. Таким чином, у таких системах керування також використовується загальновідомий принцип підлеглого

регулювання координат. Значення струму якоря за поздовжньою віссю  $d$ , що аналогічно струму збудження МПС, та в свою чергу, надає змогу виконати оптимізацію процесу електромеханічного перетворення енергії та виконувати регулювання частоти обертання СДПМ вище за основну зі сталістю потужності (у другій зоні) [18].

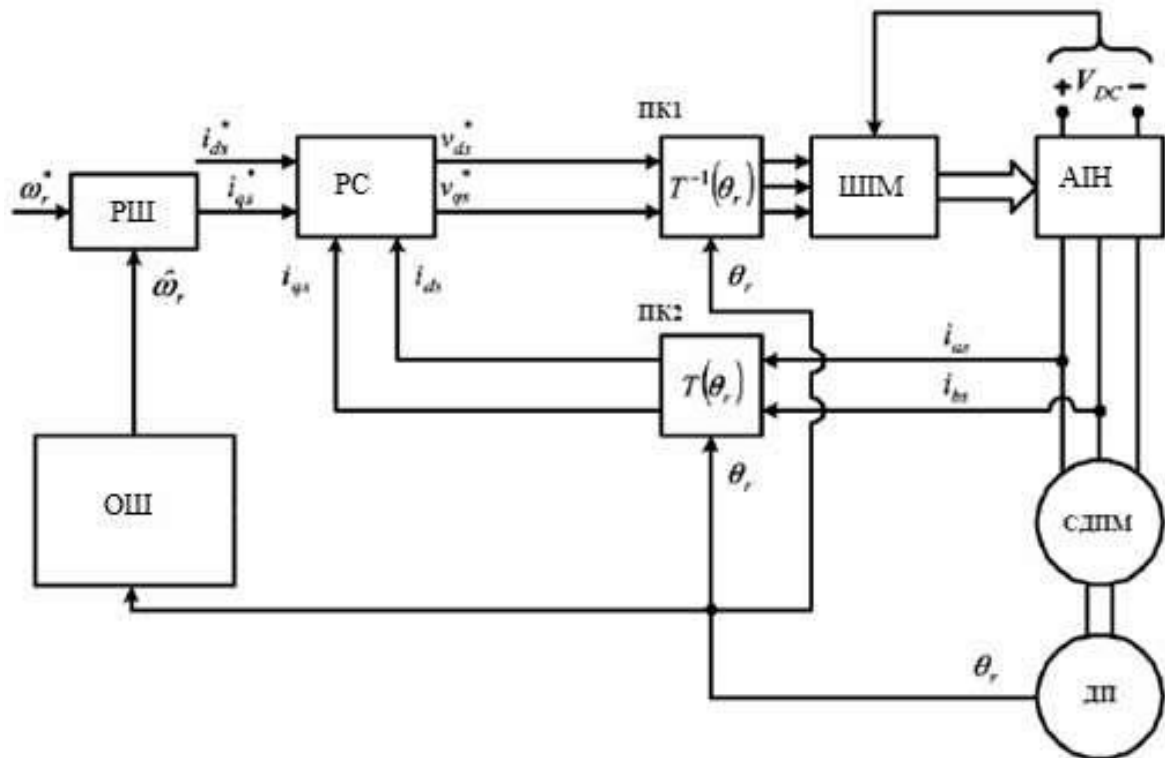


Рисунок 2.4 - Функціональна схема керування СДПМ змінного струму із безпосередньою орієнтацією оберткової системи координат за положенням ротора електродвигуна

Як приклад на рисунку 2.4 представлено збільшену функціональну схему системи керування СДПМ змінного струму із безпосередньою орієнтацією оберткової системи координат за положенням ротора електродвигуна. На рисунку: РШ та РС - відповідно регулятори швидкості та струмів електродвигуна; ОШ - обчислювач швидкості; ПК1 та ПК2 - перетворювачі координат; ДП - датчик положення ротора. Джерело уставки за струмом  $i_{sd}$  на рисунку не наведено. У даній системі можуть бути досягнуті максимальні

діапазони регулювання частоти обертання (до  $10^5$ ) та найвища швидкість, яка характеризується смугою пропускання частот контуру регулювання швидкості, що становить до 500 Гц. Час реакції моменту електродвигуна на стрибок завдання струму  $i_{sq}$  може становити  $10^{-5} \dots 10^{-4}$  с [18].

Пряме керування моментом ПУМ також є векторним керуванням, але вибір вектору напруги ведеться за заздалегідь вказаною таблицею значень. Цей принцип може бути реалізовано за допомогою гістерезисних регулювальників потокозчеплення статора та моменту [18].

Ми будемо використовувати принцип векторного частотно-струмового регулювання з непрямою орієнтацією за полем. Детальний опис такої системи наведемо нижче.

### 2.1.5 Розрахунок та вибір основних елементів силової схеми

Оскільки привід руки-маніпулятора ПР буде містити три однакові електродвигуни, то відповідно, і перетворювачі частоти будуть ідентичні.

- розрахунок інвертору:

Максимальний струм, що проходить через ключі інвертору:

$$I_{cmax} = \sqrt{2} \cdot I_{max} \cdot k_1, \quad (2.16)$$

де  $k_1 = 1,2$  - коефіцієнт допустимої миттєвої пульсації струму.

$$I_{cmax} = \sqrt{2} \cdot 9,3 \cdot 1,2 = 15,78 \text{ А.}$$

Транзистори IGBT вибираємо за наступною умовою:  $I_c \geq I_{cmax}$ .

Вибираємо транзистор IRG4BC20FD [19], що володіє наступними параметрами:

- робочий струм (при C):  $I_c = 16 \text{ А}$ ;

- клас за напругою:  $U_{CE} = 600 \text{ В}$ ;

- керувальна напруга:  $U_{GE} = 6 \text{ В}$ .

Транзистор виготовляється в корпусі із зустрічно-паралельним діодом.

- розрахунок випрямляча:

Середня випрямлена напруга відповідно до [18]:

$$U_d = 1,35 \cdot U_n; \quad (2.17)$$

$$U_d = 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ В}.$$

Максимальне значення середнього випрямленого струму:

$$I_d = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{I_{c\max}}{\sqrt{2}} \cdot U_n \cdot \cos \varphi + N \cdot P_T}{U_d}, \quad (2.18)$$

де  $N = 6$  - кількість пар IGBT/FWD в інверторі;  $P_T = 1,1 \text{ Вт}$  - втрати в інверторі на парі зворотний діод-транзистор.

$$I_d = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{15,78}{\sqrt{2}} \cdot 380 \cdot 0,9 + 6 \cdot 1,1}{513} = 12,9 \text{ А}.$$

Максимальний робочий струм діода:

$$I_{vm} = k_{cc} \cdot I_d, \quad (2.19)$$

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

$$I_{vm} = 1,045 \cdot 12,9 = 13,48 \text{ A.}$$

Максимальна зворотна напруга вентиля:

$$U_{vm} = k_{zn} \cdot \sqrt{2} \cdot U_d + \Delta U_n, \quad (2.20)$$

де  $k_{zn} = 1,2$  - коефіцієнт запасу за напругою;  $\Delta U_n = 120 \text{ В}$  - запас на комутаційні викиди напруги в ланці постійного струму.

$$U_{vm} = 1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 513 + 120 = 990,6 \text{ В.}$$

Діоди вибираються за постійним робочим струмом і за класом напруги:

Вибираємо діод Д-112-16-16, що має наступні параметри:

- максимальний прямий струм:  $I_{np \max} = 16 \text{ A}$ ;

- повторювана постійна зворотна напруга:  $U_{звор \max} = 1200 \text{ В}$ .

Оберемо необхідний фільтр:

$$C_\Phi = \frac{P_H}{6 \cdot U_{\Phi n} \cdot f \cdot \Delta U}; \quad (2.21)$$

$$C_\Phi = \frac{400}{6 \cdot 220 \cdot 50 \cdot 2} \approx 3000 \text{ мкФ.}$$

Вибираємо два конденсатори К50-35 імп. 6800 мкФ х 400 В 85°С, серія КР:

- номінальна ємність:  $C_H = 6800 \text{ мкФ С}$ ;

					<i>КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ</i>	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- номінальна напруга:  $U_H = 400$  В.

Встановлюємо конденсатори послідовно.

## 2.2 Розробка системи керування електроприводом руки-маніпулятора ПР

### 2.2.1 Математичний опис СДПМ

Рівняння синхронної магнітоелектричної машини в осях  $dq$ :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \cdot \omega \cdot i_q \\ \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \cdot \omega \cdot i_d - \frac{\psi \cdot p \cdot \omega}{L_q} \\ M_e = 1,5 \cdot p \cdot (\psi \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q) \\ \frac{d}{dt} \omega = \frac{1}{J} (M_m - F \cdot \omega - M_e) \end{cases} \quad (2.22)$$

де  $i_d, i_q$  - проекції струму статора на осях  $d$  та  $q$ , відповідно, А;  $u_d, u_q$  - проекції напруги, що підводиться до статора на осях  $d$  та  $q$ , відповідно, В;  $L_d, L_q$  - індуктивності синхронної машини по поздовжній та поперечній осі, Гн;  $R$  - активний опір фази статора, Ом;  $\omega$  - частота обертання ротора, рад/с;  $p$  - число пар полюсів;  $\psi$  - потокозчеплення фази статора, Вб;  $M_m$  - механічний момент приводу, Н\*м;  $F$  - коефіцієнт, що враховує тертя в підшипниках електричної машини, Н\*м\*с;  $M_e$  - електромагнітний момент електричної машини, Н\*м;  $J$  - момент інерції електричної машини.

### 2.2.2 Розробка функціональної схеми електроприводу руки-маніпулятора ПР

У результаті аналізу математичного опису синхронної магнітоелектричної машини та методів керування СДПМ, можна дійти висновку, що принципівих

відмінностей порівняно з векторним керуванням АД немає, особливістю є лише постійне поле ротора та синхронізм обертання в усталеному режимі. У зв'язку з цим твердженням за основу керування СДПМ у ми приймаємо схема регулювання швидкості АД із частотно-струмовим векторним керуванням із непрямю орієнтацією за полем та регуляторами струмів, виконаними в нерухомій системі координат [20] (рис. 2.5).

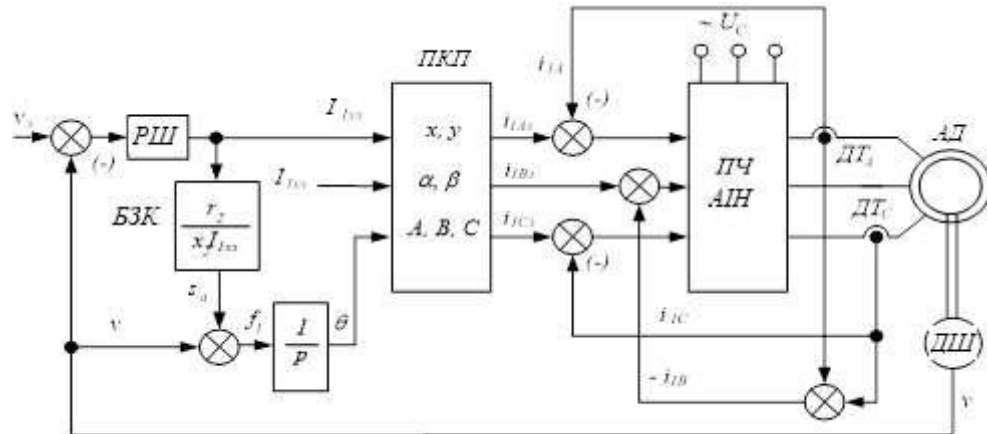


Рисунок 2.5 - Функціональна схема регулювання швидкості АД

Керування струмом  $I_{1x3}$  за допомогою регулятора швидкості РШ за  $I_{1x3} = \text{const}$  еквівалентно керуванню моментом електродвигуна. При цьому вектор потокозчеплення ротора АД  $\bar{\Psi}_2$  при умові  $I_{1x3} = \text{const}$  залишатиметься нерухомим у координатних осях, які обертаються із частотою  $f_1 = v + s_a$ , що формується як сума сигналів з давача швидкості ДШ та заданого ковзання із виходу блоку задавання ковзання БЗК. Блок ПКП виконує пряме перетворення координат. Сигнали з релейних регуляторів струмів надходять на ключі автономного інвертора напруги АІН перетворювача частоти ПЧ.

Функціональна схема регулювання положення СДПМ із частотно-струмовим векторним керуванням представлена на рис. 2.6. Розбіжність сигналу завдання положення ротора  $\varphi$  та сигналу з давача положення  $\Theta$  надходить на регулятор положення РП, який формує сигнал завдання швидкості для регулятора швидкості РШ, сигнал з якого формує завдання струму  $I_q$ , крім того,



### 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ РУКИ-МАНІПУЛЯТОРА ПРОМИСЛОВОГО РОБОТУ

3.1 Моделювання та аналіз системи електроприводу без урахування кінематичного взаємовпливу ланок руки-маніпулятора ПР

Для аналізу динамічних властивостей система електроприводу (рис. 2.2) була змодельована в програмному середовищі MATLAB R2009b [21]. Модель системи керування двигуном ASMT04250LBK осі A4 наведено на рисунку 3.3.

Блок РКР (рис.4.1) буде здійснювати пряме перетворення координат, тобто перехід від системи координат, що обертається із частотою  $f_1$ , до нерухомої за наступним співвідношеннями:

$$\begin{cases} i_\alpha = I_x \cos \theta - I_y \sin \theta; & i_\beta = I_x \sin \theta + I_y \cos \theta; \\ i_A = i_\alpha; & i_B = -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta; & i_C = -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta. \end{cases} \quad (3.1)$$

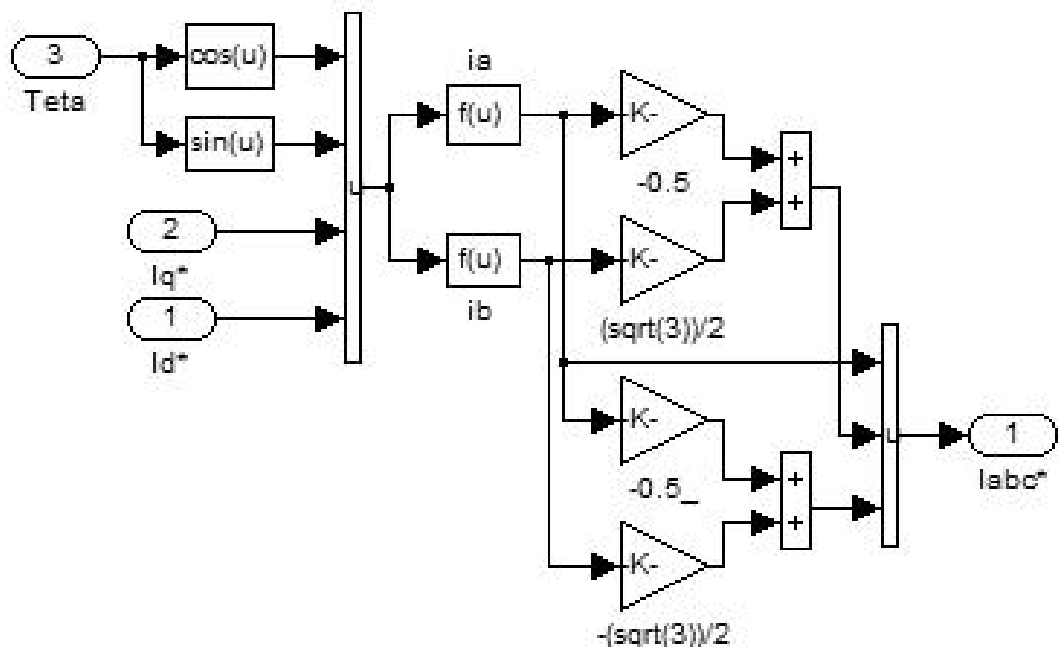
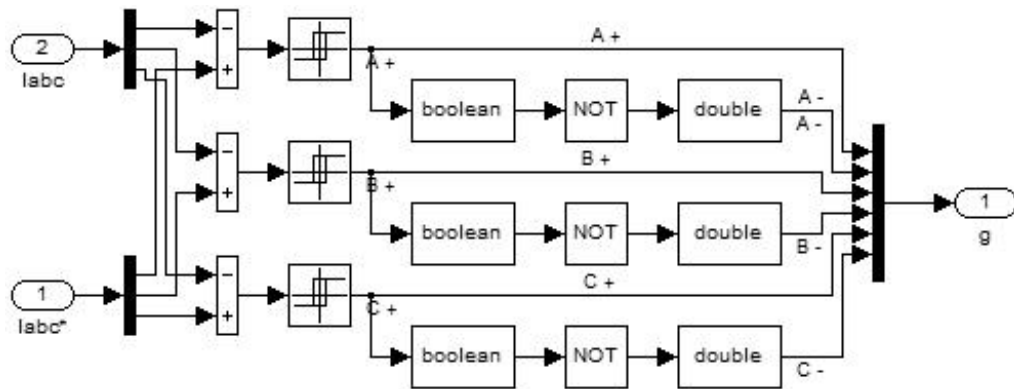


Рисунок 3.1 – Блок для прямого перетворення координат РКР

Наведемо структуру релейного регулятора струму типу RT4 на рисунку 3.2.



Рисунк 3.2 – Релейний регулятор струму типу RT4

#### Налаштування регулятора швидкості RS4

$$K_{RS4} = \frac{2 \cdot J_{\Sigma} \cdot k_{om}}{3 \cdot p_n \cdot \left(\frac{L_q}{L_d}\right) \cdot k_{oc} \cdot a_{\omega} \cdot a_i \cdot T_n}; \quad (3.2)$$

$$K_{RS4} = \frac{2 \cdot 0,379 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{3 \cdot 1 \cdot \left(\frac{0,011}{0,011}\right) \cdot 1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 0,63.$$

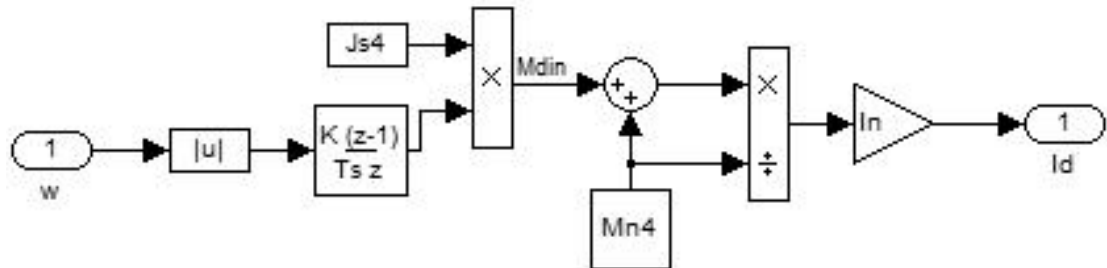
Налаштування регулятора положення RP4 та блоку завдання ковзання BZS, виконувалось ітеративно:

$$K_{RP4} = 1950; K_{BZS} = 100.$$

Блок Vid виконує обрахунок струму Id, який потрібний для забезпечення динаміки електроприводу. Обчислення струму завдання ґрунтується на рівності кратності моментів та відповідних струмів у динаміці СДПМ.



Структуру блока обрахунку та його параметри наведено на рисунку 3.4. За сигналом швидкості виконується обрахунок прискорення, потім виконується обрахунок динамічного моменту. Сума динамічного та статичного моментів буде ділитись на величину статичного моменту. Отримана кратність моментів буде помножена на номінальний струм, для визначення величини заданого струму.



а

Parameters	
Nominal current, In(A)	<input type="text" value="3.3"/>
Inertia, Js4(kgm2)	<input type="text" value="0.863/50+0.000034"/>
Static moment, Mn4(Nm)	<input type="text" value="0.92"/>

б

Рисунок 3.4 – Загальний вигляд блоку обрахунку струму (а) та введення необхідних параметрів (б)

Похибку стеження системи представлено на графічній залежності 3.5.

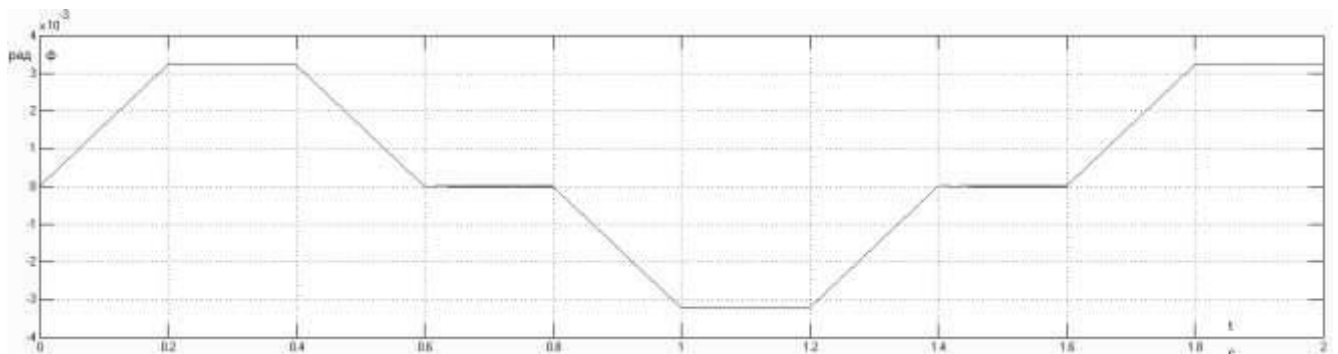


Рисунок 3.5 – Графічна залежність похибки стеження системи

З графічної залежності (рис.3.5) видно, що вихідна максимальна похибка стеження системи дорівнює  $3,25 \cdot 10^{-3}$  рад =  $0,186^\circ = 11'10'' = 18''$ , тобто не відповідає поставленим вимогам до точності стеження електроприводу, незважаючи на, як і раніше, високу точність позиціонування (близько десятитисячних градусів).

Для підвищення точності стеження, до сигналу завдання положення будемо додавати зміщення  $+\Delta\varphi$ . Це зміщення компенсує похибку неузгодженості в регуляторі положення, яка є необхідною для формування сигналу завдання регулятора швидкості. Таким чином, величина зміщення буде рівною вихідній помилці стеження  $\Delta\varphi$ . Початкова похибка стеження динамічно повторює форму швидкості (див. рис. 3.5) і в кожен момент часу є рівною відношенню миттєвої кутової швидкості осі до коефіцієнта регулятора положення:

$$\Delta\varphi = \frac{\omega_{A4}}{K_{RP}}. \quad (3.3)$$

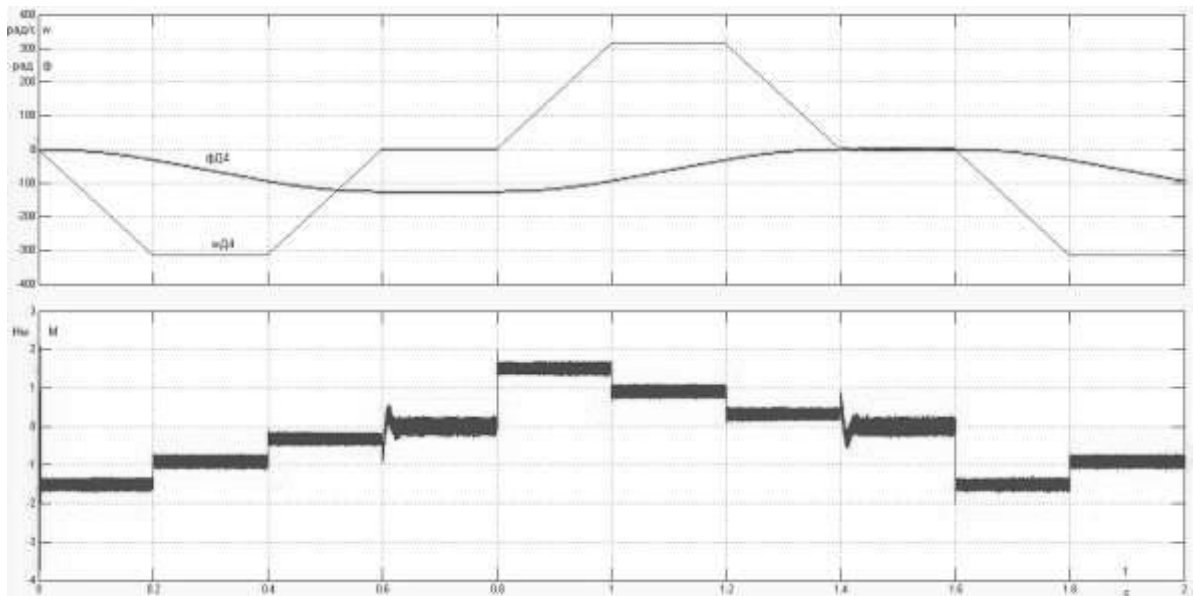
Зміщення  $+\Delta\varphi$ , що додається, повторює форму вихідної похибки, за винятком моменту при  $t=0$ , коли зміщення відсутнє взагалі, це потрібно для забезпечення необхідної динаміки електродвигуна. Налаштування блоку зміщення представлено на рисунку 3.6. На практиці ж зміщення розраховується паралельно із завданням траєкторії руху.

З формули (3.3) можна вирахувати граничну глибину регулювання швидкості для осі A4, до якої доцільно вводити зміщення:

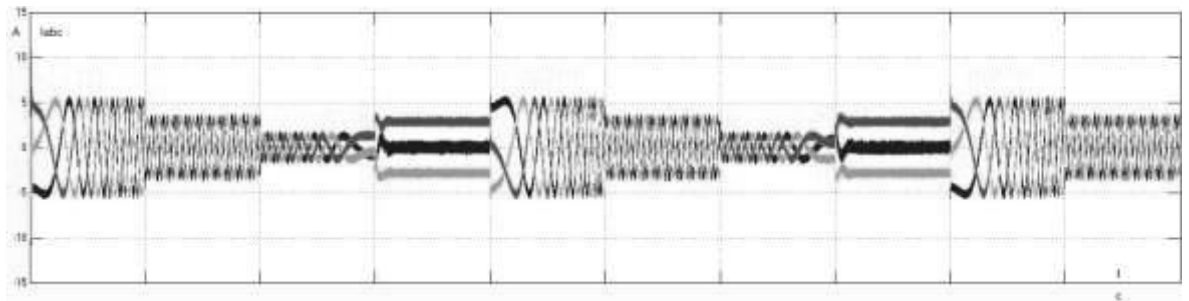
$$\omega_{A4\min} = K_{RP} \cdot \Delta\varphi_{\lim}; \quad (3.4)$$

$$\omega_{A4\min} = 1950 \cdot 8,72 \cdot 10^{-5} = 0,17 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \rightarrow \frac{6,283}{0,17} = 36,96$$

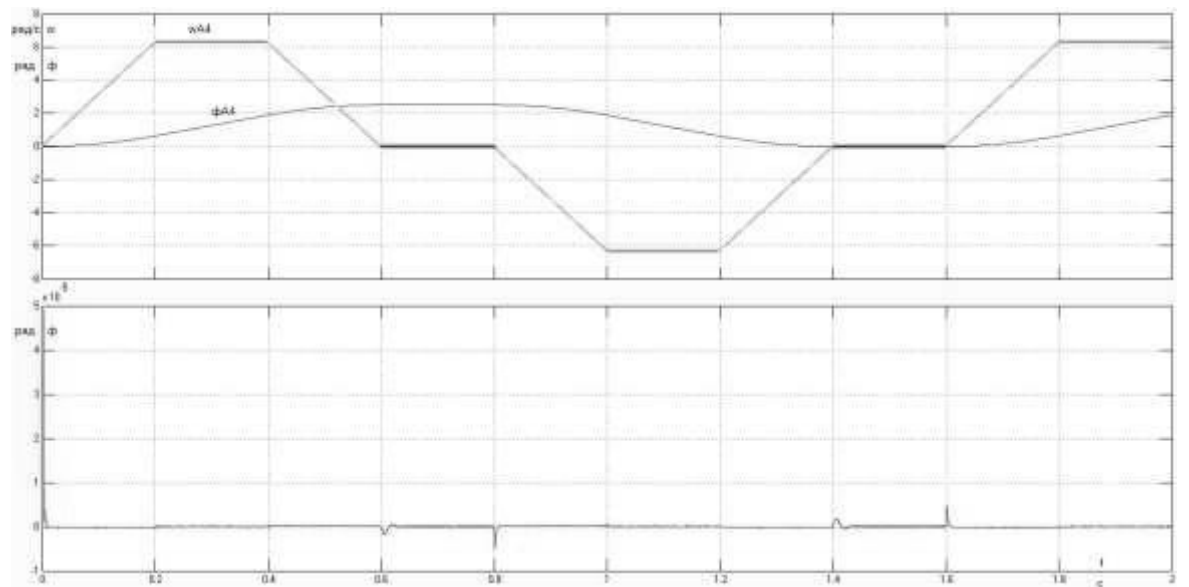




а



б



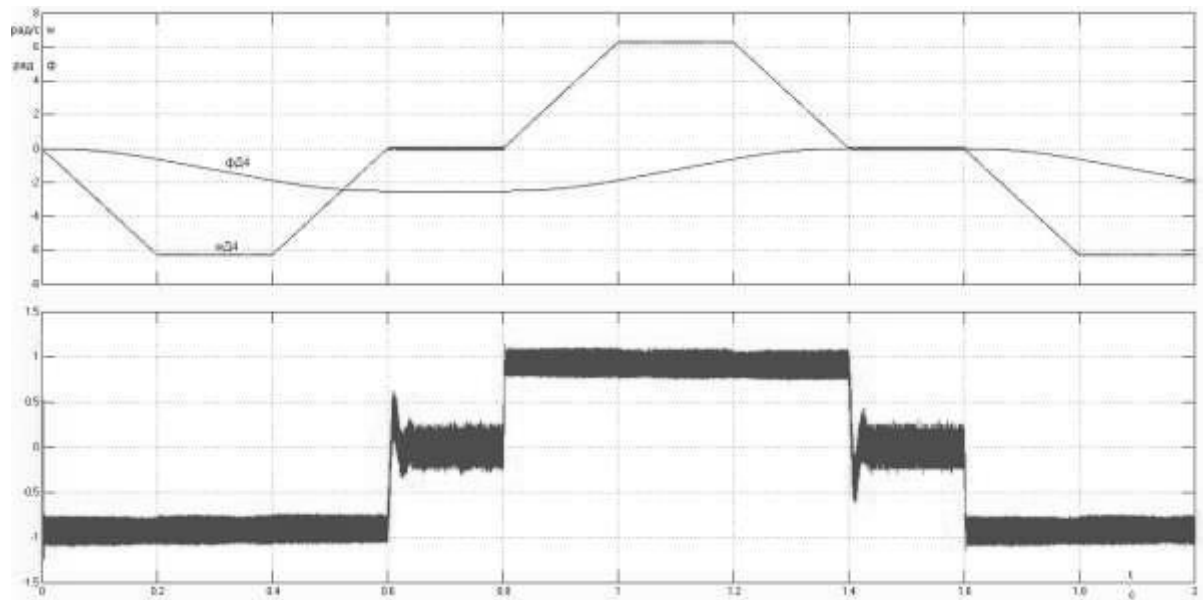
в

Рисунок 3.7 – Графічні залежності: а – швидкість та кутове переміщення валу двигуна; б – швидкість та кутове переміщення осі А4; в – похибка стеження осі А4

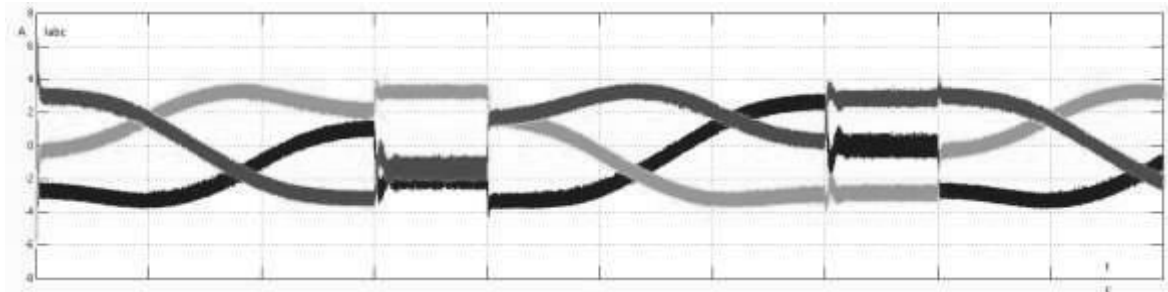
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ

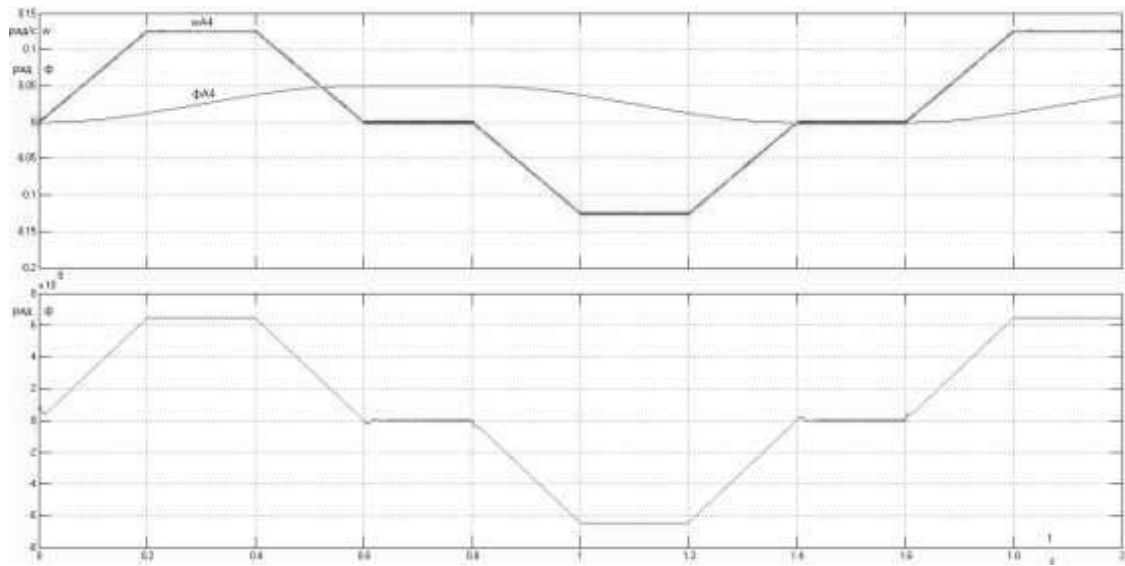
Арк.  
41



а



б



в

Рисунок 3.8 – Графічні залежності: а – швидкість та кутове переміщення валу двигуна; б – швидкість та кутове переміщення осі А4; в – похибка стеження осі А4

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ

Арк.  
42

### 3.2 Моделювання та аналіз системи електроприводу з урахуванням кінематичного взаємовпливу ланок руки-маніпулятора ПР

Кінематичний взаємовплив буде виконуватись за формулами, наведеними першому розділі. Систему керування електроприводом механічної руки, змодельовану в середовищі MATLAB R2009b, представлено на рисунку 3.9 [21].

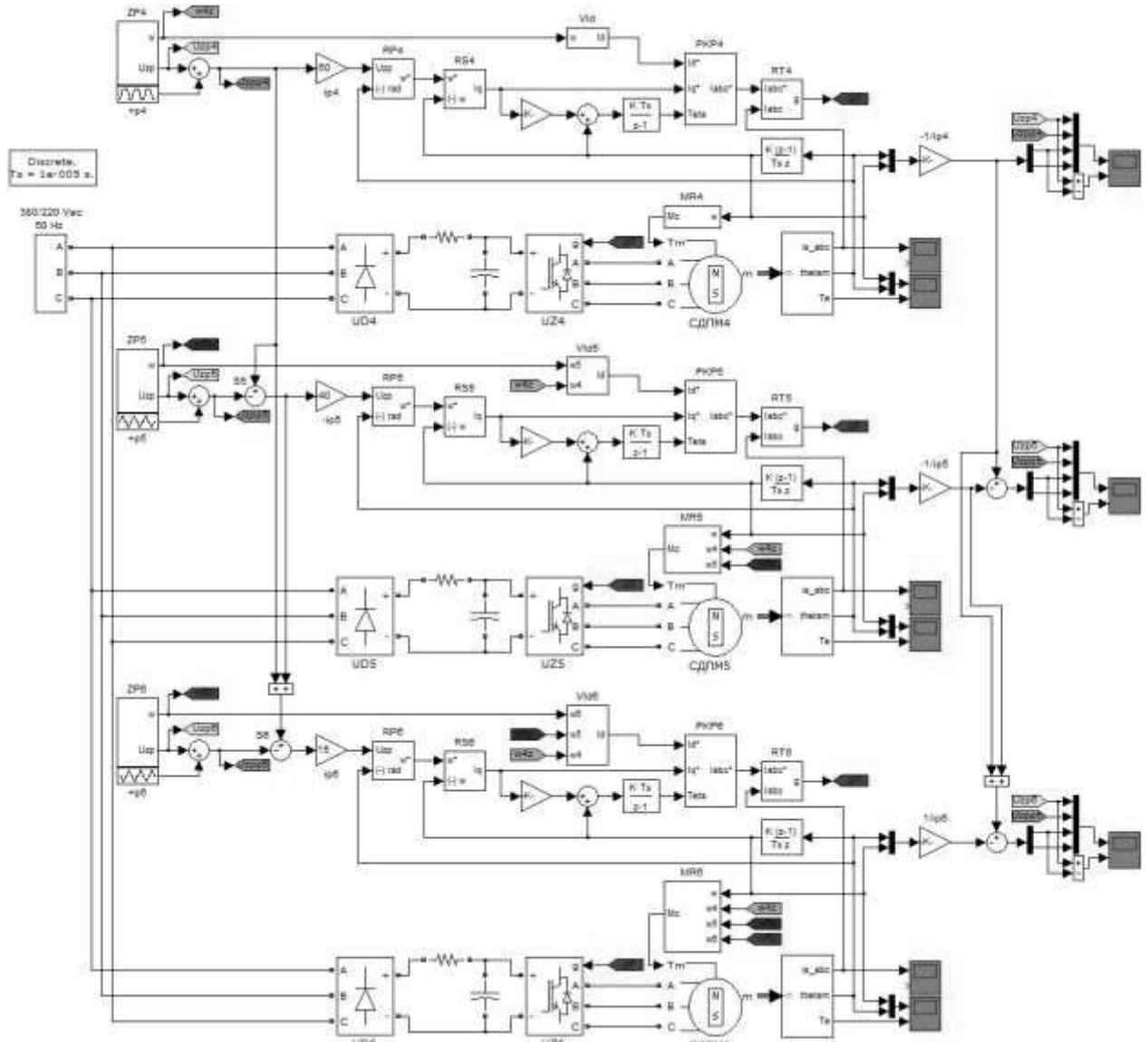


Рисунок 3.9 – Моделювання системи керування електроприводом руки-маніпулятора ПР

Суматори S5 та S6 будуть організовувати взаємовплив за каналами завдання положення для осей A5 та A6. Для зняття характеристик переміщення

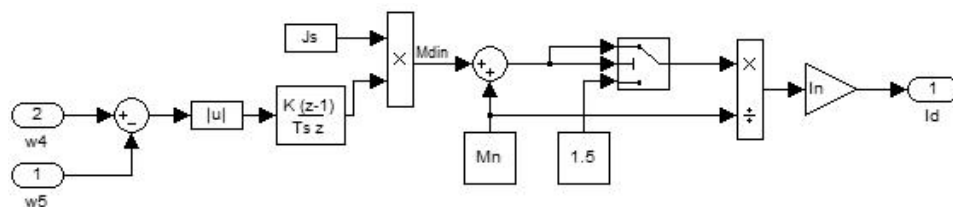
осей також потрібно врахувати взаємовплив, що знову ж таки буде організовано за допомогою суматорів у каналах, які будуть виконувати мультиплексацію параметрів, що знімаються з електродвигуна. При цьому враховується редукція передавальних каналів осей руки-маніпулятора ПР. У блоках обчислення завдання струмів  $I_d$   $V_{Id5}$  та  $V_{Id6}$  взаємовплив враховується відповідно по каналам швидкостей (рис. 3.10 - 3.11).

Налаштування регуляторів:

$$K_{RS4} = 0,63; K_{RS5} = 1,1; K_{RS6} = 1,16; K_{RP4} = K_{RP5} = K_{RP6} = 1950; K_{BZS} = 100$$

Результати моделювання представлено на графічних залежностях (див. рис. 3.14, 3.15 та 3.16), характеристики точності стеження та позиціонування зведено в табл. 3.1.

Відмітимо, що зміна центру мас, а отже, і зміна моментів не буде враховуватись і прийнята максимально можливою.

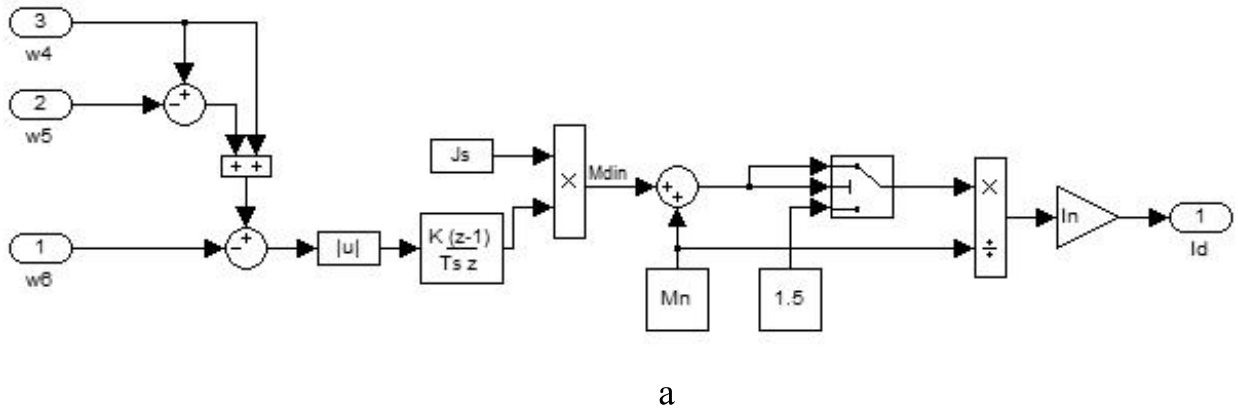


а

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

б

Рисунок 3.10 - Загальний вигляд блоку обрахунку струму  $I_d$   $V_{Id5}$  осі A5 (а) та введення необхідних параметрів (б)



Parameters

Nominal current,  $I_n$ (A)

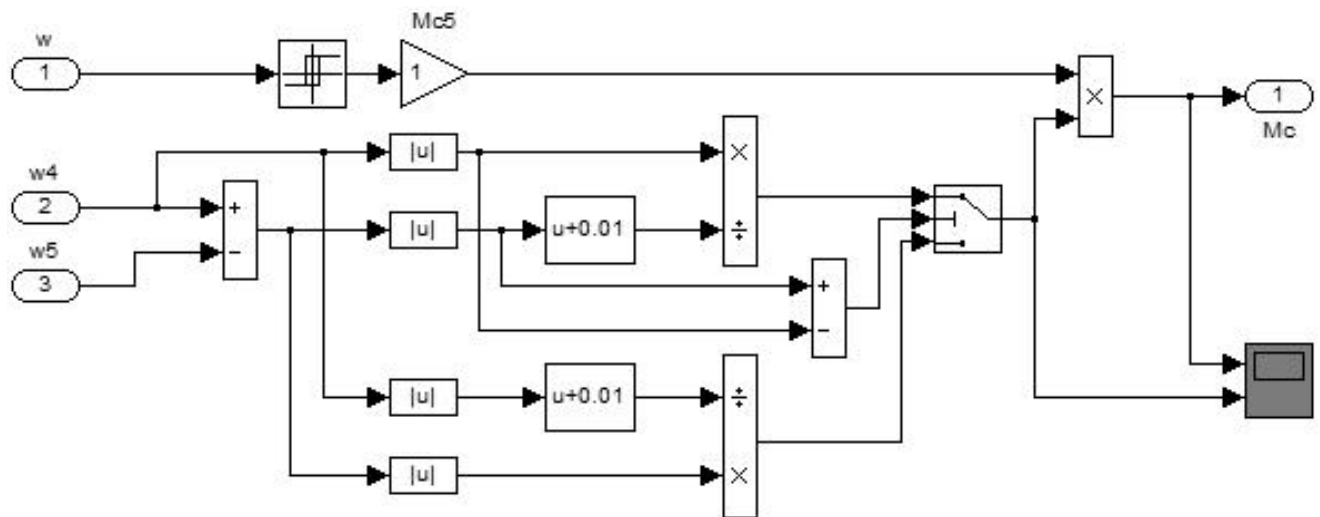
Inertia,  $J_s$ (kgm<sup>2</sup>)

Static moment,  $M_n$ (Nm)

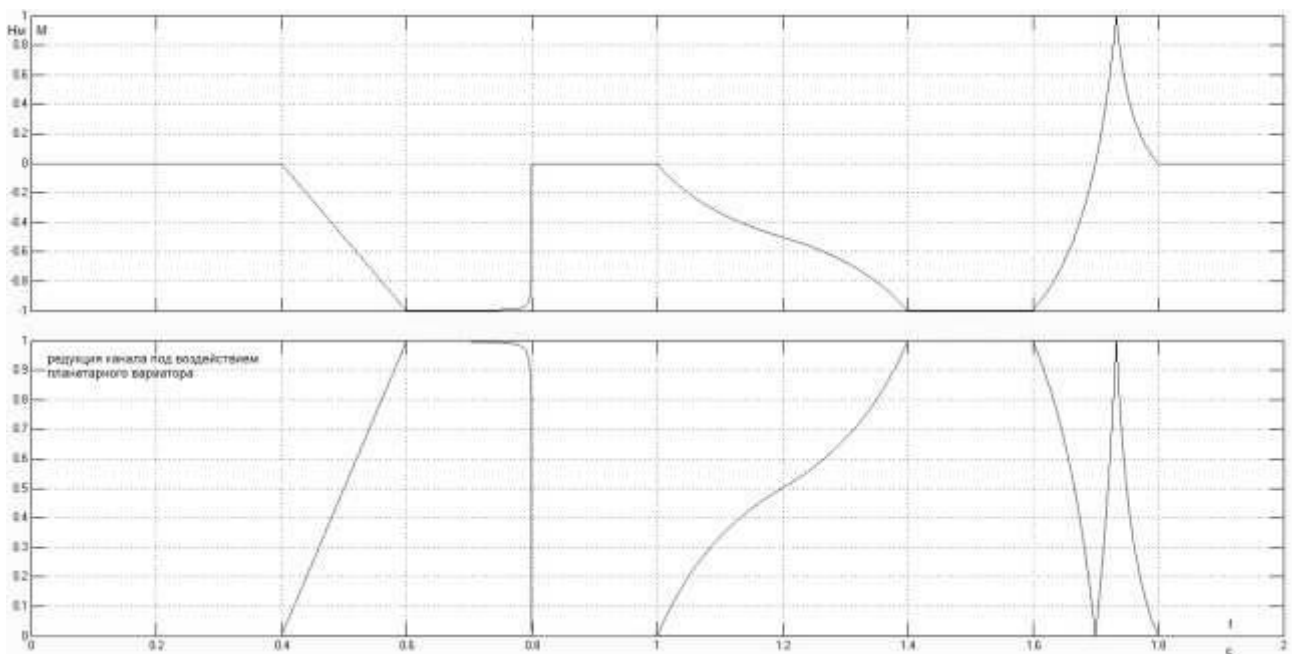
б

Рисунок 3.11 - Загальний вигляд блоку обрахунку струму  $I_d$   $V_{Id6}$  осі A5 (а) та введення необхідних параметрів (б)

Під час кінематичної взаємодії відбувається зміна не лише швидкості, а й моменту, при цьому через планетарні варіатори величина редукції передавальних каналів не є постійною. Блоки навантаження MR5 та MR6, що враховують цей вплив, представлені на рис 3.12 та 3.13.



а



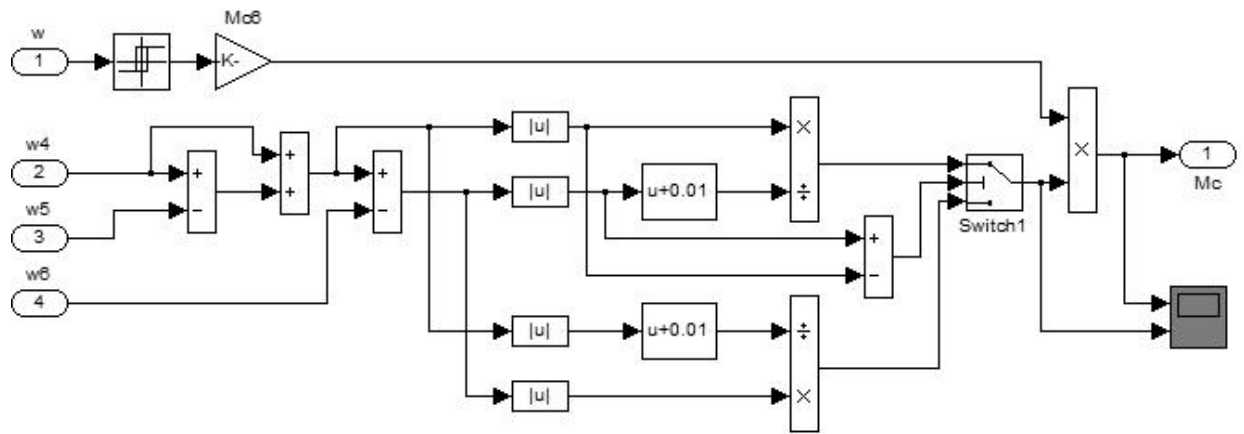
б

Рисунок 3.12 – Загальний вигляд блоку обчислення навантаження MR5 з урахуванням кінематичного взаємовпливу (а), графічні залежності моменту навантаження та редукція передавального каналу осі A5 під впливом планетарного варіатора (б)

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ

Арк.  
46



a

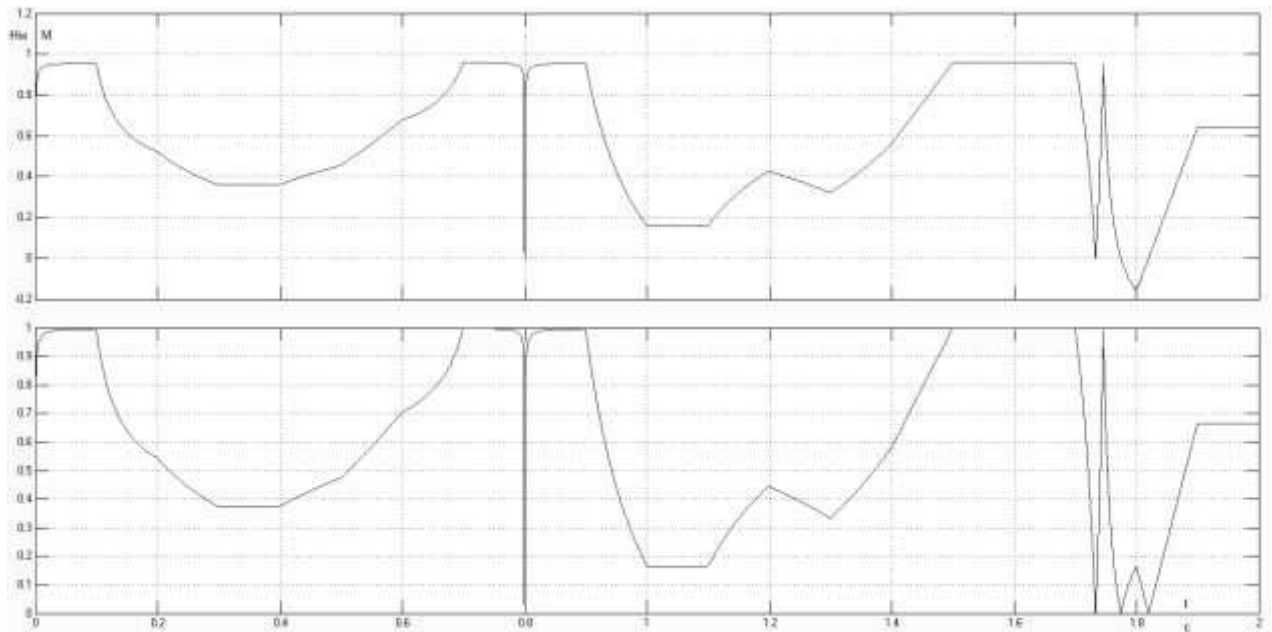
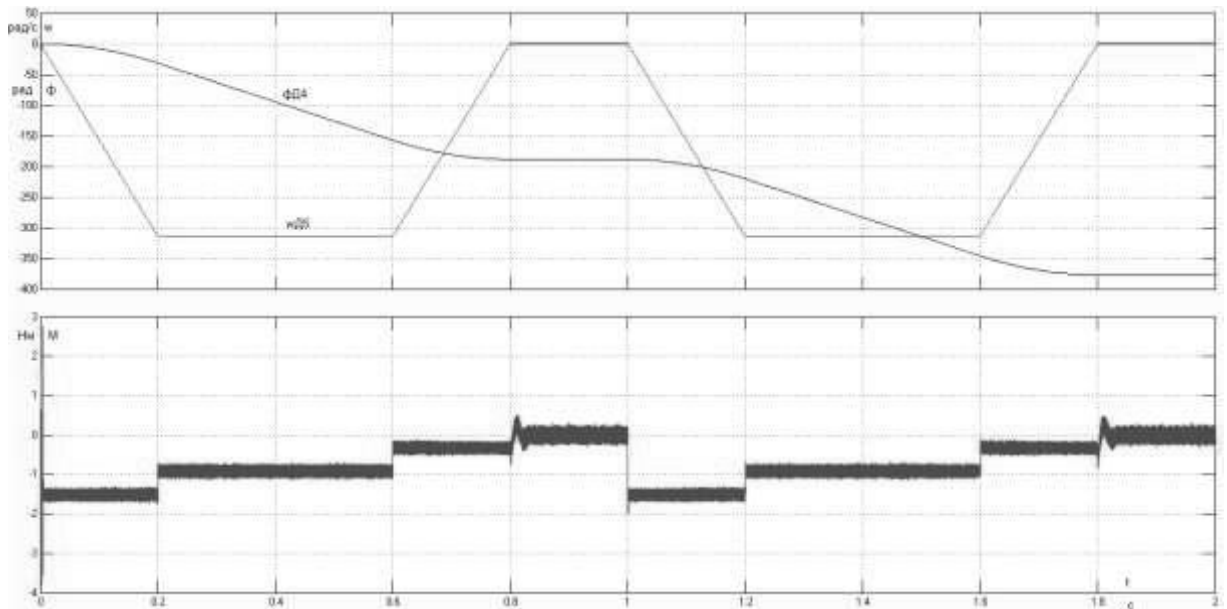


Рисунок 3.13 - Загальний вигляд блоку обчислення навантаження MR6 з урахуванням кінематичного взаємовпливу (а), графічні залежності моменту навантаження та редукція передавального каналу осі А6 під впливом двоступеневого планетарного варіатора (б)

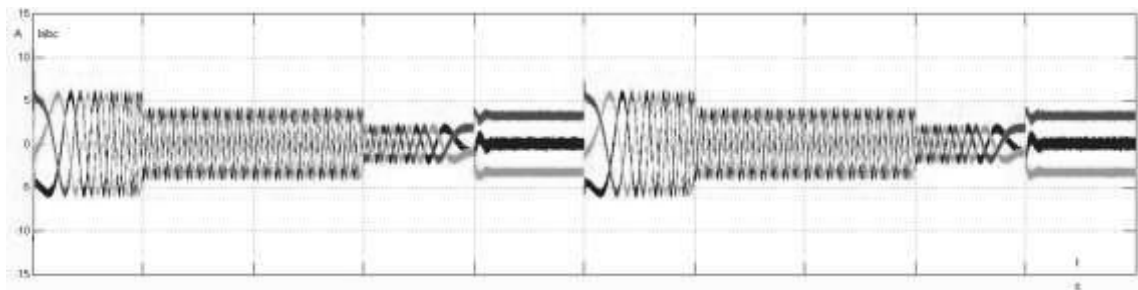
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ

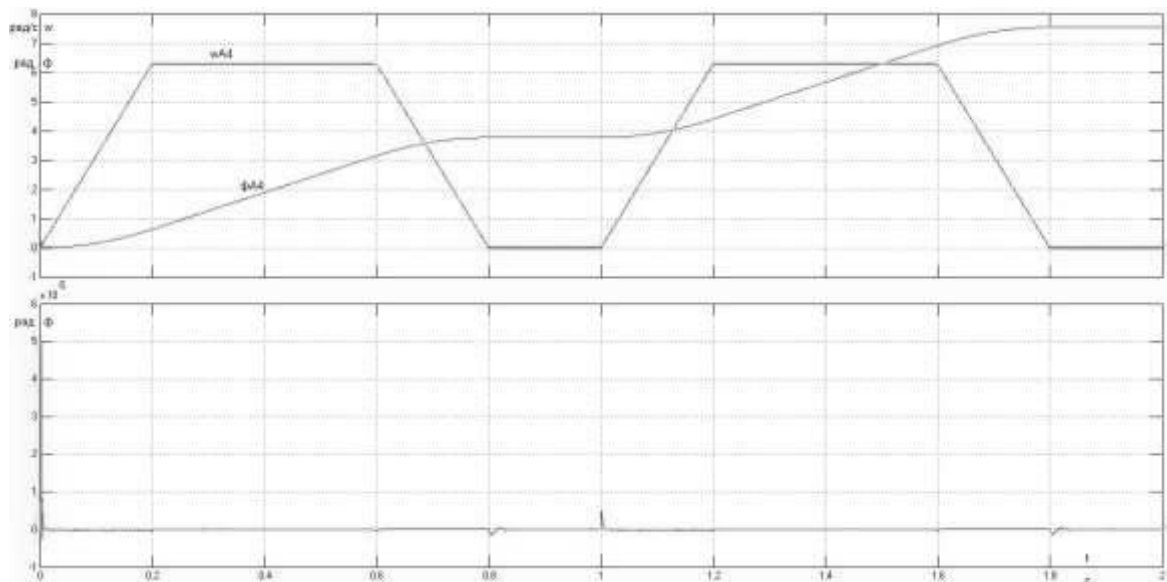
Арк.  
47



а



б

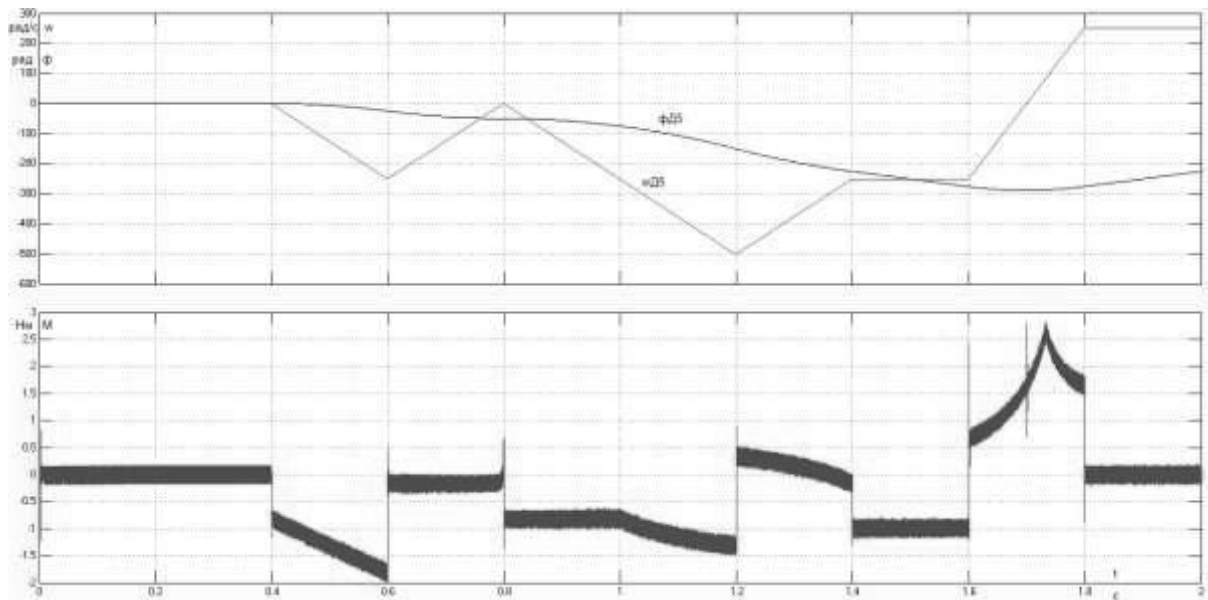


в

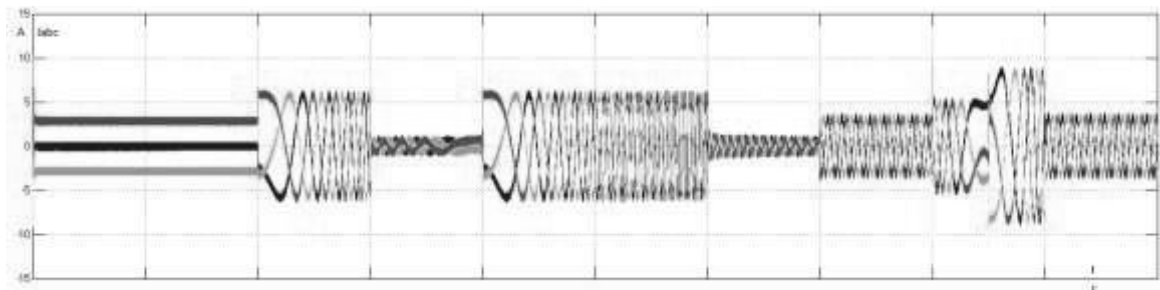
Рисунок 3.14 – Графічні залежності: а – швидкість та кутове переміщення валу електродвигуна осі А4; б – момент на валу двигуна; струми в статорі; в - швидкість та кутове переміщення осі А4, похибка стеження осі А4

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

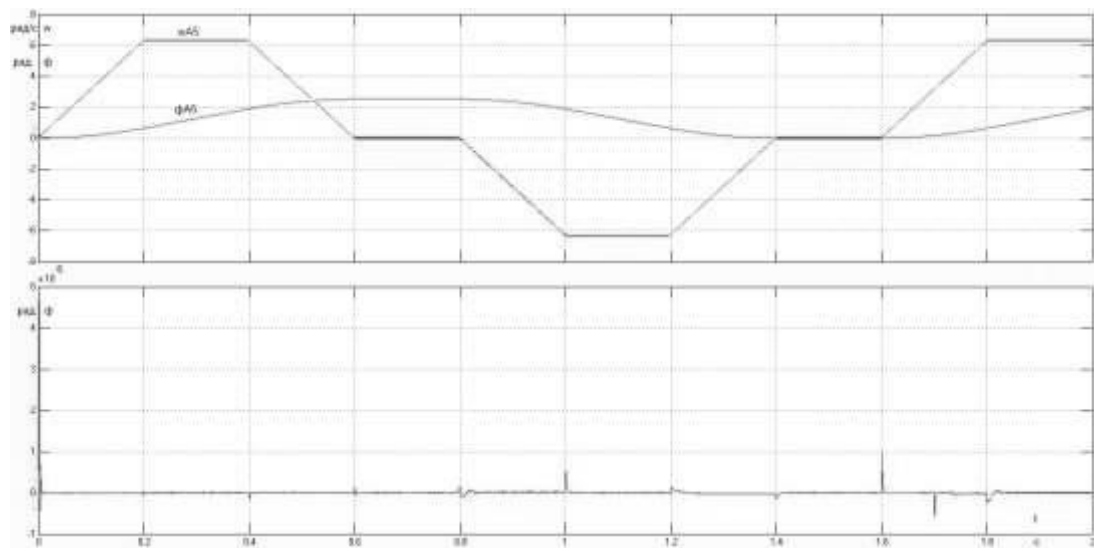
КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ



а

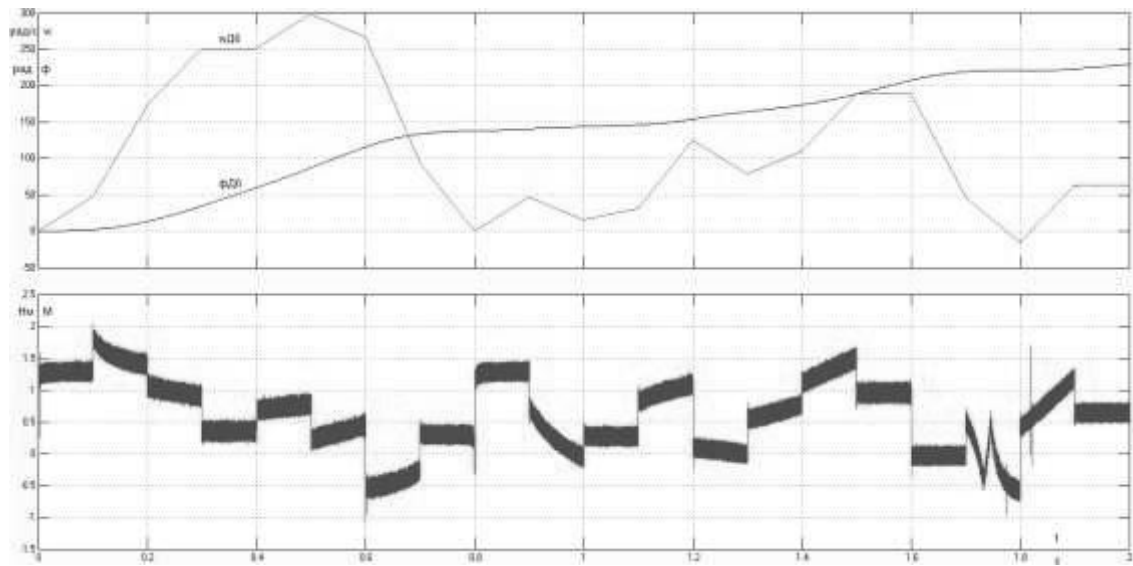


б

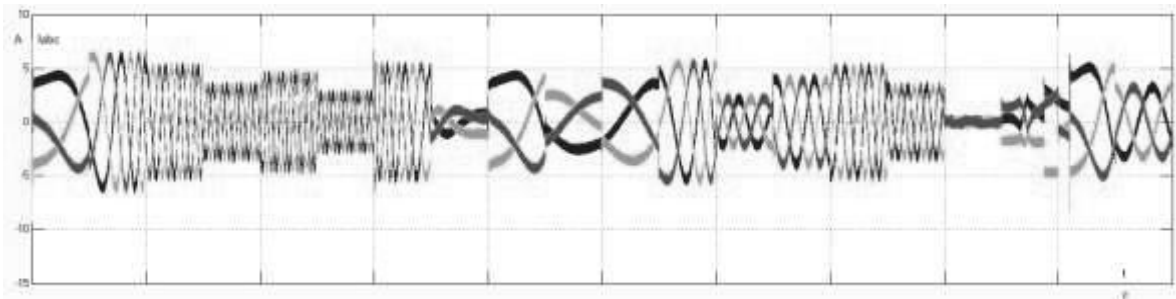


в

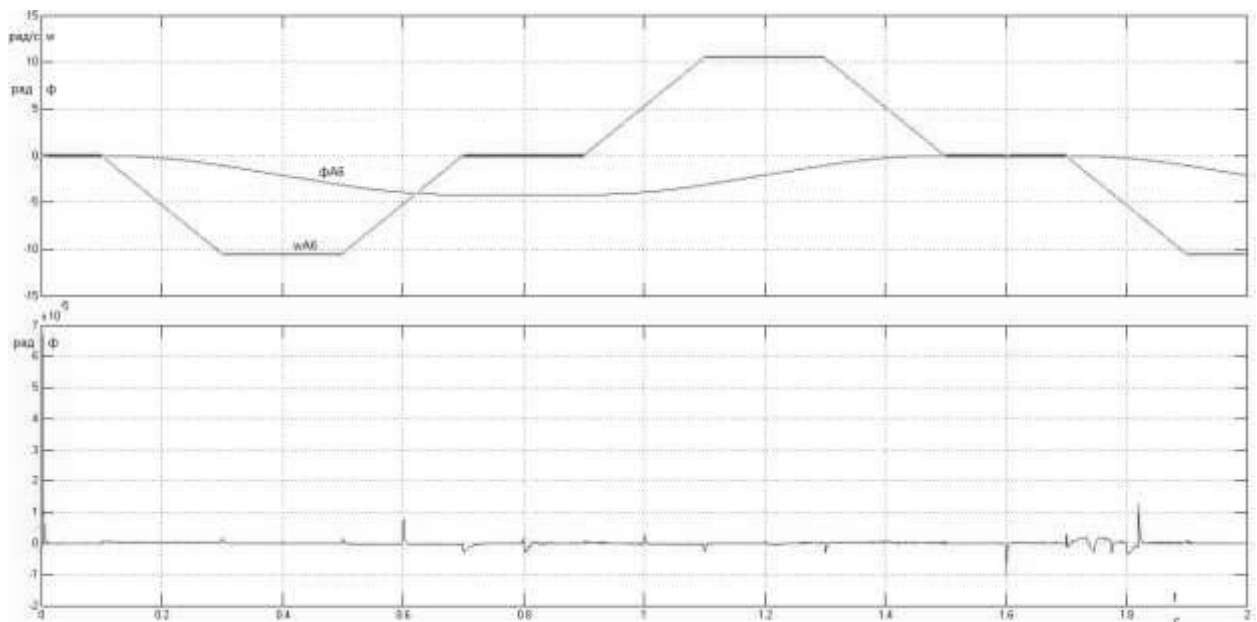
Рисунок 3.15 – Графічні залежності: а – швидкість та кутове переміщення валу електродвигуна осі А5; б – момент на валу двигуна; струми в статорі; в – швидкість та кутове переміщення осі А5; похибка стеження осі А5



а



б



в

Рисунок 3.16 – Графічні залежності: а – швидкість та кутове переміщення валу електродвигуна осі А6; б – момент на валу двигуна; струми в статорі; в – швидкість та кутове переміщення осі А6; похибка стеження осі А6

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ

Арк.  
50

Таблиця 3.1 - Точність переміщення осей

Осі	A4			A5			A6		
Точність стеження, рад·10 <sup>-5</sup> /°,10 <sup>-3</sup> /",с	5	2,9	10,3	4,7	2,7	9,7	6,8	3,9	14,13
Точність стеження при рівноприскореному русі, рад·10 <sup>-5</sup> /°,10 <sup>-3</sup> /",с	0,5	0,3	1,03	1	0,6	2,06	1,5	0,9	3,09
Точність позиціонування, рад·10 <sup>-5</sup> /°,10 <sup>-3</sup> /",с	0,2	0,1	0,41	0,25	0,1	0,5	1	0,6	2,06

Як ми бачимо із таблиці 3.1, точності переміщення осей руки-маніпулятора ПР відповідають встановленим вимогам точності електропривода, тобто максимальна похибка положення для кожної із осей нижча за 18".

### 3.3 Розробка схеми керування електроприводом руки-маніпулятора ПР

Запропоновану та розроблену принципову схему електропривода руки-маніпулятора ПР наведено на рис 3.17.

Керування електродвигунами осей запрограмовано в пам'ять відповідних мікроконтролерів (MCU). В якості контролерів ми спинили свій вибір на сімействі сигнальних процесорів фірми Texas Instruments TMS320F28xx, короткий опис можливостей яких буде наведено нижче. БВЖ ЛК - блоки вторинного живлення ланцюгів керування – використовуються для виробу необхідної напруги для живлення мікроконтролерів, енкодерів, драйверів та інтерфейсів зв'язку. Світлодіоди VL застосовуються для інформування про наявність напруги в силовому ланцюзі. Транзистор VT7 та діод VD7 використовуються для забезпечення виведення енергії під час гальмування або на внутрішній резистор скидання  $R_{ск}$ , або на зовнішній резистор  $R_{зовн}$ , який під'єднується до відповідних клем P та C (водночас внутрішній резистор відключається за допомогою розмикання клем D та C). Сигнали завдання центру мас, статичного моменту, кутової швидкості та положення кожної осей

записуються в контролери через спеціальні порти зв'язку CN1 за допомогою пульта керування, контролер якого вирішує зворотну задачу кінематики і створює такі сигнали завдання, нібито електродвигуни розташовані безпосередньо на осях руки-маніпулятора ПР [22, 23].

					<i>КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		52

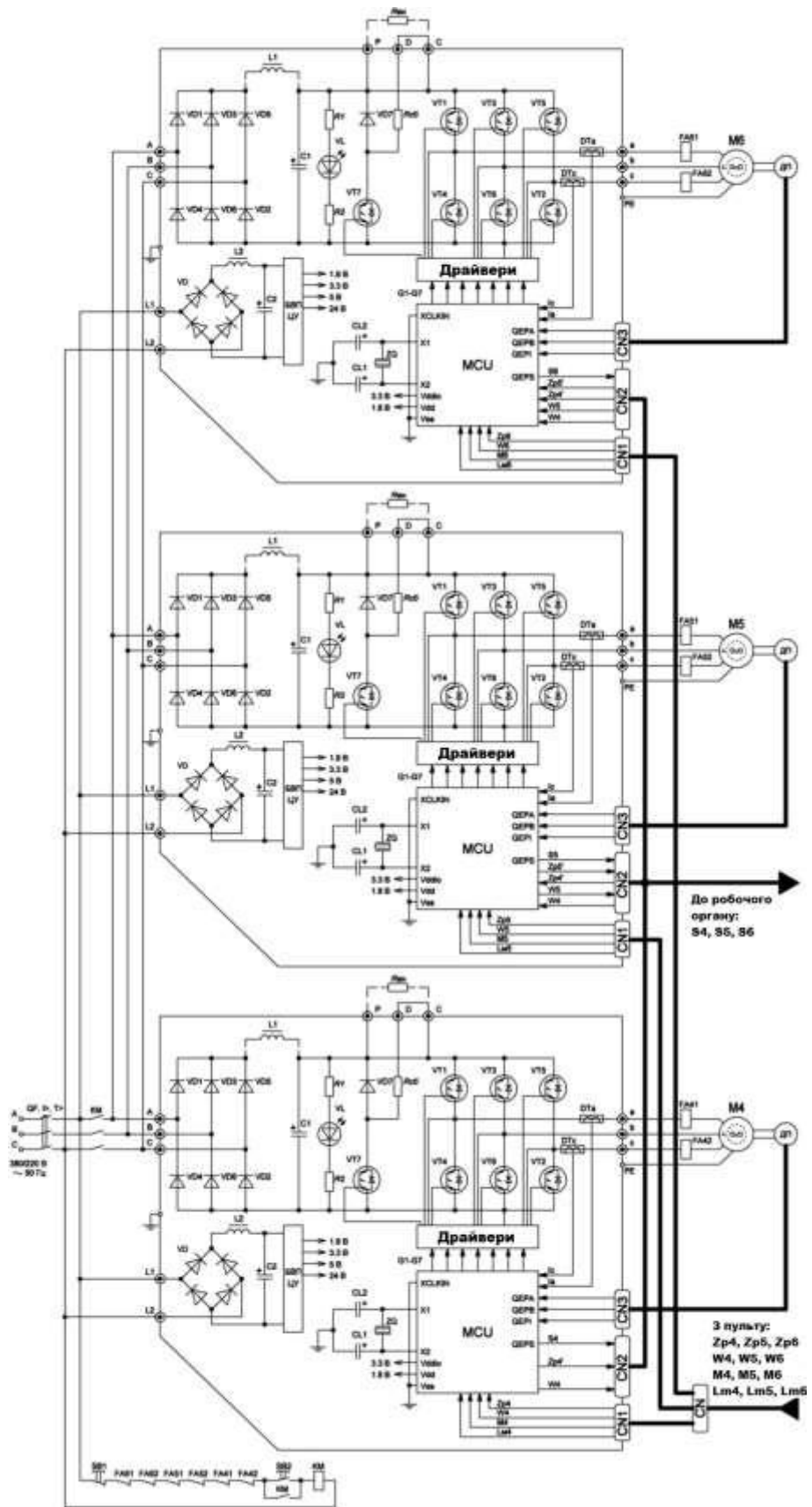


Рисунок 3.17 – Загальний вигляд схеми принципової електроприводу руки-маніпулятора ПР

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ

Арк.  
53

Між контролерами керування осями руки забезпечено зв'язок через порти CN2, що забезпечує облік кінематичної взаємодії ланок руки-маніпулятора ПР. Оброблення сигналів енкодера виконується за допомогою застосування спеціального блоку внутрішньої периферії мікроконтролера eQEP [23]. На входи QEPA та QEPB надходять імпульсні сигнали, частота яких дає інформацію про швидкість обертання, кількість імпульсів - інформацію про кут повороту, а фазовий зсув між сигналами - інформацію про напрямок обертання. Сигнал QEP1 називають індекс маркером, цей сигнал є точкою відліку для кута обертання та надходить відповідно один раз за один повний оберт диска енкодера.

Пін QEPS - це строб-сигнал, він може бути запрограмований як вхід або як вихід. У першому випадку він буде застосовуватись в якості сигналу про досягнення певної позиції, у другому за його допомогою можна вивести необхідну інформацію про певну подію. У запропонованій схемі даний пін буде використовуватись в якості виходу та передавати інформацію про досягнення певного положення на схему керування робочим органом через порт зв'язку CN2. При отриманні сигналу QEPS від кожної осі робота, робочий орган почне функціонувати (захват виконає захват об'єкту, пульверизатор почне розпилювати фарбу, на електроди зварювання буде подано напругу тощо). У разі повторного отримання строба QEPS від кожної осі, робочий орган буде вимкнено. Строб-імпульс можна налаштувати і таким чином, щоб його фронт формувався після досягнення позиції ввімкнення робочого органу, а зріз - після досягнення позиції вимкнення.

Максимально струмовий захист організовано таким чином, щоб спрацьовування реле струму (у реле є спеціальна вставка витримки за часом) у ланцюзі статора будь-якого з електродвигунів вимикається живлення силової частини електроприводу руки-маніпулятора ПР. При цьому ланцюги керування та енкодери, як і раніше, будуть отримувати живлення. Позапланова зупинка електродвигунів фіксується периферією eQEP контролерів, водночас робочий

орган вимикається повторним сигналом QEPS, якщо робочий орган не був увімкнений, то QEPS не буде виконувати формування строб. Позиція, на якій сталася позапланова зупинка електродвигунів, буде записуватись в пам'яті контролера. Якщо після усунення причини спрацьовування реле струму осі будуть встановлені у вихідне положення, то, залежно від технологічного процесу, цикл або запускається знову, або робочий орган вмикається при досягненні збереженої позиції за допомогою сигналів QEPS, отриманих від усіх осей. Якщо осі зберегли своє положення після усунення причини зупинки, то, знову ж таки, залежно від технологічного процесу, осі або встановлюють у вихідне положення і цикл запускають із початку, або цикл триває [23].

Переваги сімейства контролерів TMS320F28xx, стосовно до розв'язуваної задачі керування [22, 23]:

- висока продуктивність (при 100 МГц час циклу 10 нс);
- широкі можливості для підключення периферійних пристроїв;
- достатній обсяг оперативної та flash-пам'яті (до 128К X 16 біт);
- можливість виконання координатних перетворень змінних;
- спеціалізовані апаратні засоби для керування електроприводом, зокрема обробка сигналів інкрементального енкодера;
- до 35 мультиплексованих, програмованих входів/виходів;
- таблиці стандартних математичних функцій.

#### 3.4 Висновки до третього розділу

У середовищі MATLAB R2009b виконано моделювання та симуляцію системи керування електроприводом, проаналізовано динамічні процеси. Базуючись на результатах моделювання, встановлено, що запропонована функціональна схема (рис. 2.2) придатна для використання при керуванні СДПМ. Отримані характеристики електропривода, що моделюється відповідають встановленим вимогам.

Запропоновано та розроблено принципову електричну схему керування електроприводом руки-маніпулятора ПР. Обґрунтовано вибір мікро-контролера сімейства TMS320F28xx.

					<i>КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		56

## ВИСНОВКИ

Виконано аналітичний огляд існуючих конструкцій сучасних рук-маніпуляторів ПР. Встановлено оптимальну КС універсального ПР. Запропоновано необхідні вимоги до механізму, зібрано необхідний матеріал для зворотного інжинірингу, спроєктовано трансмісію руки-маніпулятора ПР. Визначено параметри, необхідні для вибору електроприводу. Враховано кінематичні взаємодії ланок руки-маніпулятора ПР.

Обрано двигуни для осей руки-маніпулятора ПР, наведено можливі варіанти електроприводу. Проведено огляд можливих варіантів керування електроприводом. Обрано необхідні елементи силової схеми електроприводу.

Наведено математичний опис СД із збудженням від постійних магнітів на роторі, розроблено та запропоновано функціональну схему регулювання положення СДПМ із частотно-струмовим векторним керуванням із непрямою орієнтацією за полем та регуляторами струмів, що виконані в нерухомій системі координат на основі функціональної схеми такого ж керування для регулювання швидкості АД.

У середовищі MATLAB R2009b виконано моделювання та симуляцію системи керування електроприводом, проаналізовано динамічні процеси. Базуючись на результатах моделювання, встановлено, що запропонована функціональна схема (рис. 2.2) придатна для використання при керуванні СДПМ. Отримані характеристики електропривода, що моделюється відповідають встановленим вимогам.

Запропоновано та розроблено принципову електричну схему керування електроприводом руки-маніпулятора ПР. Обґрунтовано вибір мікроконтролера сімейства TMS320F28xx.

					<i>КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		57



навч. закл. «Нац. гірн. ун-т». - 3-тє вид., перероб. і доп. - Дніпро : НГУ, 2017. - 224 с.

15. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні / [Л.Є.Пелевін, К. І. Почка, О. М. Гаркавенко та ін.]. – К.: Інтерсервіс, 2016. – 258 с.

16. Сучасні електромехатронні комплекси і системи : навч. посібник / Т. П. Павленко, В. М. Шавкун, О. С. Козлова, Н. П. Лукашова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 116 с. ISBN 978-966-695-502-2.

17. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків : навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання / А. В. Гайдамака. – Харків : НТУ «ХП», 2020. – 275 с.

18. Савченко І. Д. Приводи систем керування [Текст]: навч. посіб./ І. Д. Савченко.–Д.: РВВ ДНУ, 2014. – 112 с.

19. International Rectifier. Insulated gate bipolar transistor with ultrafast soft recovery diode irg4bc20fd.

20. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода : навч. посібник / М. В. Загірняк, Т. В. Коренькова, А. П. Калінов, А. І. Гладир, В. Г. Ковальчук. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – Харків: Видавництво «Точка», 2017. – 206 с.

21. Довідник з MATLAB / Електронний навчальний посібник з курсового і дипломного проектування. – К.: НТУУ "КПІ", 2013. – 132 с.

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

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

24. Роботы FANUC – Режим доступа:

									Арк.
									59
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ				

<http://www.fanucrobotics.com/Products/Robots/Atoz.aspx>

25. О.П. Губарев. Мехатроніка: Циклічно-модульний підхід до вирішення практичних задач автоматизації / Губарев О.П., Ганпанцурова О.С. // К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 160 с.

26. Основи робототехніки: навчальний посібник / Н.В. Морзе, Л.О. Варченко-Троценко, М.А. Гладун. – Кам'янець-Подільський : ПП Буйницький О.А., 2016. – 184 с.

27. Куцик А. Автоматизовані системи керування на програмованих логічних контролерах: навч. посіб. / А. Куцик, В. Місюренко. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 200 с.

28. Пупена О.М. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах : навч. посіб / [Пупена О.М., Ельперін І.В., Луцька Н.М., Ладанюк А.П.]. – К. : Вид-во «Ліра-К», 2011. – 552 с.

29. Універсальний математичний пакет MATLAB і типові задачі обчислювальної математики. Навчальний посібник.– К.: НАУ, 2004. – 176 с.

30. Ільїн С.П. Варіаційне обчислення з використанням MATLAB. – Харків: ХПІ, 2001. – 107 с.

31. MATLAB в інженерних розрахунках. Комп'ютерний практикум / Гоблик Н. М., Гоблик В. В. - Львів: Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 2020. – 192 с.

32. Використання програмних засобів MATLAB для розв'язання типових задач аналогової автоматизації: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / С. І. Арсенєва – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 118 с. ISBN 978-617-529-244-0.

33. Лозинський А., Мороз В., Паранчук Я. Розв'язування задач електромеханіки в середовищах пакетів MathCAD і MATLAB : Навчальний посібник. Львів: Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 2000. – 166 с.

34. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний

										Арк.
										60
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	<i>КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ</i>					

ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.

35. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.

36. Михайлов, Є. П. Навчальний посібник з дисципліни "Маніпулятори та промислові роботи" : для студентів бакалаврів / Є. П. Михайлов, В. М. Лінгур ; Одес. нац. політехн. ун-т. - Одеса, 2019. - 233 с.

37. Маніпулятори, автооператори, роботи промислові та системи виробничі гнучкі. Терміни та визначення. ДСТУ 2879 – 94. – 31 с.

38. Проць. Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: Навчальний посібник . – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. – 232с.

39. Проць Я.І., Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів./ Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 344с.

40. Кваліфікаційна робота : методичні вказівки щодо її виконання для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / уклад.: Ю.В. Форкун, Г.І. Радельчук, І.В. Форкун, А.С. Каштальян, В.В. Мартинюк. Хмельницький : ХНУ, 2020. – 50 с.

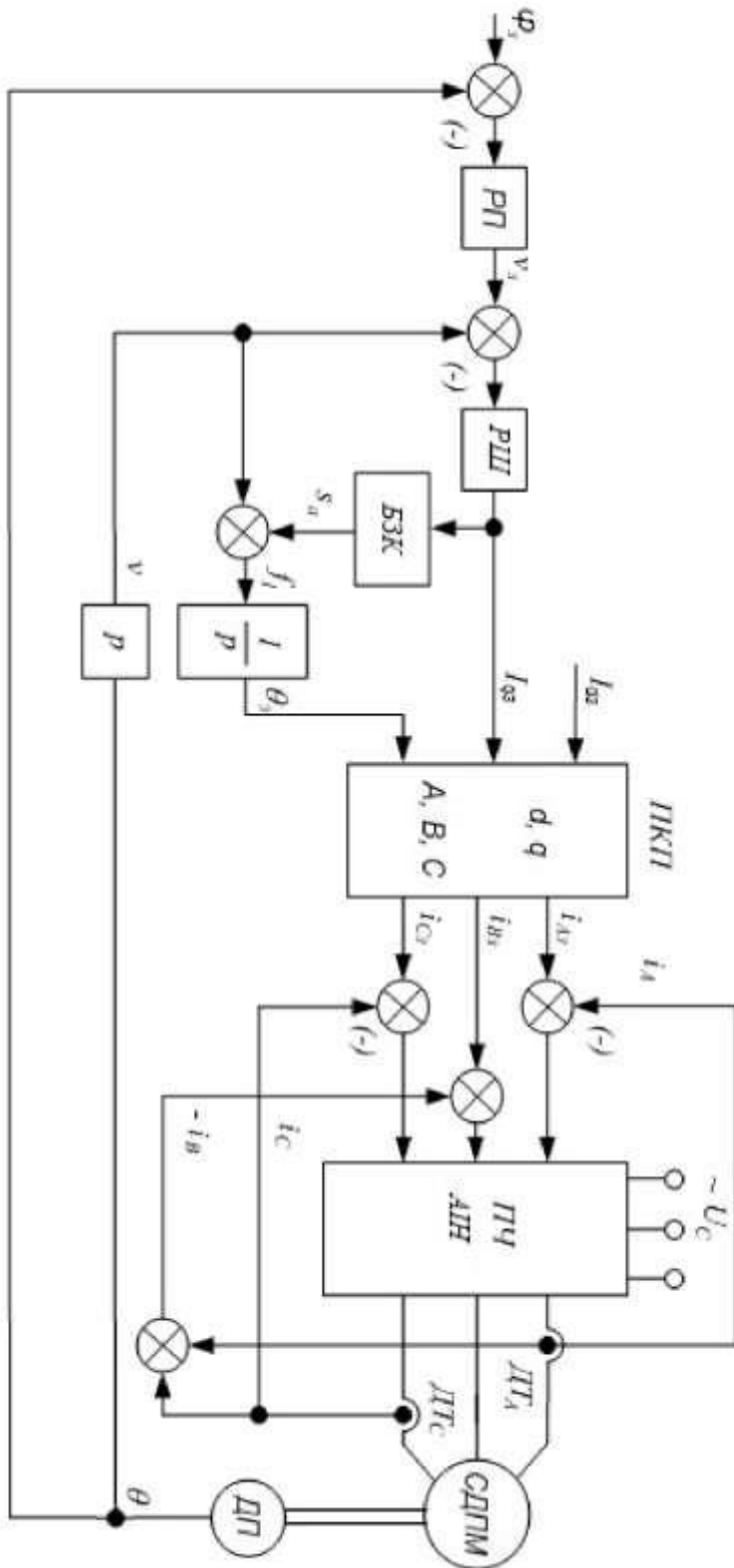
					<i>КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		61

**ДОДАТКИ**

					<i>КВРАКІТ.2019040.01.02.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		62

Додаток А

КВРАКІТ.2019040.0102.C2

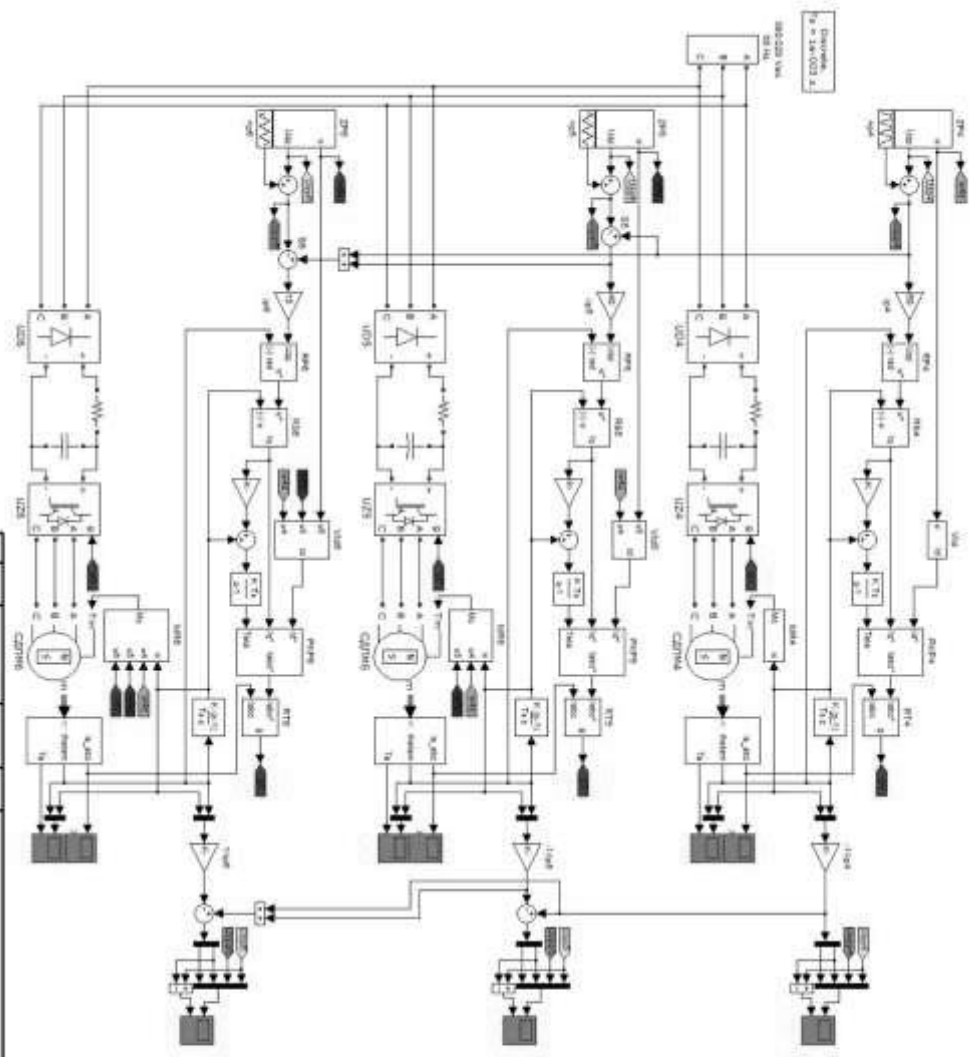


КВРАКІТ.2019040.0102.C2			
Функціональна схема регулювання положення СДПМ			
Зм. №	Назва	Дата	Стор.
1	Склад		
2	Модифікація		
3	Внесок		
4	Внесок		
5	Внесок		
6	Внесок		
7	Внесок		
8	Внесок		
9	Внесок		
10	Внесок		
11	Внесок		
12	Внесок		
13	Внесок		
14	Внесок		
15	Внесок		
16	Внесок		
17	Внесок		
18	Внесок		
19	Внесок		
20	Внесок		
21	Внесок		
22	Внесок		
23	Внесок		
24	Внесок		
25	Внесок		
26	Внесок		
27	Внесок		
28	Внесок		
29	Внесок		
30	Внесок		
31	Внесок		
32	Внесок		
33	Внесок		
34	Внесок		
35	Внесок		
36	Внесок		
37	Внесок		
38	Внесок		
39	Внесок		
40	Внесок		
41	Внесок		
42	Внесок		
43	Внесок		
44	Внесок		
45	Внесок		
46	Внесок		
47	Внесок		
48	Внесок		
49	Внесок		
50	Внесок		
51	Внесок		
52	Внесок		
53	Внесок		
54	Внесок		
55	Внесок		
56	Внесок		
57	Внесок		
58	Внесок		
59	Внесок		
60	Внесок		
61	Внесок		
62	Внесок		
63	Внесок		
64	Внесок		
65	Внесок		
66	Внесок		
67	Внесок		
68	Внесок		
69	Внесок		
70	Внесок		
71	Внесок		
72	Внесок		
73	Внесок		
74	Внесок		
75	Внесок		
76	Внесок		
77	Внесок		
78	Внесок		
79	Внесок		
80	Внесок		
81	Внесок		
82	Внесок		
83	Внесок		
84	Внесок		
85	Внесок		
86	Внесок		
87	Внесок		
88	Внесок		
89	Внесок		
90	Внесок		
91	Внесок		
92	Внесок		
93	Внесок		
94	Внесок		
95	Внесок		
96	Внесок		
97	Внесок		
98	Внесок		
99	Внесок		
100	Внесок		

ХНУер. АКІТ-19

# Додаток Б

КВРАКІТ.201904.0.01.02.Е6

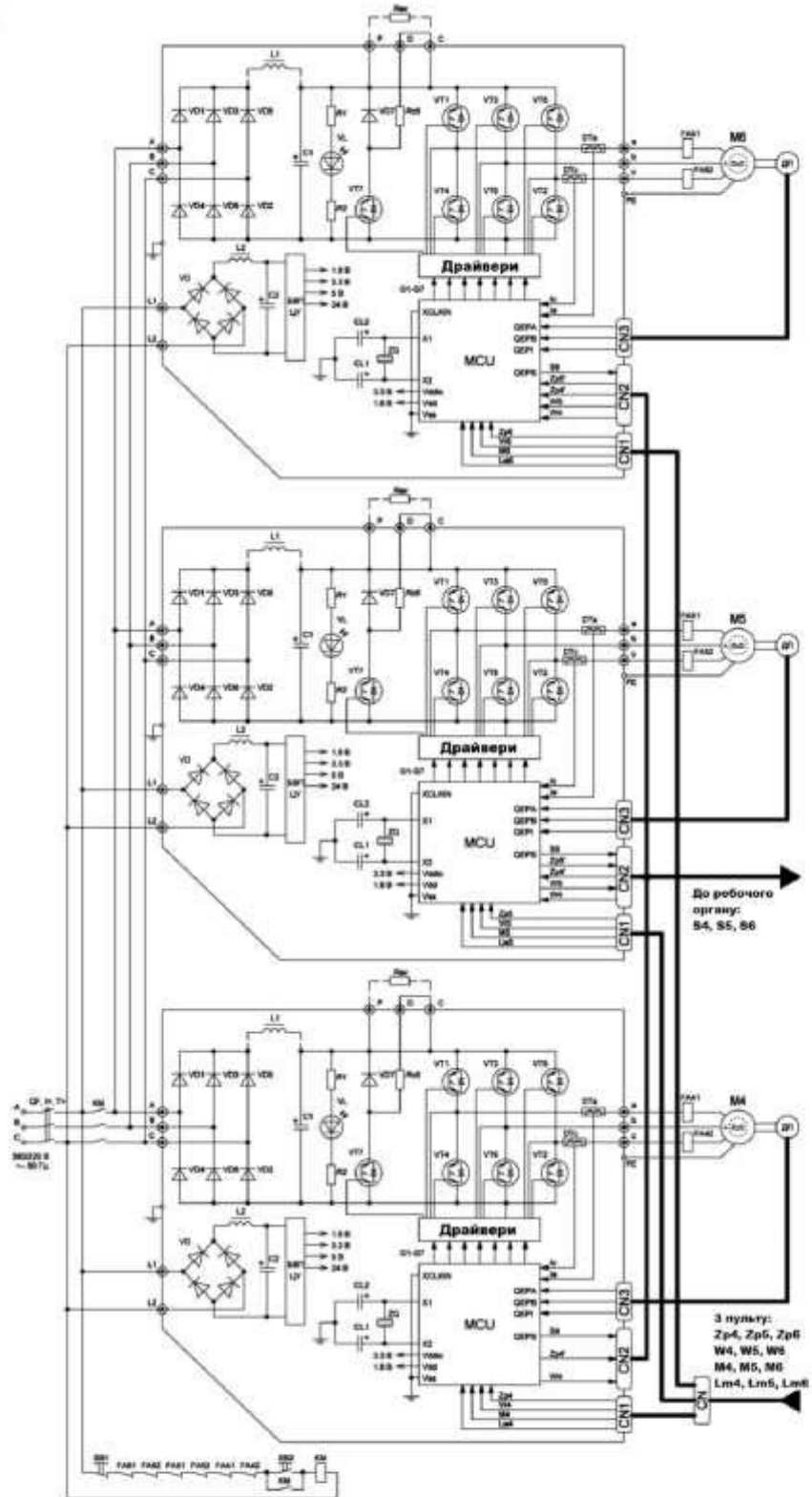


Земля	Місцева	Вхідне	Вихідне
Фазний	Вихідне Є		
Термін	Модель ЛТС		
Склад			
Інколи	Користуючись Д/Д		
Забезпечити	Мінімальною В		

<b>КВРАКІТ.201904.0.01.02.Е6</b>		Модель	Місцева
<b>Модельованні системи керування електродвигуном ручні-мінні/лінійні ІР</b>		Д	
		Державне	
		ХНЦАР. АКТ-19	

# Додаток В

КВРАКІТ.2019040.01.02.ЕЗ



До робочого органу: S4, S5, S6

3 пульту: Zp4, Zp5, Zp6  
W4, W5, W6  
M4, M5, M6  
Lm4, Lm5, Lm6

		КВРАКІТ.2019040.01.02.ЕЗ	
Заказ	Місце	Електропривод руки-маніпулятора ПР	
Рисунки	Рисунки		
Листы	Листы	Листы	
Колір	Колір		
Колір	Колір	ХНЗер. АКІТ-19	

## Додаток Г

Таблиця Г.1 - Технічні дані маніпуляторів ПР, із вантажопідйомністю від 15 до 20 кг [1-13]

	KUKA KR 16	FANUC Arc Mate 120iC	KAWASAKI RS20N	ABB IRB 2400-16	YASKAWA MOTOMAN MA1800	
Кількість осей	6	6	6	6	6	
Навантаження, кг	16	20	20	20	15	
Тип електроприводу/ потужність споживання, кВт	СДПМ/8.8	СДПМ+возм комб пневм/н/д	СДПМ/11.4	СДПМ/н/д	СДПМ/5	
Додаткове навантаження (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, мм	±0.05	±0.08	±0.05	±0.07	±0.08	
Точність стеження, мм	н/д	н/д	н/д	±0.15	н/д	
Маса маніпулятора ПР, кг	235	250	230	380	380	
ЕЦМН* відносно осі А6, мм	120	н/д	н/д	н/д	н/д	
ЕЦМН відносно фланцю, мм	150	н/д	н/д	н/д	н/д	
Момент інерції осі, кг·м <sup>2</sup>	А6	0.36	0.28	0.3	н/д	0.04
	А5	н/д	1.04	0.9	н/д	1.04
	А4	н/д	1.04	0.9	н/д	1.04
Швидкість, °/с	А6	615	550	610	450	560
	А5	330	360	360	360	340
	А4	330	360	400	360	380
	А3	156	180	210	150	190
	А2	156	175	205	150	175
	А1	156	195	190	150	195

\*максимально допустимий ексцентриситет центру мас навантаження

Ім'я користувача:  
Кафедра АКІТІТК

Дата перевірки:  
02.06.2023 14:55:22 EEST

Дата звіту:  
02.06.2023 15:14:52 EEST

ID перевірки:  
1015394795

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

ID користувача:  
100005862

Назва документа: **Бондар**

Кількість сторінок: 65 Кількість слів: 8660 Кількість символів: 61501 Розмір файлу: 1.53 MB ID файлу: 1015059061

Виявлено модифікації тексту (можуть впливати на відсоток схожості)

**8.46%**  
**Схожість**

Найбільша схожість: 2.65% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1015007719)

6.43% Джерела з Інтернету 325 ..... Сторінка 67

4.65% Джерела з Бібліотеки 114 ..... Сторінка 70

**0.1% Цитат**

Цитати 1 ..... Сторінка 71

Посилання 1 ..... Сторінка 71

**0%**  
**Вилучень**

Немає вилучених джерел

**Модифікації**

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 38

Підозріле форматування 12 сторінок

## Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 1.0%

Словари проверки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Ошибок в документах: 11%

ID: 114579 Название: БКР Болдар Є. Добавлено в БД: 2023-06-02 Автор: Болдар Є. Руководитель: Майдан П.С. Консультанты: Опоненты:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	40358	598	2181 (5%)	36 (6%)

### Источники плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Бондар Свген Сергійович

Тема: Автоматизація системи керування електроприводом руки-маніпулятора промислового робота

Спеціальність: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 62

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: створено систему автоматизованого керування електроприводом руки-маніпулятора промислового робота

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено аналітичний огляд існуючих конетрукцій сучасних рук-маніпуляторів ПР. Встановлено оптимальну КС універсального ПР. Визначено параметри, необхідні для вибору електроприводу. Враховано кінематичні взаємодії ланок руки-маніпулятора ПР. У другому розділі виконано вибір двигунів для осей руки-маніпулятора ПР, наведено можливі варіанти електроприводу. Проведено огляд можливих варіантів керування електроприводом. Обрано необхідні елементи силової схеми електроприводу. Наведено математичний опис СД із збудженням від постійних магнітів на роторі, розроблено та запропоновано функціональну схему регулювання положення СДПМ із частотно-струмовим векторним керуванням із непрямою орієнтацією за полем та регуляторами струмів, що виконані в нерухомій системі координат на основі функціональної схеми такого ж керування для регулювання швидкості АД. У третьому розділі у програмному середовищі MATLAB R2009b виконано моделювання та симуляцію системи керування електроприводом, проаналізовано динамічні процеси. Базуючись на результатах моделювання, встановлено, що запропонована функціональна схема придатна для використання при керуванні СДПМ. Отримані характеристики електропривода, що моделюється відповідають встановленим вимогам. Запропоновано та розроблено принципову електричну схему керування електроприводом руки-маніпулятора ПР. Обгрунтовано вибір мікроконтролера.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: у роботі недостатньо уваги приділяється програмній реалізації

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: добре (3,75/С)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) \_\_\_\_\_

Юлія Сергіївна Соколан, кандидат технічних наук, доцент, кафедра Будівництва та цивільної безпеки, Хмельницький національний університет

“ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри АКІТтаР  
д-ру техн.наук, проф. Мартиноку В.В.

Бондар С.С.

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи АКІТ-19-1

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

06.06.2023

дата



підпис

**РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ  
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА  
РОБОТОТЕХНІКИ  
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ**

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Автоматизація системи керування електроприводом руки-маніпулятора промислового робота

Автор: Бондар Євген Сергійович

Спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Науковий керівник: Майдан Павло Сергійович, кандидат технічних наук, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.


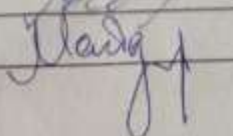
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 8,46% і адресується до 440 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Дата 06.06.23

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_

Валерій МАРТИНЮК

Юрій ФОРКУН

Павло МАЙДАН