

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій ПЕРЕСАДА
(підпис)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

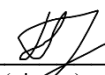
на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи автоматизації,
електропривод та електромобільність»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

на тему: Електропривод установки для виготовлення полімерних труб

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕП-72
(шифр групи)

_____ Прінько Юрій Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ 
(підпис)

Керівник _____ проф., д.т.н., Михальський Валерій Михайлович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)

_____ 
(підпис)

Консультант _____
(назва розділу) _____ (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) _____ (підпис)

Рецензент _____ доцент, к.т.н., Шиманська Анна Анатоліївна
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) _____ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент

_____ 
(підпис)

Київ – 2021 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	141.0005.035.БР	Пояснювальна записка	67	
3	A1	141.0005.035.БР	Креслення загального виду	1	
4	A1	141.0005.035.БР	Схема електрична ...	1	
5	A1	141.0005.035.БР	Результати досліджень ...	1	

				141.0005.035.БР		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розроб.	Прінько Ю.В.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Михальський В.М.				2	67
Конс.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-72	
Н/контр.	Михальський В.М.					
Зав.каф.	Пересада С.М.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту**

на тему: «Електропривод установки для виготовлення полімерних труб»

Київ – 2021 р.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту Електропривод установки для виготовлення полімерних труб

керівник проєкту _____ проф., д.т.н. Михальський В.М.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом проєкту 04.06.2021 р.

3. Вихідні дані до проєкту: Номінальна потужність – 1.1 кВт; номінальна швидкість – 1400 об/хв, коефіцієнт корисної дії – 0.76; коефіцієнт потужності – 0.79; число пар полюсів – 2; момент інерції – 0.0022; перевантажувальна здатність – 2.4; передавальне відношення редуктора – 40

4. Зміст пояснювальної записки Перелік скорочень та умовних позначень. Зміст. Вступ. Аналітичний огляд. Розрахунок та визначення параметрів двигуна. Проєктування алгоритму векторного керування швидкістю

асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Дослідження динамічних та статичних характеристик спроектованої системи. Практична реалізація системи керування швидкістю асинхронного двигуна. Висновки. Перелік посилань

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо) Схематичне зображення установки. Схема електрична функціональна. Результати моделювання динамічних режимів

6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 11.03.2021 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналітичний огляд	18.03.2021	
2	Розрахунок та визначення параметрів двигуна	08.04.2021	
3	Проектування алгоритму векторного керування швидкістю асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором	22.04.2021	
4	Дослідження динамічних та статичних характеристик спроектованої системи	06.05.2021	
5	Практична реалізація системи керування швидкістю асинхронного двигуна	20.05.2021	
6	Оформлення висновків, графічного матеріалу та пояснювальної записки	04.06.2021	

Студент


(підпис)

Юрій ПРІНЬКО

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

Валерій МИХАЛЬСЬКИЙ

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт містить 68 сторінок, 27 рисунків, 2 таблиці, 3 аркуша графічної частини.

Метою даного проєкту є розробка електроприводу установки мобільного комплексу для виготовлення полімерних труб. Розроблена система спроектована згідно вимог до проєкту. Під час виконання роботи було розраховано та визначено параметри асинхронного двигуна. Обрано систему керування двигуном та спроектовано алгоритм векторного керування швидкістю. Проведено ряд досліджень підтримання швидкості двигунів та їх синхронізації.

Спроектowana установка може знайти реальне застосування підприємствами, які займаються прокладанням полімерних труб, адже дана установка дає змогу заощадити кошти та час, що йдуть на транспортування великої кількості великогабаритних труб до місця прокладання.

Графічна частина включає в себе: схематичне зображення установки, схему електричну функціональну, результати досліджень.

АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, РЕДУКТОР, ЕКСТРУДЕР, ПОЛІМЕР, ТРУБА, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, АЛГОРИТМ, ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ, РЕГУЛЯТОР, ЕНКОДЕР.

					141.0005.035.БР						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Електропривод установок для виготовлення полімерних труб	Літ.		Арк.	Аркушів		
Розроб.		Прінько Ю.В.							6	67	
Перевір.		Михальський В.М.									
Н. Контр.		Михальський В.М.				НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» Кафедра АЕМС-ЕП гр. ЕП-72					
Затверд.		Пересада С.М.									

SUMMARY

Thesis project contains 68 pages, 27 figures, 2 tables, 3 sheets of graphics.

The purpose of this project is to develop an electric drive for the installation of a mobile complex for the manufacture of polymer pipes. The developed system is designed according to the requirements of the project. During the work, the parameters of the induction motor were calculated and determined. The engine control system is chosen and the vector speed control algorithm is designed. A number of studies have been conducted to maintain the speed of motors and their synchronization.

The designed installation can find a real application for companies engaged in laying polymer pipes, because this installation saves money and time spent on transporting a large number of large pipes to the laying site.

The graphic part includes: schematic representation of the installation, electrical functional diagram, research results.

ASYNCHRONOUS MOTOR, REDUCER, EXTRUDER, POLYMER, PIPE, FREQUENCY CONVERTER, VECTOR CONTROL, ALGORITHM, TRANSITIONAL PROCESSES, REGULATOR, ENCODER.

					141.0005.035.BR		
		<i>Nº of doc.</i>	<i>Sign</i>	<i>Date</i>	<i>Electric drive installation for manufacture of polymer pipes</i>		
<i>Devel.</i>	<i>Y. Prinko</i>						
<i>Checked</i>	<i>V. Mykhalskyi</i>						
<i>N. Contr</i>	<i>V. Mykhalskyi</i>						
<i>Approved</i>	<i>S. Peresada</i>						
					<i>L.</i>	<i>Page</i>	<i>Pages</i>
						7	67
					NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute", <i>FEA</i>		

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	13
1.1 Загальна інформація про виготовлення полімерних труб	13
1.2 Технології виготовлення полімерних труб.....	14
1.3 Опис технологічного процесу.....	17
1.4 Аналітичний огляд методів керування асинхронними двигунами.....	20
1.4.1 Скалярне керування	20
1.4.2 Векторне керування	21
1.5 Вимоги до електроприводу та вибір системи керування.....	23
2 РОЗРАХУНОК ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА	27
2.1 Розрахунок номінальних даних двигуна та редуктора.....	28
2.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна	30
2.3 Перевірка двигуна за перевантажувальною здатністю	33
3 ПРОЄКТУВАННЯ АЛГОРИТМУ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ.....	34
3.1 Математична модель асинхронного двигуна	34
3.2 Задача керування асинхронним двигуном.....	36
3.3 Алгоритм непрямого векторного керування швидкістю асинхронного двигуна.....	37
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПРОЄКТОВАНОЇ СИСТЕМИ	40
4.1. Дослідження динамічних характеристик при роботі на номінальній швидкості	40
4.2. Дослідження динамічної поведінки системи векторного керування при зміні моменту навантаження	46

5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА.....	51
5.1. Загальні вимоги та функціональна схема асинхронного електроприводу	51
5.2 Розрахунок основних елементів силової частини	54
ВИСНОВКИ	62
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	64

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АД – асинхронний двигун;
- СД – синхронний двигун;
- ПЧ – перетворювач частоти;
- ПВХ – полівінілхлорид;
- IGBT – (БТІЗ, англ. Insulated-gate bipolar transistor) біполярний транзистор з ізольованим затвором;
- ККД – коефіцієнт корисної дії;
- (a – b) – позначення стаціонарної системи координат;
- (d – q) – позначення системи координат, що орієнтується за вектором i_f ;
- ($u_{1a} - u_{1b}$) – компоненти вектору напруги по осям a, b;
- ($i_{1a} - i_{1b}$) – компоненти вектору струму статора по осям a, b;
- ($i_d - i_q$) – компоненти вектору струму статора по осям d, q;
- ($u_d - u_q$) – компоненти вектору напруги статора по осям d, q;
- ω_0 – кутова швидкість обертання системи координат (d – q);
- ω – кутова швидкість ротора;
- ω_n – номінальна кутова швидкість двигуна;
- M_c – момент навантаження;
- R_1 – активний опір статора;
- R_2' – активний опір ротора;
- L_1 – індуктивність статорної обмотки;
- L_2 – індуктивність роторної обмотки;
- L_μ – індуктивність контуру намагнічування;
- p_n – кількість пар полюсів;
- i_p – передатне число редуктора.

ВСТУП

Хімічна та нафтохімічна промисловість є однією з провідних галузей народного господарства. Прискорений розвиток хімічного машинобудування визначив необхідність вирішення складних завдань щодо забезпечення машин і технологічних ліній хімічних виробництв сучасними електроприводами.

Поява електричного трамвая, метрополітену та електропоїздів призвела до появи в землі блукаючих струмів, які буквально пропалюють металеві трубопроводи. Металеві труби вимагають захисту, що значно збільшує вартість монтажу. Поява нових технологій водопідготовки та водоочищення, а так також підвищене застосування в побуті продуктів хімії призводять до хімічної корозії трубопроводу – як наслідок, заростання внутрішнього перерізу.

Труби із пластику володіють незаперечними перевагами у порівнянні з іншими матеріалами, зокрема з металами. Щільність полімерів, особливо поліолефінів, невисока, що дає конструкції низьку масу. Такі трубопроводи не схильні до корозії, на них з часом з'являється набагато менше відкладень, вони, як правило, не розриваються при допущенні замерзання води всередині труби, не електропровідні і мають низькі втрати тепла. Полімерні труби досить екологічні та придатні до вторинної переробки. Незважаючи на посилену в 21 столітті кампанію проти пластику, практично ніхто з екологів не виступає за заборону труб, на відміну від пластикового посуду і одноразових виробів.

Метою даного проекту є розробка електроприводу мобільного комплексу для виготовлення полімерних труб. Це відносно нова технологія, можливості якої ще не повністю розкриті на сьогоднішній день.

Такий мобільний комплекс має ряд суттєвих переваг у порівнянні зі стаціонарними:

- мобільність – виробництво кінцевого продукту потрібного діаметра в мобільному цеху на місці закладки труби з мінімальним енергоспоживанням від автономної енергетичної установки.

- якість – за своїми технічними характеристиками, кінцева продукція не поступається звичним стаціонарним підприємствам;
- ціна – а) абсолютно нова стратегія ціноутворення доставки і монтажу фінальної продукції за рахунок зменшення кількості стиків і відсутності транспортних витрат на доставку фінальної продукції (виробництво на місці монтажу); б) зниження капітальних витрат на організацію виробництва за рахунок застосування однієї і тієї ж виробничої лінії для труб різних діаметрів;
- швидкість – радикальне зменшення часу прокладки трубопроводу.

Даний проєкт пропонує вирішення проблем, які виникають при розробці такої установки, а саме:

- проблема підтримання швидкості обертання двигунів при зміні моменту навантаження – при прикладанні навантаження, швидкість необхідно підтримувати на заданому рівні, для цього пропонується розробка системи керування, яка здатна регулювати швидкість двигунів з високою точністю;
- проблема синхронізації роботи двигунів – при регулюванні швидкості, існує ймовірність розбіжностей значень швидкостей двигунів, так званої «конкуренції», при якій один з двигунів штовхає, а інший пригальмовує заготовку, що призводить до порушення технології виготовлення труби і, в результаті, її низьку якість.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Загальна інформація про виготовлення полімерних труб

Сьогодні полімерні труби займають лідируюче місце у застосуванні в різноманітних трубопроводах. Вони набули широкого поширення завдяки порівняно невисокій вартості, довговічності і надійності в експлуатації. Їх використовують, в основному, для трубопроводів різного призначення, по яких транспортують воду та інші рідини, газоподібні речовини. Інша популярна сфера застосування - прокладка кабелів зв'язку, електричних, оптико-волоконних, де вони використовуються як захисна оболонка. Існують такі види полімерних труб: поліетиленові, поліпропіленові, полівінілхлоридні (ПВХ), полібутенові та металополімерні.

Одним з найпоширеніших матеріалів для виготовлення труб є поліетилен, полівінілхлорид, поліпропілен. Труби з різних матеріалів мають унікальні властивості і переваги перед іншими.

Досвід досліджень показує, що труби з полімерних матеріалів можуть перебувати в експлуатації без істотних хімічних і механічних змін протягом 50 і більше років. Полімери мають високі експлуатаційні показники, і більшість полімерів володіють водовідштовхувачими властивостями. Технологічний процес їх виробництва дозволяє забезпечити вкрай низьку шорсткість внутрішньої поверхні труб, тому тертя між рідиною і поверхнею труб незначне. Крім того, при тривалій експлуатації внутрішній переріз труб не зменшується через наростання відкладень, а отже немає необхідності, як у випадку з іншими трубами, збільшувати витрати на електроенергію для перекачування [1].

Переваги прокладки полімерних трубопроводних систем дуже добре проявляються на прикладі використання поліетиленових труб [2]:

- низька вартість виробництва, транспортування (майже вдвічі) і монтажу (в 2-2,5 рази);

- прокладка трубопроводу прискорюється не менше ніж в десять разів;
- екологічність, що досягається щадними методами прокладки;
- еластичність дозволяє вирішувати проблеми, пов'язані з поворотами траси;
- низька шорсткість обумовлює більшу на 10-15% пропускну здатність;
- висока антикорозійна стійкість позбавляє від необхідності додаткової ізоляції, облаштування електрохімічного захисту;
- виключаються витрати на утримання висококваліфікованого персоналу і перевірку зварних з'єднань;
- ймовірність помилок з боку операторів зводиться до мінімальної автоматизацією процесу монтажу.

До того ж обслуговування трубопроводу, прокладеного з поліетиленових труб, вимагає зовсім незначних витрат, а пропрацює він як мінімум два з половиною десятиліття.

До недоліків полімерних труб слід віднести залежність їх міцності (граничного робочого тиску) і довговічності від температури, а також невисокі граничні робочі температури (як правило, не вище 95° C). Крім того, у полімерів високий температурний коефіцієнт лінійного розширення (в 10 разів вище, ніж у металів). Полімерні труби горючі (до важкогорючих відноситься тільки полівінілхлорид).

1.2 Технології виготовлення полімерних труб

На даний час існують такі технології виготовлення полімерних труб:

- 1) Екструзія цілнопілімерної труби (рис. 1.1). В цій технології відбуваються такі основні процеси: нагрів термопласта – формування діаметра – водяне охолодження. Але вона має недолік – зі

збільшенням діаметра збільшується габаритні розміри і ціна обладнання. Дані види труб застосовуються для напірних мереж. Для каналізаційних, дренажних та інших мереж великого діаметру застосування екструзійних труб економічно не обґрунтоване.

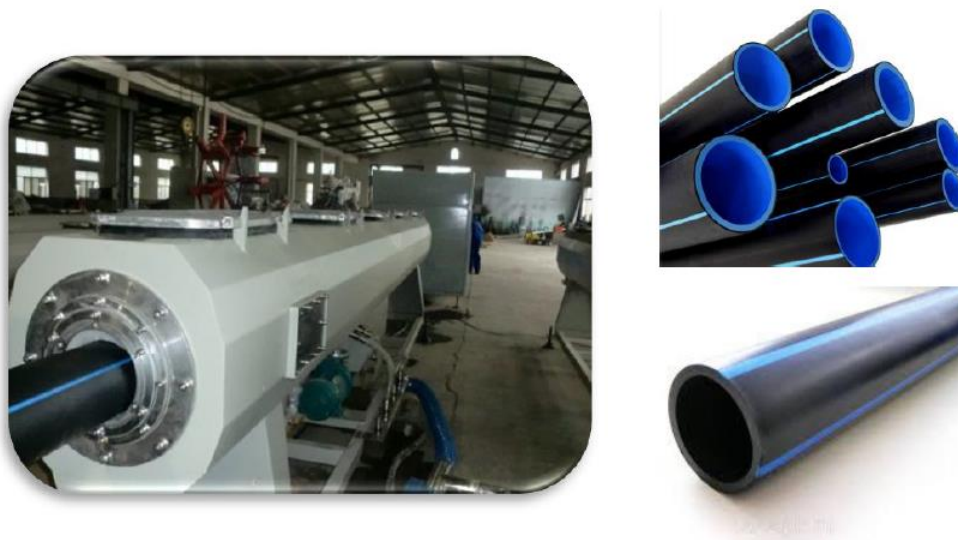


Рисунок 1.1 – Цільнополімерні труби

- 2) Труби з профільованою стінкою (рис. 1.2), які можуть досягати 3500 мм в діаметрі. Вони, в свою чергу, поділяються на гофровані та спіральновиті.



Рисунок 1.2 – Труби з профільованою стінкою

Гофровані труби використовують для зливової, безнапірної, санітарної, промислової і внутрішньої каналізації. Труба труба має виїмки, розташовані на однаковій відстані одна від одної. Ці виїмки розташовані по всій довжині

труби. Такий гофрований профіль забезпечує необхідну кільцеву жорсткість. У порівнянні з гладкими трубами гофровані в рази перевершують їх по стійкості і міцності.

Головне призначення інженерних систем, складених з спіральновитої продукції – це створення напірних і безнапірних трубопроводів великих діаметрів. Монтаж таких конструкцій зазвичай проводиться при будівництві колекторів технічних і зливних каналізацій, напірних механізмів і дюкерів, промислових стоків, споруд для проведення меліоративних заходів, дренажних систем. Іншою сферою застосування спіральновитих труб великого діаметру є виготовлення накопичувальних резервуарів, колодязів і ємностей для технічної та питної рідини.

Спіральновиті труби, також як і гофровані є трубами, які прогинаються під дією зовнішнього навантаження, створюваного вагою ґрунту, транспорту на поверхні або тиску підземних вод. Величина прогину залежить від жорсткості труби, підтримки навколишнього ґрунту і зовнішніх навантажень. Це є головною відмінністю пластикових труб від труб з жорсткою стінкою. Справа в тому, що навантаження у сталевих, чавунних або залізобетонних трубах розподіляється по всій поверхні труби і передається в фундамент під трубою.

В даному проєкті розробляється установка мобільного комплексу для виготовлення спіральновитих профільованих труб. Дана технологія складається з двох незалежних етапів:

- 1) в стаціонарних умовах виробляються напівфабрикати - профіль, намотаний на великогабаритні бобіни (рис. 1.3, а). Це аналог екструзії полімерних трубок найменших діаметрів.
- 2) Зварювальний модуль формує необхідний діаметр труби методом спіральновитих зварювання (рис. 1.3, б).



а)



б)

Рисунок 1.3 – Виготовлення спіральновитих профільованих труб

1.3 Опис технологічного процесу

Схематичне зображення установки для виготовлення профільованих спіральновитих полімерних труб показано на рисунку 1.4.

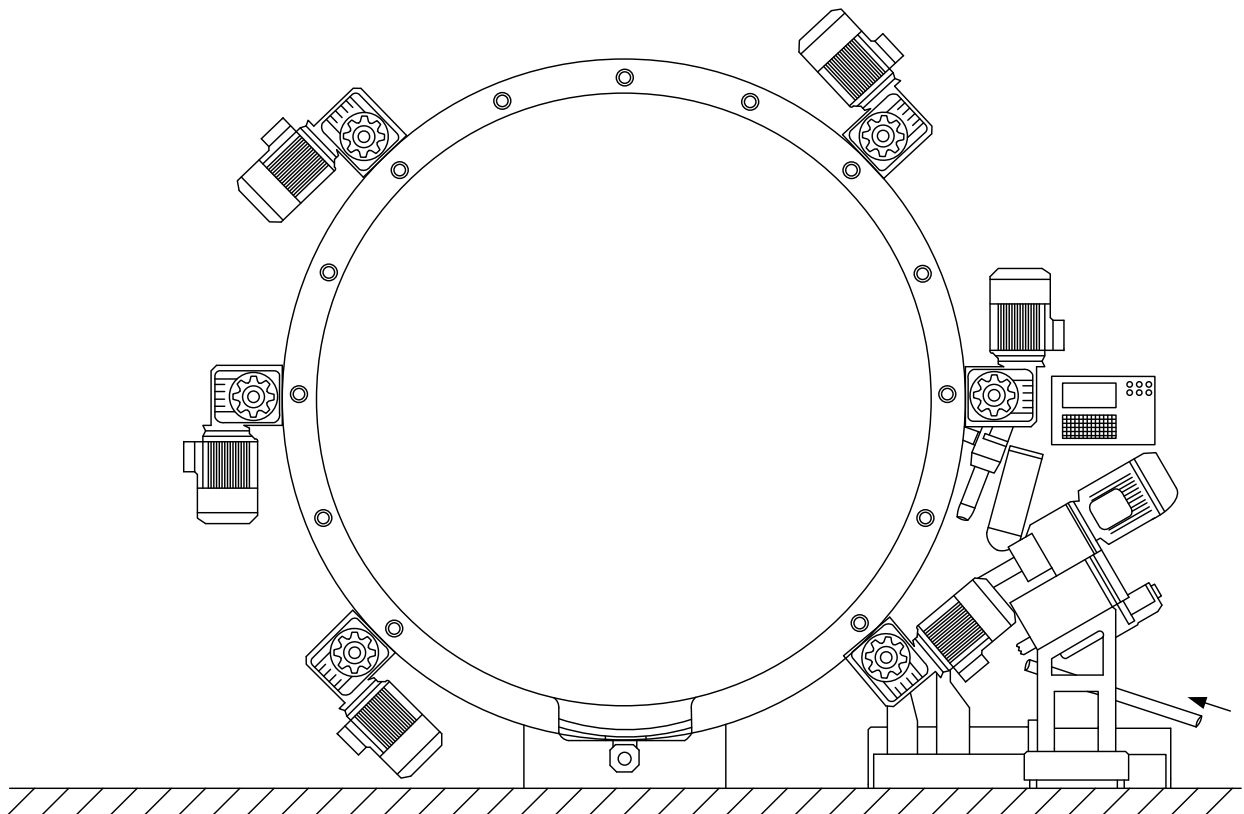


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення загального виду установки

Модель установки, розроблена в середовищі Solidworks, представлена на рисунку 1.5.

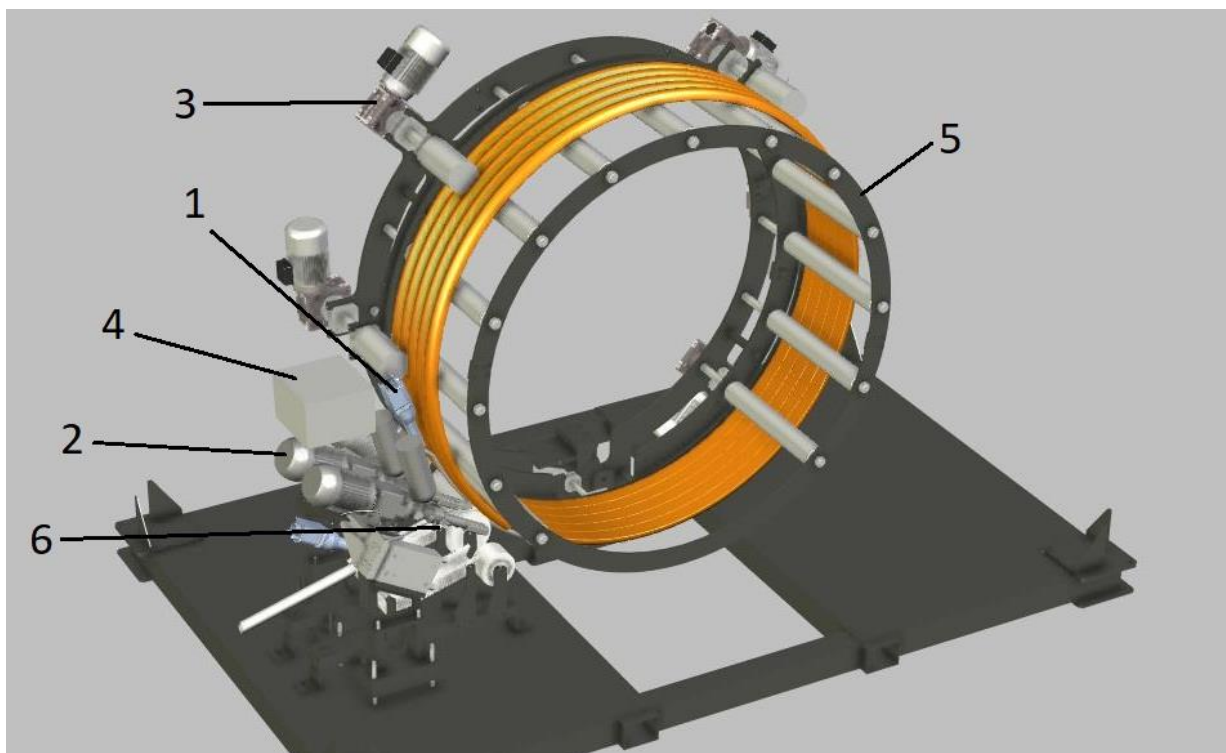


Рисунок 1.5 – Модель установки в середовищі Solidworks

Основними елементами установки є:

- 1 – нагнітач гарячого повітря (тепловентилятор) – нагріває заготовку (трубки малого діаметру) до необхідної для формування температури;
- 2 – зварювальний екструдер;
- 3 – мотор-редуктор – проstownує заготовку по формуючому корпусу;
- 4 – блок керування;
- 5 – формуючий корпус – надає нагрітому матеріалу потрібну форму;
- 6 – енкодер – призначений для перетворення кута повороту обертового об'єкта (вала) в електричний сигнал, що дозволяє визначити кут його повороту.

Принцип роботи установки наступний: труба формується з трьох шарів, які накладаються один на одний. Перед тим, як подати заготовки на формуючий корпус, вони нагріваються за допомогою тепловентилятора до необхідної температури. Після нагрівання, заготовки за допомогою валів мотор-

редукторів подаються на формуючий корпус. Далі вони проходять на зварювальні екструдери, які з'єднують стики між намотаними шарами. Під час виконання цієї послідовності дій, заготовка поступово проштовхується вздовж формуючого корпусу по спіралеподібній траєкторії. Це відбувається до того моменту, поки не буде отримано готову трубу потрібної довжини.

Робота всієї установки залежить від температури нагрівання та швидкості подачі матеріалу. Для забезпечення точності роботи механізму, в установці передбачений датчик швидкості – енкодер, який передає інформацію на блок керування. Від нього залежить, як швидко буде подаватись матеріал на установку і якою буде температура нагрівання, щоб забезпечити правильну технологію формування труби.

Готова спіральновита труба має таку структуру (рис. 1.5):

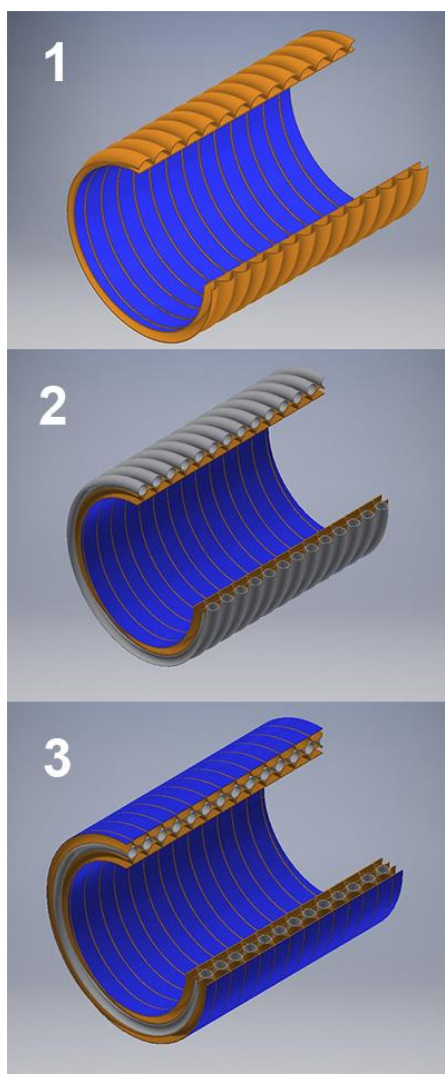


Рисунок 1.6 – Структура спіральновитої труби

Технологія виробництва спіральновитих труб з пластику дозволила вирішити принципову проблему полімерних труб великого діаметру, яка дозволить в недалекому майбутньому потіснити інші види труб для каналізаційних і дренажних систем - це суттєве зменшення маси труби при високих показниках її кільцевої жорсткості.

1.4 Аналітичний огляд методів керування асинхронними двигунами

З метою регулювання кутової швидкості обертання ротора, а також обертового моменту на валу сучасних безщіткових двигунів, застосовують або векторне, або скалярне керування електроприводом.

1.4.1 Скалярне керування

Найбільшого поширення набуло скалярне керування асинхронним двигуном, коли для керування, наприклад, швидкістю обертання вентилятора або насоса, досить підтримувати постійну швидкість обертання ротора, для цього вистачає сигналу зворотного зв'язку від датчика тиску або від датчика швидкості [3].

Принцип скалярного керування полягає в наступному: амплітуда напруги живлення є функцією частоти, причому відношення напруги до частоти виявляється приблизно постійним (рис. 1.6).

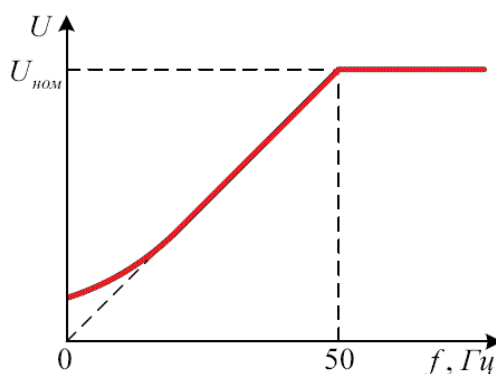


Рисунок 1.7 – Скалярне керування

Конкретний вид цієї залежності пов'язаний з навантаженням на валу, однак принцип залишається таким: підвищуємо частоту, а напруга при цьому пропорційно підвищується в залежності від характеристики навантаження даного двигуна.

В результаті магнітний потік в зазорі між ротором і статором підтримується майже постійним. Якщо ж відношення напруги до частоти відхилити від номінального для даного двигуна, то двигун або перезбудиться, або недозбудиться, що призведе до втрат в двигуні і до збоїв в робочому процесі.

Таким чином, скалярне керування дозволяє досягти майже постійного моменту на валу в робочому діапазоні частот незалежно від частоти, однак на низьких швидкостях, момент все ж знижується (щоб цього не сталося, необхідно підвищити відношення напруги до частоти), тому для кожного двигуна має місце суворо визначений робочий діапазон скалярного керування.

Крім того, неможливо побудувати систему скалярного регулювання швидкості без датчика швидкості, встановленого на валу, тому що навантаження сильно впливає на відставання реальної швидкості обертання ротора від частоти напруги живлення. Але навіть з датчиком швидкості, при скалярному керуванні не вийде з високою точністю регулювати момент (принаймні так, щоб це було економічно доцільно).

В цьому і полягають недоліки скалярного управління, що пояснюють відносну нечисленність сфер його застосування, обмежених в основному звичайними асинхронними двигунами, де залежність ковзання від навантаження не є критичною.

1.4.2 Векторне керування

Для позбавлення від перелічених вище недоліків, в далекому 1971 році інженери компанії Siemens запропонували використовувати векторне керування двигуном (рис. 1.7), при якому контроль здійснюється зі зворотним

зв'язком по величині магнітного потоку. Перші системи векторного керування містили датчики потоку в двигунах [3].

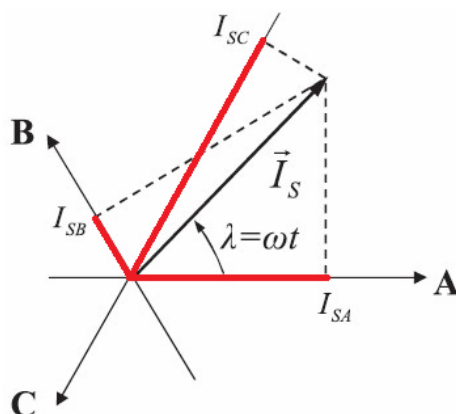


Рисунок 1.8 – Векторне керування

Сьогодні підхід до даного методу дещо інший: математична модель двигуна дозволяє розраховувати швидкість обертання ротора і момент на валу в залежності від поточних струмів фаз (від частоти і величин струмів в обмотках статора). Цей більш прогресивний підхід дає можливість незалежно і майже безінерційно регулювати як момент на валу, так і швидкість обертання валу під навантаженням, так як в процесі керування враховуються ще й фази струмів.

Деякі більш точні системи векторного керування оснащені схемами зворотного зв'язку за швидкістю, при цьому системи керування без датчиків швидкості називаються бездатчиковими.

Так, в залежності від області застосування того чи іншого електроприводу, його система векторного керування буде мати свої особливості, свій ступінь точності регулювання. Коли вимоги до точності регулювання швидкості допускають відхилення до 1,5%, а діапазон регулювання - не перевищує 1 до 100, то бездатчикова система цілком підійде. Якщо ж потрібна точність регулювання швидкості з відхиленням не більше 0,2%, а діапазон зводиться до 1 до 10000, то необхідна наявність зворотного зв'язку по датчику швидкості на валу. Наявність датчика швидкості в системах векторного керування дозволяє точно регулювати момент навіть при низьких частотах до 1 Гц.

Отже, векторне керування дає наступні переваги:

- високу точність керування швидкістю обертання ротора (і без датчика швидкості на ньому) навіть в умовах динамічно змінюваного навантаження на валу, при цьому ривків не буде;
- плавне і рівне обертання валу на малих швидкостях;
- високий ККД в результаті низьких втрат в умовах оптимальних характеристик напруги живлення.

Не обходиться векторне керування і без недоліків:

- складність обчислювальних операцій;
- необхідність задавати вихідні дані (параметри регульованого приводу).

1.5 Вимоги до електроприводу та вибір системи керування

Основними технологічними параметрами є:

- швидкість формування труби, тобто швидкість обертання валів мотор-редукторів;
- температура нагрівання матеріалу, що подається;
- швидкість подачі матеріалу на установку;
- швидкість процесу зварювання;

Електропривод повинен надійно забезпечувати:

- необхідний для роботи екструдера обертаючий момент у всьому робочому діапазоні частоти обертання черв'яка;
- регулювання швидкості в невеликому діапазоні;
- при роботі з декількома приводними валами привод повинен забезпечувати синхронізацію роботи приводних валів.

Від стабільної та безперебійної роботи зварювального екструдера залежить робота всієї установки. Так як процес виробництва технологічно безперервний, то вихід з ладу обладнання екструдера може привести до втрати міцності

готового продукту і створення аварійної обстановки. Тому до приводу екструдера пред'являються підвищені вимоги щодо безперебійності роботи, надійності. Для забезпечення надійної і безперебійної роботи екструдера необхідно дотримуватися ряду вимог з обслуговування установки.

Розглядаються системи регульованого електроприводу, так як потрібно забезпечувати плавні перехідні процеси. Також, розглядаються системи змінного струму, оскільки двигуни постійного струму дорогі в ремонті та мають відносно ненадійний щітково-колекторний механізм. Керувати двигунами змінного струму буде відбуватись за допомогою перетворювачів частоти, оскільки це забезпечує високий ККД, надійність і гнучкість керування електроприводом.

Для вибору системи, проведемо аналіз існуючих систем електроприводу:

- перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ-АД);
- перетворювач частоти – синхронний двигун (ПЧ-СД);
- керований випрямляч.

Порівнюємо їх та оберемо ту, що відповідає вимогам, вказаним в пункті 1.5.

Система перетворювач частоти - асинхронний двигун (ПЧ-АД) має наступні позитивні характеристики [4]:

- високі енергетичні характеристики електропривода;
- високі регульовальні характеристики;
- ефективний захист електричного двигуна і всього електропривода від можливих аварійних ситуацій;
- можливість формування необхідних робочих діаграм швидкостей з заданими прискореннями;
- постійний контроль за станом електричного двигуна;
- збільшення строку служби технологічного устаткування;
- зниження витрат на планові ремонтні роботи;

- забезпечення оперативного керування та достовірного контролю за ходом технологічного процесу;
- можливість використання енергозберігаючих режимів роботи електропривода.

Система перетворювач частоти - синхронний двигун (ПЧ-СД), в більшості, має ті ж позитивні характеристики, що й попередня. Відмінність полягає в організації живлення та керування приводним двигуном. Можливості електропривода з такою системою:

- відсутність редуктора;
- можливість реалізації прямого керування моментом;
- потужність електропривода може досягати 6,3 МВт і вище;
- низький склад гармонік призводить до зменшення втрат в синхронному двигуні;
- висока надійність;
- високі динамічні та регульовальні характеристики.

Окрім великої кількості можливостей та переваг частотного електропривода необхідно акцентувати увагу на проблемах на шляху широкого впровадження цих систем на підприємствах:

- великі капітальні витрати, пов'язані з придбанням перетворювача частоти і заміною існуючого електродвигуна;
- необхідність в додатковій примусовій вентиляції електродвигуна (при роботі на малих швидкостях);
- необхідно забезпечувати захист перетворювача частоти від впливу зовнішнього середовища;
- необхідно використовувати в гальмівних режимах блок резисторів, що відображується на вартості електропривода;
- необхідно збільшувати уставлену потужність електропривода;
- необхідність використання додаткових фільтрів для усунення впливу перетворювача частоти на мережу живлення.

Система керований випрямляч - двигун постійного струму дозволяє плавно регулювати швидкість в широкому діапазоні, забезпечує плавний пуск конвеєра, високі динамічні показники, зручність управління. Але має такі недоліки, як: дуже висока вартість двигуна, високі витрати на обслуговування через наявність щіткового контакту, гірші масогабаритні показники в порівнянні з асинхронними двигунами.

Провівши аналіз даних систем, було прийнято рішення обрати систему перетворювач частоти - асинхронний двигун (ПЧ-АД). Головними перевагами асинхронних двигунів є те, що вони мають меншу вартість, малий момент інерції, високий ступінь захисту і відсутність потреби в дорогому обслуговуванні. Система ПЧ-АД повністю задовольняє вимоги до електропривода установки для виготовлення полімерних труб, а отже є доцільним її використання в даному проєкті.

2 РОЗРАХУНОК ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА

В дослідницькій лабораторії Інституту електродинаміки НАН України розробляється установка для виготовлення труб, що складається з асинхронних двигунів, тепловентиляторів, зварювального екструдера та різних датчиків.

За попередніми дослідженнями, що були проведені під час переддипломної практики, на експериментальній установці в лабораторії, розраховано необхідну потужність двигунів, які будуть використовуватись в установці – 1.1 кВт. Таких двигунів використовується 7 штук. Тому загальна потужність установки дорівнює: $P_{\text{заг}} = 7 \cdot 1.1 = 7.7$ кВт.

Виберемо, в якості виконавчого механізму, мотор-редуктор SITI MU75 90-S4 [5] потужністю 1.1 кВт.

Мотор-редуктори представляють пристрій, що сполучає електричний двигун і редуктор. Завдяки високому ККД, компактності, простому обслуговуванню, механізми застосовуються у всіх галузях промисловості, сільському господарстві [6].

Паспортні дані двигуна SITI MU75 90-S4 представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Паспортні дані мотор-редуктора SITI MU75 90-S4

Величина	Значення
Параметри електродвигуна	
Номінальна потужність P_{2n} , кВт	1.1
Номінальна лінійна напруга обмотки статора U_{1n} , В	380
Коефіцієнт корисної дії η	0.76
Номінальна частота обертання двигуна n_1 , об/хв	1400
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$	0.79
Перевантажувальна здатність λ	2.4
Число пар полюсів p_n	2
1	2

1	2
Номінальне ковзання s_n	0.067
Момент інерції J_d , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	0.00220
Критичне ковзання s_k	0.391
Кратність пускового струму k_i	6
Кратність пускового моменту k_n	2.2
Номінальна частота напруги статора f , Гц	50
Параметри редуктора	
Передавальне відношення i_p	40

2.1 Розрахунок номінальних даних двигуна та редуктора

Так як всі двигуни, що використовуються в установці, однакові, то розрахунок проводимо для одного такого двигуна.

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.16 \text{ (рад/с)}. \quad (2.1)$$

Синхронна кутова швидкість обертання двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ (рад/с)}, \quad (2.2)$$

$$\text{де } n_0 = \frac{60 \cdot f}{p_n} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ (об/хв)}.$$

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - s_n) = 157 \cdot (1 - 0.067) = 146.5 \text{ (рад/с)}. \quad (2.3)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{1100}{146.5} = 7.5 \text{ (Нм)}. \quad (2.4)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності λ):

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 2.4 \cdot 7.5 = 18 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (2.5)$$

Номінальне діюче значення фазної напруги:

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ (В)}. \quad (2.6)$$

Номінальний діючий струм статора:

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{1100}{3 \cdot 220 \cdot 0.76 \cdot 0.79} = 2.78 \text{ (А)}. \quad (2.7)$$

Амплітудне значення фазної напруги:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ (В)}. \quad (2.8)$$

Амплітудне значення струму статора:

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 2.78 = 3.92 \text{ (А)}. \quad (2.9)$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу при $R_1 = 0$:

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{311}{314.16} = 0.99 \text{ (А)}. \quad (2.10)$$

Розрахувавши всі необхідні параметри двигуна, можемо розрахувати параметри редуктора.

Знаходимо частоту обертання вихідного валу редуктора:

$$n_2 = \frac{n_1}{i_p} = \frac{1400}{40} = 35 \text{ (об/хв)}. \quad (2.11)$$

Вихідний обертовий момент редуктора при номінальній потужності двигуна:

$$M_2 = M_n \cdot i_p \cdot \eta_2 = 7.5 \cdot 40 \cdot 0.94 = 282 \text{ (Н} \cdot \text{м)}, \quad (2.12)$$

де $\eta_2 = 0.94$ – ККД редуктора (для двоступінчастих черв'ячних редукторів дорівнює в межах $0.94 \div 0.95$).

Розрахуємо максимальний обертовий момент:

$$M_{2\max} = M_n \cdot i_p = 7.5 \cdot 40 = 300 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (2.13)$$

2.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

Для розрахунку статичних і динамічних характеристик асинхронного двигуна знайдемо параметри схеми заміщення [7]. Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна приведена на рисунку 2.1.

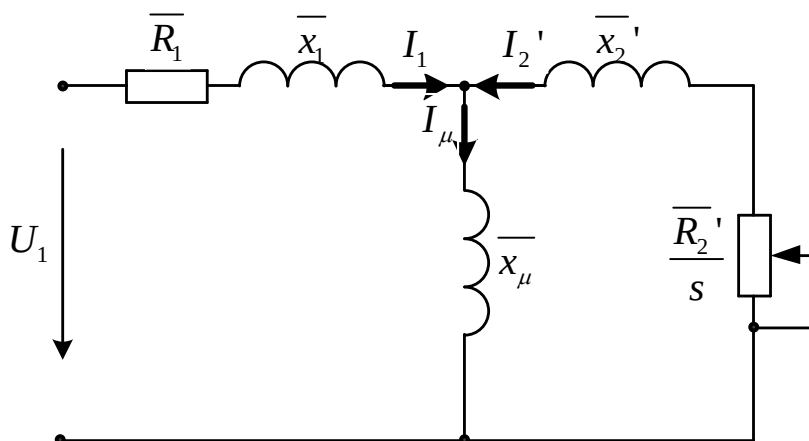


Рисунок 2.1 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Сучасні асинхронні двигуна проєктуються таким чином, що найбільший ККД досягається при навантаженні, на 10-15 % меншому номінального. Коефіцієнт потужності при навантаженні рівному $0.75 \cdot P_n$ відрізняється від потужності при номінальному навантаженні.

Визначаємо коефіцієнт потужності при частковому навантаженні по каталогу [8] і приймаємо рівним

$$\cos \varphi_{p_*} = 0.74. \quad (2.8)$$

Коефіцієнт навантаження двигуна приймаємо $p_* = 0.75$ через вказані вище особливості проєктування асинхронних двигунів.

Тоді струм статора двигуна при частковому навантаженні рівний

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_{дв.н}}{3 \cdot U_{1фн} \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_{p_*}} = \frac{0.75 \cdot 1100}{3 \cdot 220 \cdot 0.76 \cdot 0.74} = 2.2 \text{ (A)}. \quad (2.9)$$

Струм холостого ходу асинхронного двигуна

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_* \cdot I_{1H} (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}{1 - (p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}} =$$

$$\sqrt{\frac{2.2^2 - (0.75 \cdot 2.78 \cdot (1 - 0.067) / (1 - 0.75 \cdot 0.067))^2}{1 - (0.75 \cdot (1 - 0.067) / (1 - 0.75 \cdot 0.067))^2}} = 1.21 \text{ (A)} \quad (2.10)$$

Перед тим, як розрахувати активні та індуктивні опори (параметри схеми заміщення) обмоток статора і ротора, визначаються наступні коефіцієнти:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{1.21}{2 \cdot 6.6 \cdot 2.78} = 1.003; \quad (2.11)$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot \lambda \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 (1 - 0.067)}{2 \cdot 1.003 \cdot 3 \cdot 1100} = 20.5. \quad (2.12)$$

Активний опір ротора, приведений до обмотки статора асинхронного двигуна

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + 1/s_{кр}) \cdot C_1} = \frac{20.3}{(1 + \frac{1}{0.391}) \cdot 1.003} = 5.7 \text{ (Ом)}. \quad (2.13)$$

Активний опір обмотки статора визначається за наступним виразом

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1.003 \cdot 5.7 \cdot 1 = 5.7 \text{ (Ом)}. \quad (2.14)$$

Параметр γ , для визначення опору короткого замикання

$$\gamma = \sqrt{(1/s_{кр}^2) - \beta^2} = \sqrt{(1/0.391^2) - 1^2} = 2.38; \quad (2.15)$$

$$X_k = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 2.38 \cdot 1.003 \cdot 5.7 = 13.6 \text{ (Ом)}. \quad (2.16)$$

Тоді індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора, наближено може бути розрахований:

$$X_2' = 0.58 \cdot X_k / C_1 = 0.58 \cdot 13.6 / 1.003 = 7.9 \text{ (Ом)}. \quad (2.17)$$

Індуктивний опір обмотки статора

$$X_1 = 0.42 \cdot X_k = 0.42 \cdot 13.6 = 5.71 \text{ (Ом)}. \quad (2.18)$$

Індуктивний опір кола намагнічування визначається через значення ЕРС обмотки статора

$$E_1 = \sqrt{(U_{1н} \cdot \cos \varphi_{1н} - R_1 \cdot I_{1фн})^2 + (U_{1н} \cdot \sin \varphi_{1н} - X_1 \cdot I_{1фн})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0.79 - 5.7 \cdot 2.78)^2 + (220 \cdot 0.49 - 5.71 \cdot 2.78)^2} = 182.2 \text{ (В)} \quad (2.19)$$

де $\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = 0.49$ – коефіцієнт реактивної потужності.

Індуктивний опір намагнічування:

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{182.2}{1.21} = 150.6 \text{ (Ом)}. \quad (2.20)$$

Індуктивність обмотки статора, обумовлена потоками розсіювання:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{5.71}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.018 \text{ (Гн)} \quad (2.21)$$

Приведена індуктивність обмотки ротора, обумовлена потоками розсіювання:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_2}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{7.9}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.025 \text{ (Гн)}. \quad (2.22)$$

Результуюча індуктивність, обумовлена магнітним потоком в повітряному зазорі, створюваним сумарною дією полюсів статора (індуктивність контуру намагнічування)

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{150.6}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.48 \text{ (Гн)}. \quad (2.23)$$

Індуктивність статора:

$$L_1 = L_\mu + L_{1\sigma} = 0.48 + 0.018 = 0.498 \text{ (Гн)} \quad (2.24)$$

Індуктивність ротора:

$$L_2 = L_\mu + L'_{2\sigma} = 0.48 + 0.025 = 0.505 \text{ (Гн)} \quad (2.25)$$

Знайдені параметри схеми заміщення електродвигуна представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри схеми заміщення електродвигуна

Параметр	Величина
R_1 , Ом	5.7
X_1 , Ом	5.71
1	2

1	2
$L_{1\sigma}, \text{Гн}$	0.018
$X_{\mu}, \text{Ом}$	150.6
$L_{\mu}, \text{Гн}$	0.48
$R_2', \text{Ом}$	5.7
$X_{2\sigma}', \text{Ом}$	7.9
$L_{2\sigma}', \text{Гн}$	0.025
$L_1, \text{Гн}$	0.498
$L_2, \text{Гн}$	0.505
$X_k, \text{Ом}$	13.6

2.3 Перевірка двигуна за перевантажувальною здатністю

Виконаємо перевірку вибраного двигуна за перевантажувальною здатністю. З технологічного процесу досліджуваної установки відомо, що найбільш велике перевантаження двигуна виникає при пуску двигуна.

Перевірка попередньо обраного двигуна по перевантажувальній здатності здійснюється по максимальному моменту $M_{\text{макс}}$. Повинна виконуватись умова

$$M_{\text{макс}} \leq \lambda M_n, \quad (2.26)$$

де $\lambda = 2.4$ – перевантажувальна здатність.

Максимальний момент $M_{\text{макс}}$ відповідає проміжку часу, коли здійснюється пуск двигуна

Значення M_n було попередньо розраховано в пункті 2.1 (формула 2.5).

$$M_{\text{макс}} = k_{\pi} \cdot M_n = 2.2 \cdot 7.5 = 16.5 \text{ (Нм)}. \quad (2.27)$$

Отже,

$$\begin{aligned} 16.5 &< 2.4 \cdot 7.5 \\ 16.5 &< 18 \end{aligned} \quad (2.28)$$

Дана нерівність показує, що попередньо вибраний двигун підходить по перевантажувальній здатності.

3 ПРОЄКТУВАННЯ АЛГОРИТМУ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Вирішення проблеми векторного керування АД виконується з використанням двох підходів: непрямого та прямого керування. Обидва підходи використовують концепцію керування з орієнтацією по полю електричної машини. При непрямій орієнтації формується задане значення вектора потокозчеплення ротора, яке визначає динамічну поведінку системи координат з асимптотичною орієнтацією по цьому вектору. Другий підхід передбачає використання оціненої за допомогою асимптотичного спостерігача інформації про вектор потокозчеплення ротора [9].

3.1 Математична модель асинхронного двигуна

Динамічна модель короткозамкненого АД в стандартній системі координат статора (a – b) [8]:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) - v\omega, \quad M = \mu(\psi_{2a}i_{1b} - \psi_{2b}i_{1a}), \\ \dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \\ \dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \\ \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha\psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\ \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha\psi_{2b} + p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b},\end{aligned}\tag{3.1}$$

де ω – кутова швидкість ротора,

$(i_{1a}, i_{1b})^T$ – компоненти вектора струму статора в системі координат (a – b),

$(\psi_{1a}, \psi_{1b})^T$ – компоненти вектора потокозчеплень ротора,

$(u_{1a}, u_{1b})^T$ – компоненти вектора напруги статора,

M_c – момент навантаження,

ν – коефіцієнт в'язкого тертя,

p_n – число пар полюсів,

Додатні константи, що відносяться до електричних і механічних параметрів АД, визначаються в такий спосіб:

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}\right), \quad (3.2)$$

$$\beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}, \quad (3.3)$$

$$\mu = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{J L_2}, \quad (3.4)$$

$$\alpha = \frac{L_2}{L_2}, \quad (3.5)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta, \quad (3.6)$$

де J – повний момент інерції ротора, R_1 , R_2 , L_1 , L_2 – опори й індуктивності статора і ротора відповідно, $L_m = \frac{m}{2} L_{12}$ – індуктивність намагнічуючого контуру, p_n – число пар полюсів.

Алгоритми векторного керування АД, як правило, проєктуються та записуються в синхронній системі координат ($d - q$), яка обертається відносно стаціонарної системи координат з швидкістю ω_0 (рис. 3.1).

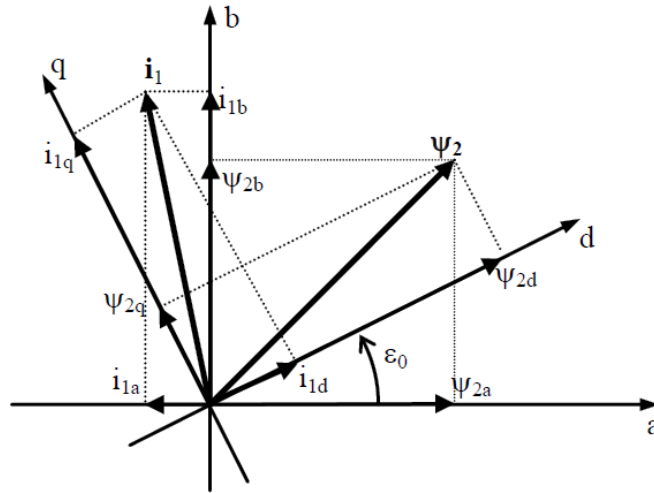


Рисунок 3.1 – Розташування векторів асинхронного двигуна

Перетворення координат визначаються:

$$\begin{aligned} x_{dq} &= e^{-j\varepsilon_0} x_{ab}, \\ x_{ab} &= e^{j\varepsilon_0} x_{dq}, \end{aligned} \quad \text{де } e^{-j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

де x_{yz} позначає двовимірний вектор напруги, потоку і струму статора, ε_0 – кутове положення системи координат (d – q) відносно стаціонарної (a – b).

В загальному формулюванні керування кутовою швидкістю і модулем потокозчеплення ротора, входні змінні, що відпрацьовуються, визначаються так:

$$y = \begin{bmatrix} \omega \\ (\psi_{2a}^2 + \psi_{2b}^2)^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \omega \\ |\psi_2| \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Нехай, ω^* і $\psi^* > 0$ задані значення траєкторії зміни кутової швидкості і модуля потокозчеплення ротора, а похибки відпрацювання визначаються наступним чином:

$$\tilde{\omega} = \omega - \omega^*, \quad \psi = |\psi_2| - \psi^*. \quad (3.9)$$

3.2 Задача керування асинхронним двигуном

Задача керування АД формулюється на наступних припущеннях:

- 1) В моделі двигуна вимірюваними є кутова швидкість ω і струми статора i_{1a}, i_{1b} .
- 2) Параметри двигуна відомі і незмінні.
- 3) Момент навантаження M_c невідомий, але постійний і обмежений.
- 4) Задані траєкторії зміни кутової швидкості ω^* і потокозчеплення $\psi^* > 0$ є обмеженими функціями з обмеженими першою та другою похідними по часу.

В цих умовах для моделі АД (3.1) необхідно спроектувати алгоритм непрямого векторного керування, який забезпечує:

- 1) Глобальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій швидкості – потокозчеплення, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0, \quad (3.10)$$

при умові обмеженості всіх внутрішніх змінних.

- 2) Асимптотичне орієнтування по вектору потокозчеплення ротора

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_q = 0 \quad (3.11)$$

- 3) Асимптотичну лінеаризацію підсистеми швидкості до лінійної повністю керованої форми.
- 4) Асимптотичну розв'язку процесів керування електромеханічними та електромагнітними координатами АД.

3.3 Алгоритм непрямого векторного керування швидкістю асинхронного двигуна

Структура алгоритму непрямого векторного керування кутовою швидкістю АД містить [10; 11]:

- розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*), \quad (3.12)$$

$$\ddot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \ddot{\psi}^* + \dot{\ddot{\psi}}^*), \quad (3.13)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{\psi^*} + \phi, \quad (3.14)$$

де $\psi^*, \dot{\psi}^*, \ddot{\psi}^*$ – задане значення модуля вектора потокозчеплення ротора та його перша і друга похідні відповідно, ϕ – робастифікуючий зв'язок, в стандартному випадку дорівнює нулю.

– регулятор струму по осі (d) (польової складової струму статора)

$$u_{1d} = \sigma(\gamma \dot{i}_{1d}^* - \omega_0 \dot{i}_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_{1d} - x_d), \quad (3.15)$$

$$\dot{x}_d = k_{ii} \tilde{i}_{1d}, \quad (3.16)$$

де $\tilde{i}_{1d} = i_{1d} - i_{1d}^*$ – похибка відпрацювання струму по осі (d); u_{1d} – компонента вектора напруги статора по осі (d), $(k_i, k_{ii}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму.

– регулятор кутової швидкості

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} (-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + v \omega^*), \quad (3.17)$$

$$\dot{\hat{M}}_c = -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \quad (3.18)$$

$$\ddot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} [-k_\omega (-k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q) + \dot{\hat{M}}_c + \ddot{\omega}^* + v \dot{\omega}^*] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} \dot{i}_{1q}^*, \quad (3.19)$$

де $\omega^*, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*$ – задана кутова швидкість, перша і друга похідні відповідно, $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ – похибка відпрацювання кутової швидкості, $(k_\omega, k_{\omega i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора кутової швидкості.

– регулятор струму по осі (q) (моментної складової струму статора)

$$u_{1q} = \sigma(\gamma \dot{i}_{1q}^* + \omega_0 \dot{i}_{1d} + \beta \omega p_n \psi^* - k_{iq} \tilde{i}_{1q} - x_q), \quad (3.20)$$

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПРОЄКТОВАНОЇ СИСТЕМИ

Методом математичного моделювання проведемо дослідження динамічних та статичних характеристик розробленої системи, яке включає:

- Дослідження динамічних характеристик при відомих параметрах АД при виконанні тесту, який включає в себе етапи збудження двигуна, відпрацювання заданої траєкторії кутової швидкості, компенсація постійного номінального моменту навантаження та гальмування двигуна.
- Дослідження динамічної поведінки системи векторного керування при відпрацюванні швидкості $0.5\omega_n$.
- Дослідження динамічних характеристик системи векторного керування при зміні моменту навантаження.

4.1. Дослідження динамічних характеристик при роботі на номінальній швидкості

За допомогою методу математичного моделювання значення кутової швидкості ротора АД, при якому, під час відпрацювання номінального моменту навантаження, модуль вектора напруги статора не перевищує максимально-допустимого значення 311 В, дорівнює $\omega_{\max} = 117.2$ рад/с, при номінальній кутовій швидкості $\omega_n = 146.5$ рад/с.

Умови виконання тесту: за 0.25 с відбувається збудження двигуна, потім, коли потікозчеплення досягає сталого рівня в час рівний 0.6 с, відбувається розгін двигуна від нуля до швидкості 117.2 рад/с; при роботі з постійною швидкістю, в час $t = 1.0$ с, до валу двигуна прикладається номінальний момент навантаження $M_c = 7.5$ Н·м, а через 0.5 с знімається; в час рівний 1.65 с відбувається гальмування двигуна до нульової швидкості.

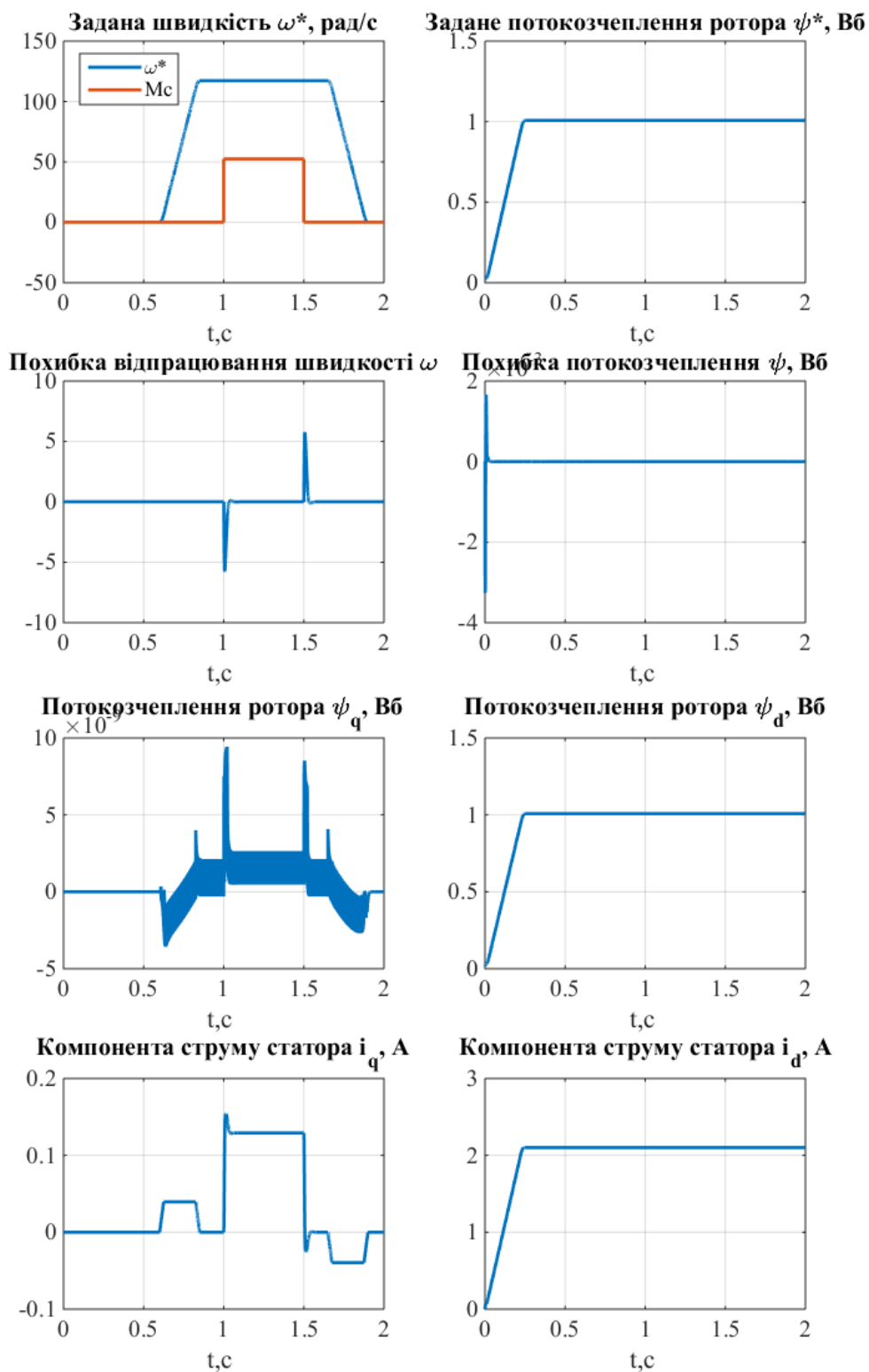


Рисунок 0.1 – Графіки перехідних процесів системи непрямого векторного керування при $\omega^* = \omega_n = 117.2$ рад/с

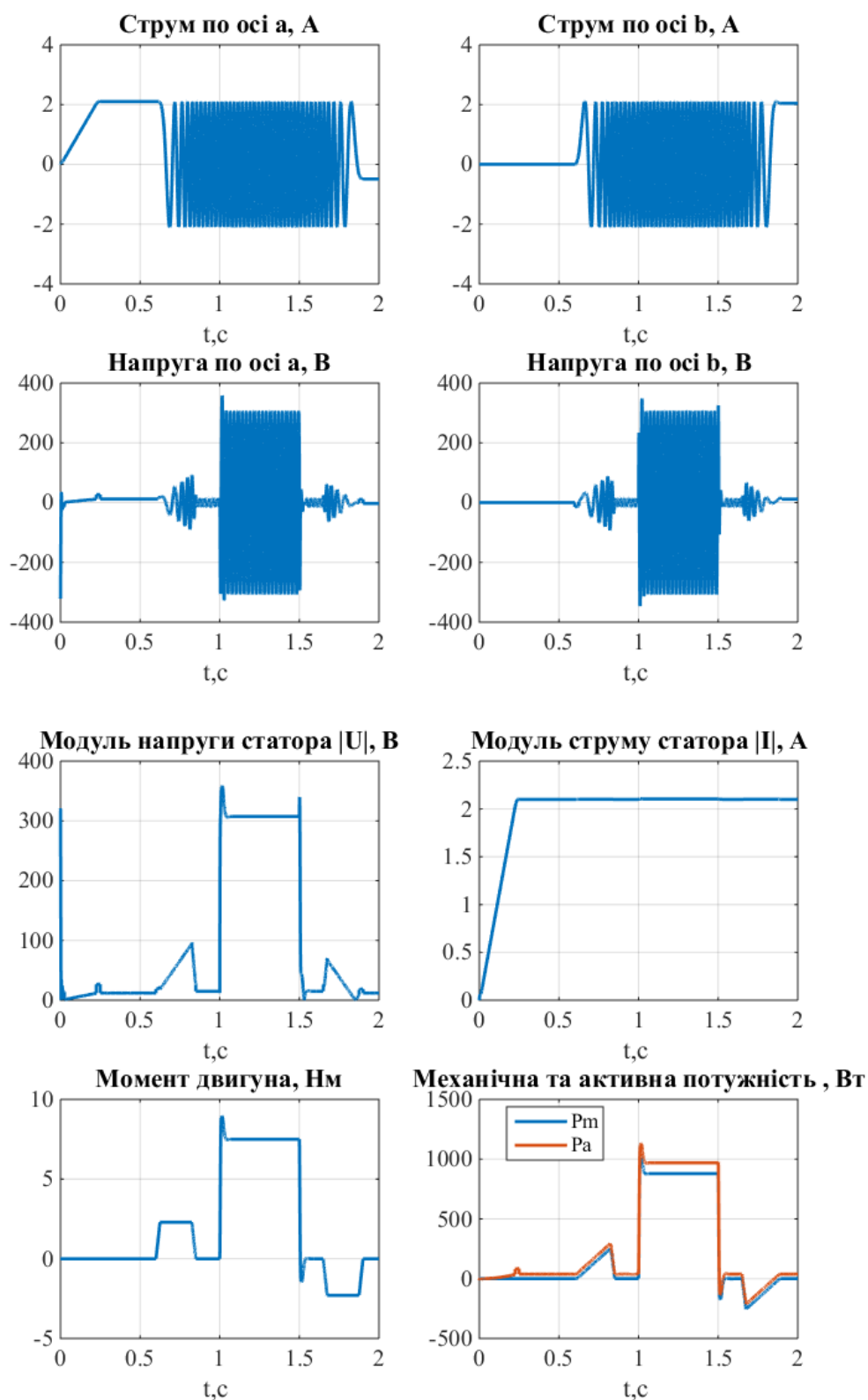


Рисунок 0.2 – Графіки перехідних процесів системи непрямого векторного керування при $\omega^* = \omega_n = 117.2$ рад/с

Отримані графіки перехідних процесів при дослідженні динамічної поведінки системи векторного керування при відпрацюванні швидкості $0.5\omega_n$ представлені на рисунках 4.3 – 4.4.

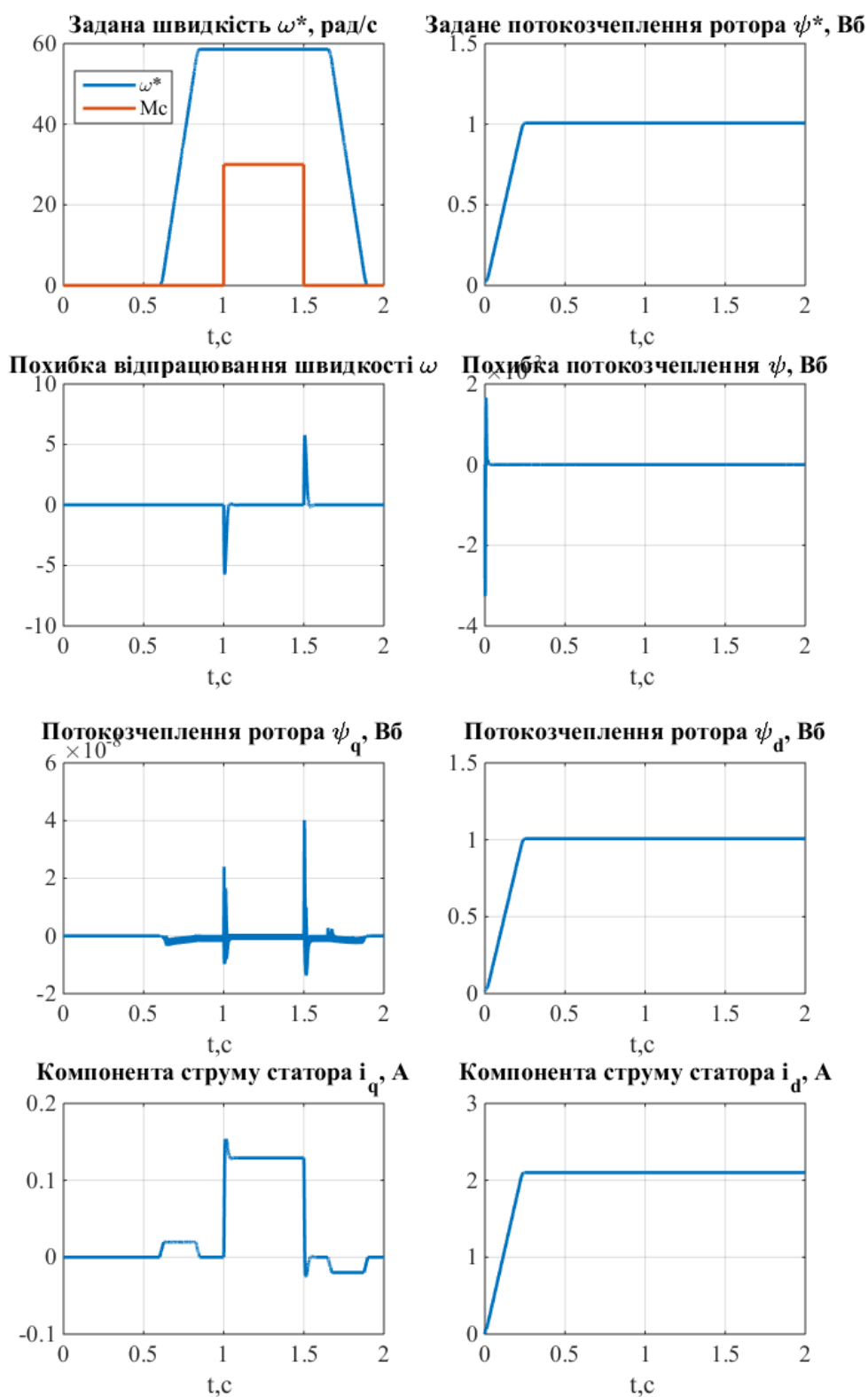


Рисунок 0.3 – Графіки перехідних процесів системи непрямого векторного керування при $\omega^* = 0.5\omega_n = 58.6$ рад/с

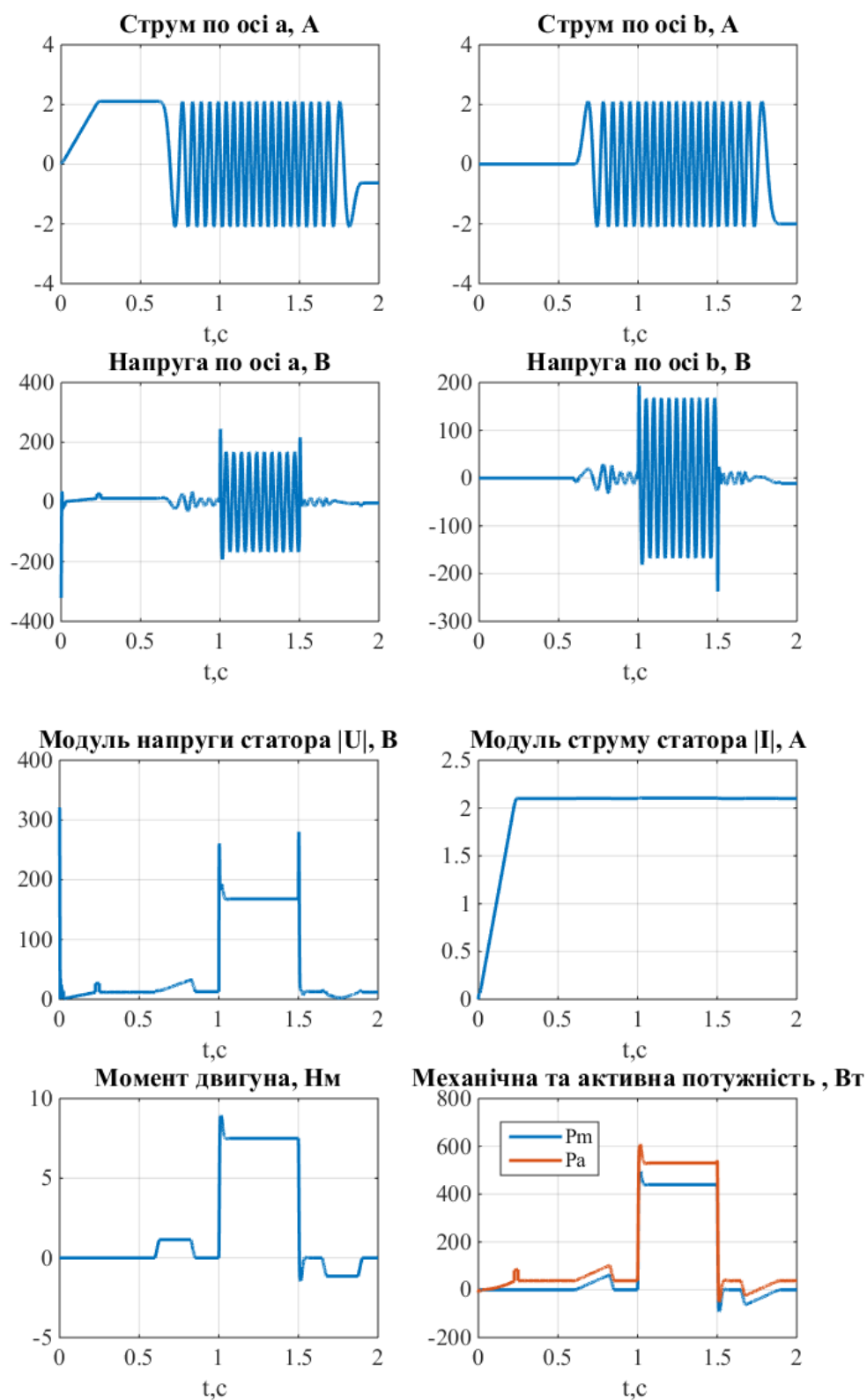


Рисунок 0.4 – Графіки перехідних процесів системи непрямого векторного керування при $\omega^* = 0.5\omega_n = 58.6$ рад/с

На рисунках 4.1 - 4.4 зображені графіки перехідних процесів системи непрямого векторного керування. З графіків видно, що забезпечуються умови

асимптотичного відпрацювання заданих траєкторій похибок відпрацювання кутової швидкості та модуля вектора потокозчеплення ротора:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\tilde{\psi}| = 0.$$

Модуль напруги статора, при накиданні номінального моменту навантаження M_c , збільшується для того, щоб компенсувати дію моменту навантаження і забезпечити відпрацювання кутової швидкості на номінальному рівні.

Компонента струму статора i_d регулює потокозчеплення (польова компонента струму статора), тобто, виконує роль струму збудження як в ДПС і має стрибкоподібний характер тільки на ділянці збудження АД, далі підтримується сталою, так як керування відбувається в першій зоні. Компонента струму статора i_q регулює момент двигуна (моментна компонента струму статора), тобто, являється аналогом струму якоря ДПС і повторює форму моменту двигуна.

Також з отриманих графіків видно, що полеорієнтування з урахуванням похибки модуля вектора потокозчеплення по осі (q), що приблизно дорівнює нулю, і задане потокозчеплення повністю повторює форму вектора потокозчеплення по осі (d). При ідеальному полеорієнтуванні процеси в механічній та електромагнітній підсистемах повністю розв'язані, як це продемонстровано на отриманих графіках перехідних процесів (компонента i_d регулює потокозчеплення, а компонента i_q регулює момент двигуна).

Значення модуля струму статора для проведених тестів суттєво не змінюється. Це спричинено тим, що номінальний момент навантаження не змінюється (тобто, для підтримання заданої кутової швидкості необхідно компенсувати номінальний момент навантаження).

4.2. Дослідження динамічної поведінки системи векторного керування при зміні моменту навантаження

Графіки перехідних процесів при відпрацюванні номінальної швидкості та динамічним моментом $M_c \cdot 200\%$ показані на рисунках 4.5 – 4.6.

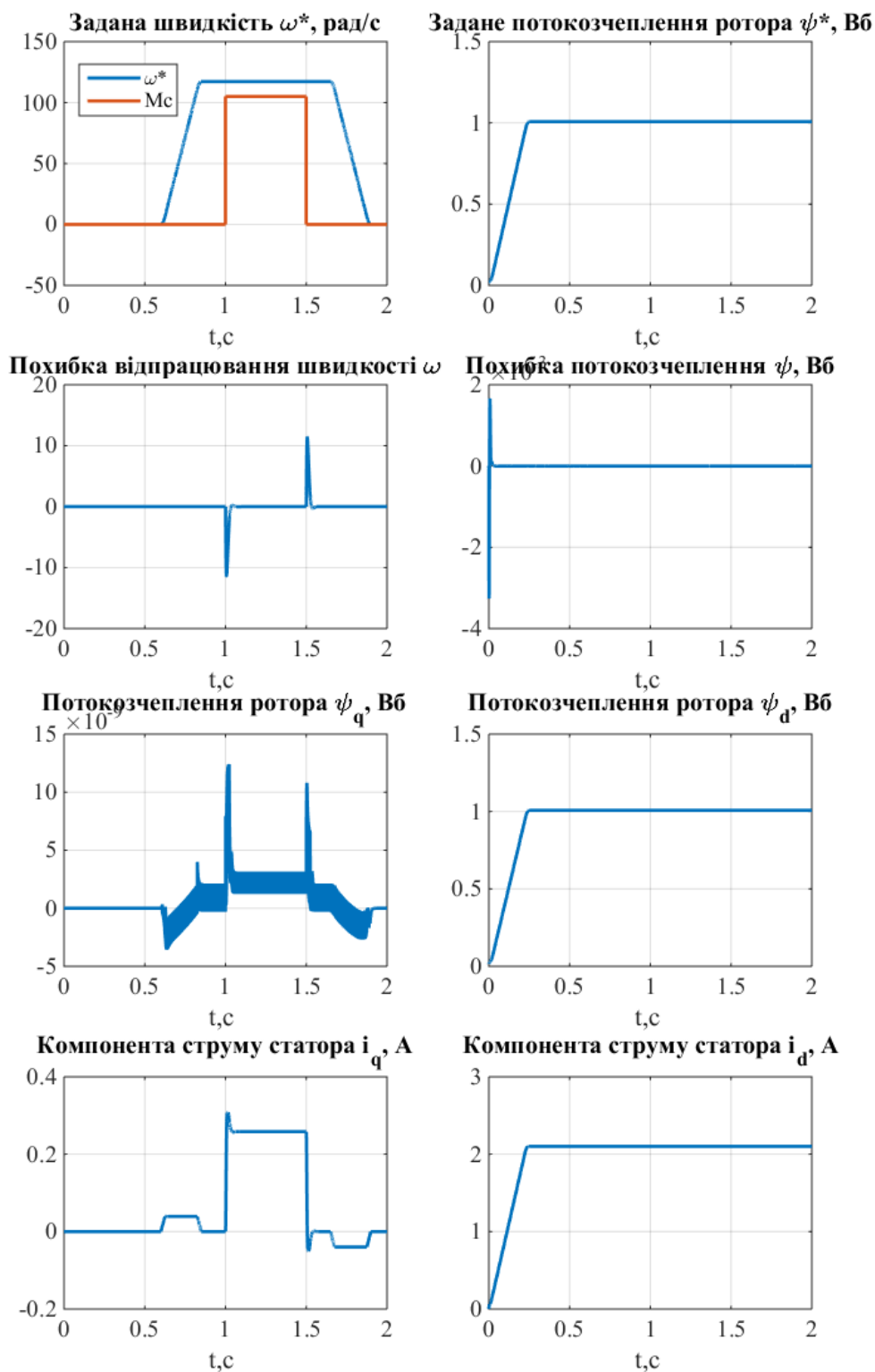


Рисунок 4.5 – Графіки перехідних процесів при відпрацюванні номінальної швидкості та динамічним моментом $M_c \cdot 200\%$

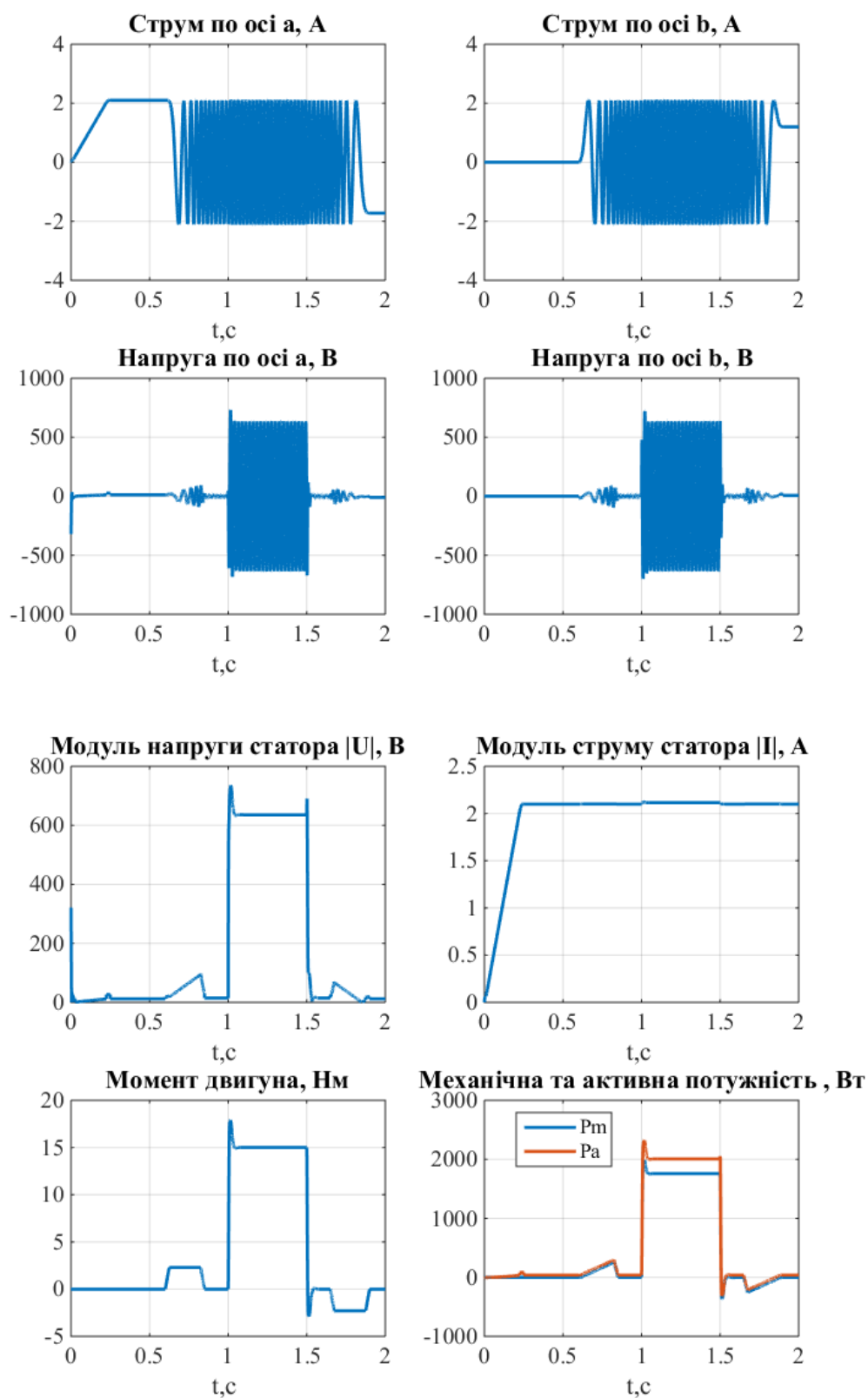


Рисунок 4.6 – Графіки перехідних процесів при відпрацюванні номінальної швидкості та динамічним моментом $M_c \cdot 200\%$

Графіки перехідних процесів при відпрацюванні номінальної швидкості та динамічним моментом $M_c \cdot 50\%$ показані на рисунках 4.7 – 4.8.

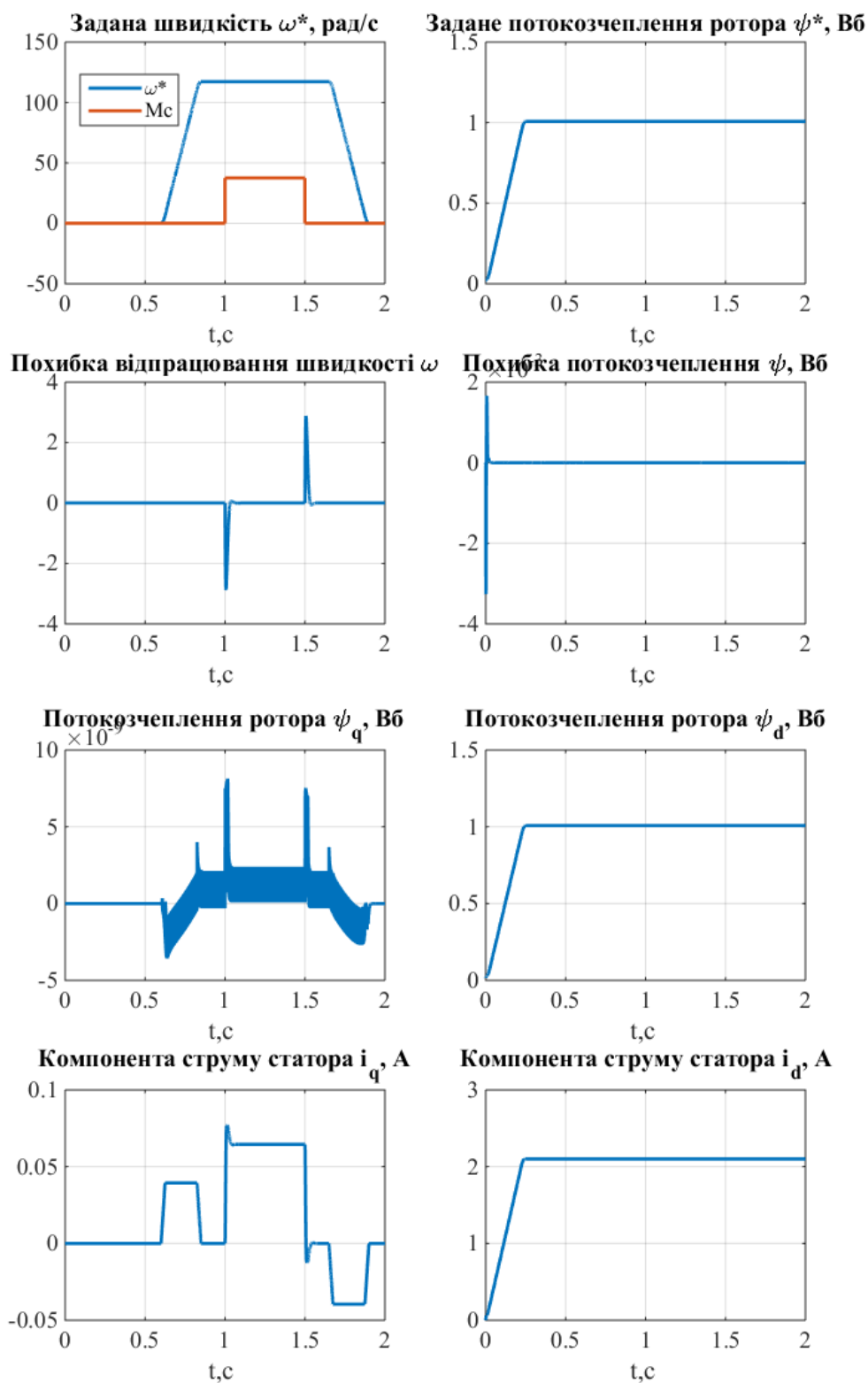


Рисунок 4.7 – Графіки перехідних процесів при відпрацюванні номінальної швидкості та динамічним моментом $M_c \cdot 50\%$

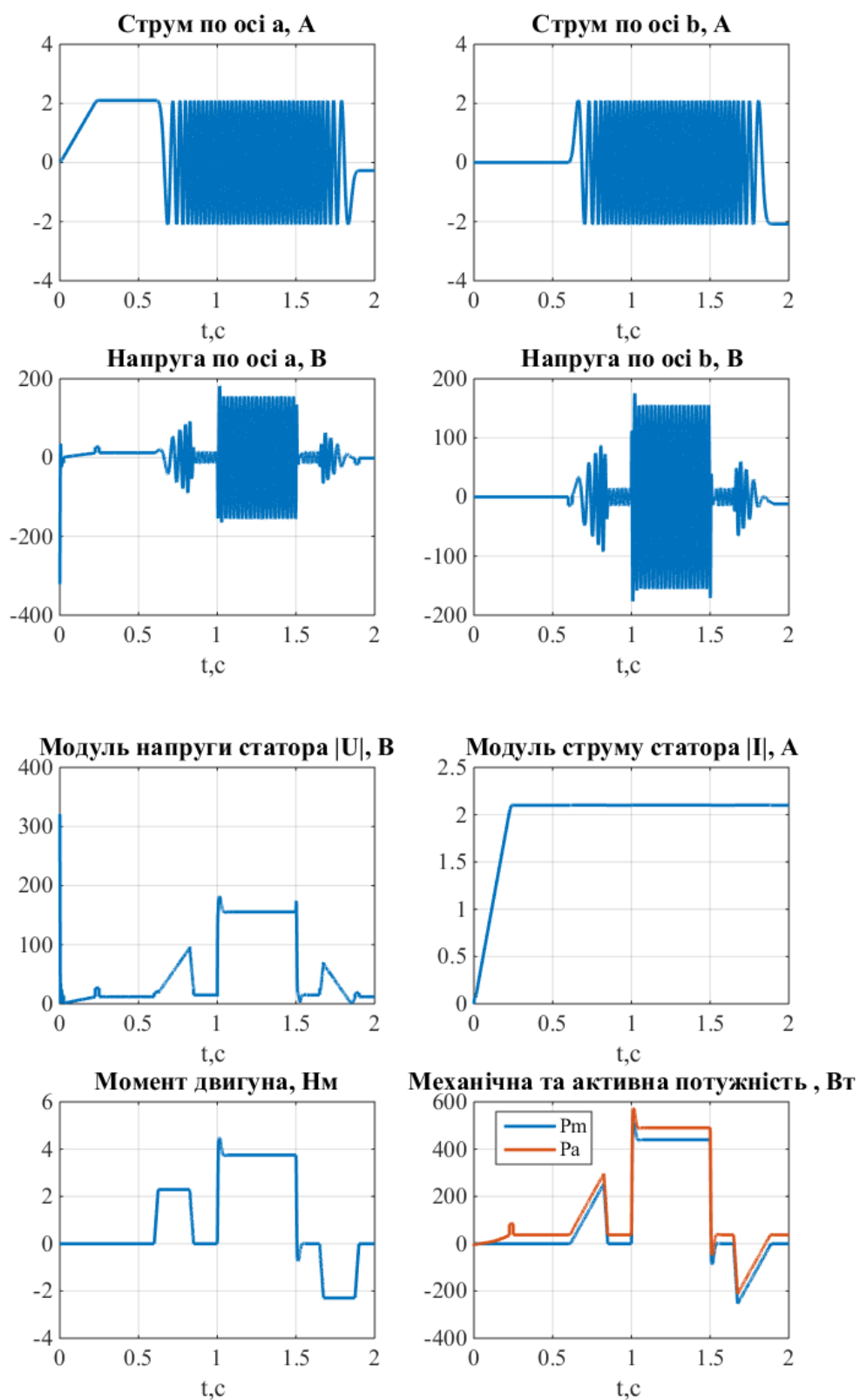


Рисунок 4.8 – Графіки перехідних процесів при відпрацюванні номінальної швидкості та динамічним моментом $M_c \cdot 50\%$

Аналізуючи перехідні процеси, отримані з досліду накидання двократного моменту навантаження, порівнюємо їх з дослідом відпрацювання номінальної швидкості та номінальним моментом:

- 1) збільшилась похибка відпрацювання кутової швидкості і відсоток перерегулювання швидкості тепер становить близько 9.9 %;
- 2) похибка потокозчеплення залишилась незмінною;
- 3) Струм статора i_d не змінився, в той час як, струм i_q збільшився в 2 рази;
- 4) Модуль напруги статора збільшився у 2 рази;
- 5) Відбулось збільшення значень активної та механічної потужності у 2 рази, в порівнянні з дослідом накидання номінального моменту.

При дослідженні перехідних процесів, при накиданні 50% від значення номінального моменту було отримані графіки з такими ж значеннями похибки потокозчеплення, струму i_d , напруг u_a , u_b , у порівнянні з дослідом накидання номінального моменту. Відсоток перерегулювання швидкості зменшився в 2 рази і становить 2.5 %. Значення модуля напруги статора зменшилось в 2 рази, так само як і значення механічної та активної потужностей.

5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

5.1. Загальні вимоги та функціональна схема асинхронного електроприводу

Загальні вимоги до перетворювачів частоти (ПЧ) формуються на основі аналізу технічних характеристик основних виробників, таких як Siemens, ABB, Mitsubishi та ін. [12]:

1. Напруга живлення – 3ф × 380 (В), 50 Гц або 1ф × 220 (В), 50 Гц.
2. Вихідна частота 0...400 (Гц).
3. Алгоритми керування що реалізуються перетворювачами:
 - традиційне частотне керування з квадратичною або лінійною U / f характеристикою з можливістю IR -компенсації та компенсації ковзання;
 - векторне бездатчикове керування;
 - векторне керування з датчиком швидкості.

В стандартній конфігурації електропривод має забезпечувати наступні мінімальні інтерфейсні можливості:

- дискретних гальванічно-розв'язаних входів – 6;
- аналогових входів 0...10 (В) – 1 канал, 4...24 (мА) – 1 канал;
- аналоговий вихід 0...10 (В);
- виходів релейного типу – 2;
- гальванічно розв'язані інтерфейси зв'язку з системами верхнього рівня RS-485, CAN;
- вбудований ПД-регулятор технологічного параметру;
- внутрішній ключ клампера на малих потужностях (до 15 кВт);
- можливість підключення фотоімпульсного датчика швидкості;

- наявність джерел живлення +10 (В) та +24 (В) для обслуговування зовнішніх підключень аналогових та дискретних сигналів.

Функціональна схема сучасного електроприводу змінного струму, побудованого на основі перетворювача частоти з ланкою постійного струму, показана на рисунку 5.1.

Як видно з рисунку 5.1, основу асинхронного електроприводу складає перетворювач частоти, який поєднує в собі перетворюючий та керуючий пристрій з класичного визначення електроприводу. З цієї причини, досить часто перетворювачі частоти називають електроприводами, хоча в загальному випадку це некоректно [13].

Перетворювач поділяється на 2 основні частини: силова частина та керуючий контролер. До силовій частини входять вхідний фільтр, некерований випрямляч, зарядне коло, ємність фільтру випрямляча, клампер, датчик напруги ланки постійного струму, інвертор, датчики вихідного струму, схеми драйверів та гальванічної розв'язки сигналів керування ключами інвертора і клампера, блок живлення.

Керуючий контролер складається з цифрового контролера, який базується на цифровому сигнальному процесорі, та схеми узгодження сигналів.

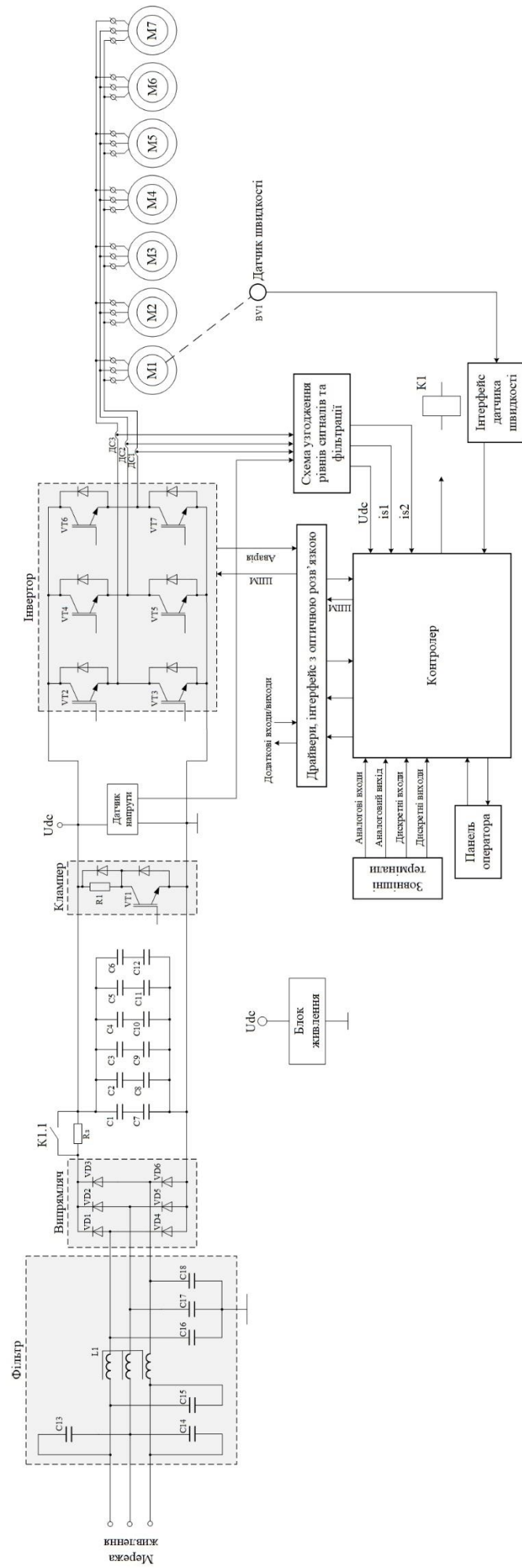


Рисунок 5.1 – Функціональна схема асинхронного електроприводу

5.2 Розрахунок основних елементів силової частини

Для розрахунку основних елементів силової частини потрібно мати значення наступних параметрів: напруга та кількість фаз мережі живлення, сумарну потужність системи, ККД двигуна та номінальний струм двигуна [13].

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ (В)}, \quad (5.1)$$

$$I_n = \frac{P_{\Sigma n}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{7700}{3 \cdot 380 \cdot 0.76 \cdot 0.79} = 11.2 \text{ (А)}, \quad (5.2)$$

де $P_{\Sigma n} = 1.1 \cdot 7 = 7.7$ (кВт) – сумарна потужність системи керування.

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ (В)}, \quad (5.3)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 11.2 = 15.8 \text{ (А)}. \quad (5.4)$$

Максимальне значення струму в фазі двигуна визначається перевантажувальною здатністю електроприводу k_{ovl} , яка, в загальному випадку, залежить від конкретного типу механізму і орієнтовно дорівнює $k_{ovl} = (2 \div 3)$ – для високодинамічних застосувань, таких як роботи, ЕП подачі верстатів, роботів, систем позиціонування, частково підйомно-транспортних механізмів. Приймаємо перевантажувальну здатність для привода $k_{ovl} = 2.5$.

Для розрахунку некерованого випрямляча проведемо розрахунок максимального струму на виході перетворювача:

$$I_{max} = \frac{k_{ovl} \cdot P_{\Sigma n}}{U_{dcn} \cdot \eta \cdot \eta_{inv}} = \frac{2.5 \cdot 7700}{540 \cdot 0.76 \cdot 0.96} = 48.9 \text{ (А)}. \quad (5.5)$$

При живленні перетворювача від трифазної мережі живлення $U_{grid} = 380$ В, напруга в ланці постійного струму при ідеальній фільтрації буде приблизно рівною :

$$U_{dcn} = \sqrt{2} \cdot U_{grid} = \sqrt{2} \cdot 380 = 540 \text{ В}. \quad (5.6)$$

При виборі, як силових діодів, так і IGBT для автономних інверторів напруги, їх максимально-допустима зворотна напруга має бути мінімум в 1.5 разів вищою, ніж максимальна напруга в ланці постійного струму, тобто $U_{ce} > 1.5U_{dcmax}$.

Максимальна напруга в ланці постійного струму визначається допустимою напругою встановлених електролітичних конденсаторів фільтру, і складає приблизно 750 В для перетворювачів з трифазним живленням $U_{grid} = 380$ В.

Отже:

$$U_{ce} = 1.5 \cdot 750 = 1125 \text{ В.} \quad (5.7)$$

Вибір силових діодів здійснюється за критерієм:

$$\begin{aligned} I_{VD} &> I_{max}, U_{VDmax} > U_{ce}, \\ I_{VD} &> 48.9 \text{ А}, U_{VDmax} > 1125 \text{ В}, \end{aligned} \quad (5.8)$$

де I_{VD} та U_{VDmax} – відповідно тривалий струм діода та зворотна напруга, які вказані в паспортних даних діода.

Вибираємо по каталогу [13] мостовий випрямляч KBPC5012 з параметрами $U_{VDmax} = 1200$ В, $I_{VD} = 50$ А (рис. 5.2).



Рисунок 5.2 – Мостовий випрямляч KBPC5012

Перед розрахунком автономного інвертора напруги, знайдемо максимальний струм на виході перетворювача:

$$I_{max} = k_{ov1} \cdot I_{na} = 2.5 \cdot 3.92 = 9.8 \text{ (А)}. \quad (5.9)$$

Вибір IGBT здійснюється за критерієм:

$$I_c > I_{max}, U_{cemax} > U_{ce}, \quad (5.10)$$

де I_c та $U_{ce\max}$ – відповідно тривалий струм колектора та напруга колектор-емітер, які вказані в паспортних даних IGBT. Обов'язковою є умова наявності антипаралельного діода, який в більшості випадків є вбудованим в один корпус із транзистором і не потребує окремого розрахунку.

Вибираємо по каталогу [14] IGBT модуль FP10R12W1T7B11BOMA1 з параметрами $U_{ce\max} = 1200\text{ В}$, $I_c = 10\text{ А}$ (рис. 5.3).



Рисунок 5.3 – IGBT модуль типу FP10R12W1T7B11BOMA1

Схема електрична принципова обраного IGBT модуля представлена на рисунку 5.4.

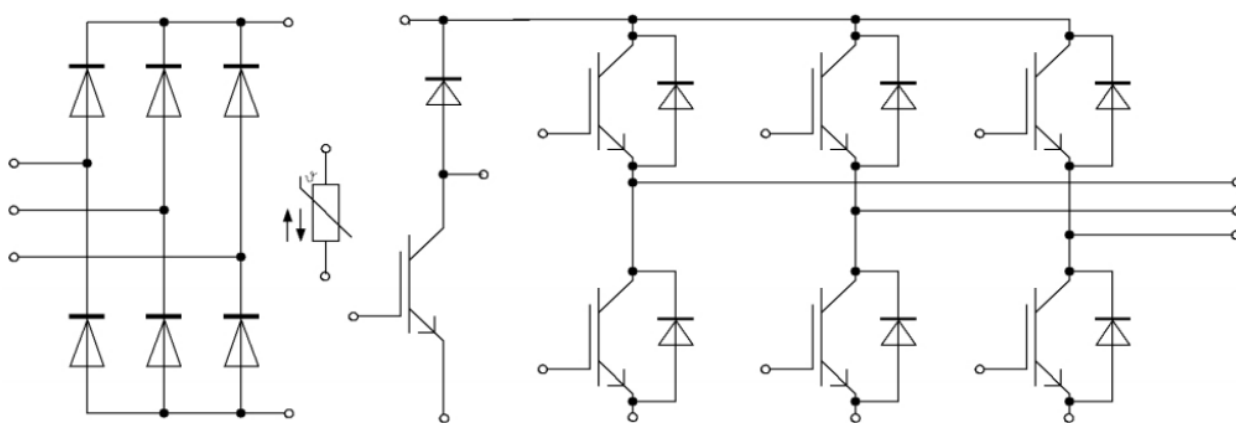


Рисунок 5.4 – Схема електрична принципова IGBT модуля
FP10R12W1T7B11BOMA1

При ввімкненні перетворювача необхідно забезпечити заряд конденсаторів фільтра з обмеженим струмом. Для цього включимо в ланку постійного струму резистор з шунтуючим контактом (рис. 5.5).

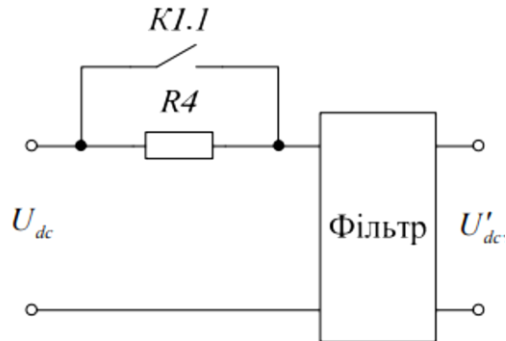


Рисунок 5.5 – Резистор з шунтуючим контактом

Схема керування реле представлена на рисунку 5.6.

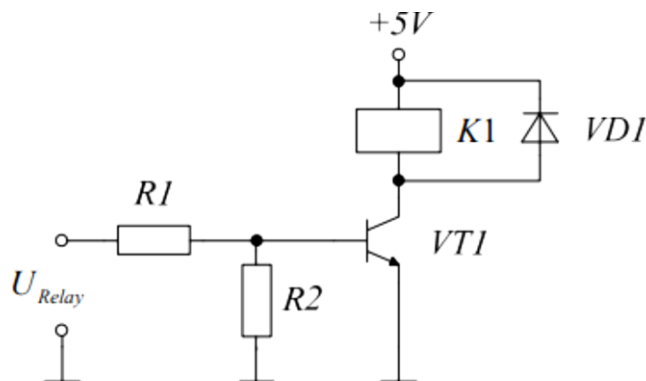


Рисунок 5.6 – Схема керування реле

Опір резистора R_4 необхідно розрахувати таким, щоб зарядний струм не перевищував допустимого для діодів випрямляча значення:

$$R_4 = \frac{U_{dcn}}{I_{max}} = \frac{540}{9.8} = 55.1 \text{ (Ом)}. \quad (5.11)$$

Обираємо резистор ACS-5S-62R-J ARCOL [15] з параметрами – 62 Ом, 5 Вт, $\pm 5\%$; реле ІЕК РЭК77/3 [16] – 10 А, 12 В DC.

Наступним розрахуємо ємнісний фільтр. Ємність випрямляча визначається за формулою:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot k_p \cdot m \cdot f \cdot R_0}, \quad (5.12)$$

де k_p – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги, який для перетворювачів частоти вибирають в діапазоні $(0.02 \div 0.05)$;

m – число фаз випрямляча;

f – частота напруги живлення мережі;

R_0 – еквівалентний опір навантаження ланки постійного струму;

Для визначення R_0 розрахуємо значення струму ланки постійного струму з врахуванням перевантаження:

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}} = \frac{540}{48.9} = 11.1 \text{ (Ом)}. \quad (5.13)$$

У відповідності з формулою, розрахуємо значення ємності фільтра для $k_p = 0.03$:

$$C = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.03 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 11.1} = 0.003188 = 3188 \text{ (мкФ)}. \quad (5.14)$$

Вибираємо по каталогу [17] 12 конденсаторів типу ALF80G112EL450 з максимальною напругою 450 В та ємністю 1100 мкФ. Оскільки напруга розраховується, як подвійна напруга ланки постійного струму, під'єднаємо конденсатори послідовно попарно, а потім ці пари паралельно:

$$C_c = 1100 \cdot 6 = 3300 \text{ (мкФ)}. \quad (5.15)$$

Клампер складається з резистора, діода та напівпровідникового ключа, який підключає цей резистор паралельно в ланку постійного струму для розсіювання надлишкової енергії, яка має місце в гальмівному режимі привода.

Ключ клампера вибирається по струму, який протікає через нього в тривалому режимі. Якщо в процесі роботи вся активна потужність передається у ланку постійного струму, то:

$$I_{BR} = \frac{P_{\Sigma n}}{U_{dcn}} = \frac{7700}{540} = 14.3 \text{ (А)}. \quad (5.16)$$

Вибираємо по каталогу [18] транзистор SGP07N120 з параметрами $U_{ce} = 1200 \text{ В}$, $I_c = 16.5 \text{ А}$ та діод клампера VS-20ETS12-M3 [19].

Знайдемо середнє за робочий цикл значення потужності, що необхідно розсівати на резисторі клампера з врахуванням того, що генераторний режим займає 25 - 30% - від загального часу циклу:

$$P_{cp} = 0.27 \cdot P_{\Sigma n} = 0.27 \cdot 7700 = 2079 \text{ (Вт)}. \quad (5.17)$$

Необхідний опір резистора клампера буде складати:

$$R_{BR} = \frac{U_{DCmax}^2}{P_{cp}} = \frac{800^2}{2079} = 307.8 \text{ (Ом)}, \quad (5.18)$$

де $U_{DCmax} = 800 \text{ В}$ – максимальне значення напруги в ланці постійного струму.

Обираємо шість резисторів R911370677 (0.5 кВт, 65 Ом) [20] і один – BR1K0W020 (1 кВт, 20 Ом) [21] і підключаємо їх так, як зображено на рис. 5.7.

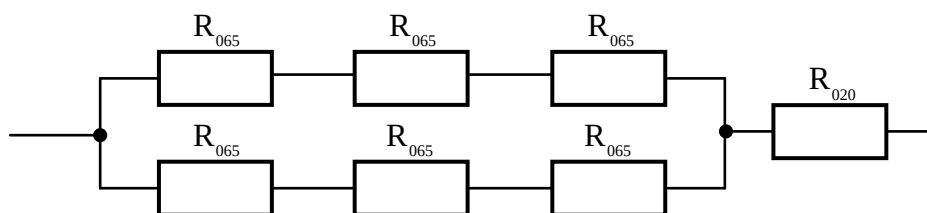


Рисунок 5.7 – Підключення гальмівного резистора

Розрахуємо результуючий опір трьох R911370677:

$$R_B = 65 + 65 + 65 = 195 \text{ (Ом)} \quad (5.19)$$

Тоді результуюче значення опору гальмівного резистора R_{BR} :

$$R_{BR} = \frac{1}{\frac{1}{195} + \frac{1}{195}} + 20 = 117.5 \text{ (Ом)} \quad (5.20)$$

Розрахунок робочого режиму варистора, в силу його нелінійної характеристики, є досить складною задачею. Метою такого розрахунку є вибір оптимального значення класифікаційної напруги варистора. Важливим параметром при цьому є робочий струм варистора, який має бути мінімально можливим, з метою недопущення перегріву варистора. З іншого боку, при заниженому струмі через варистор збільшується рівень напруги, який він обмежує при виникненні імпульсу перенапруги, тобто захисні функції погіршуються.

Для орієнтовних розрахунків рекомендується, щоб робоча постійна напруга не перевищувала $0,85 U_{\text{кл}}$, а на змінному струмі діюче значення робочої напруги не перевищувало $0,6 U_{\text{кл}}$.

Вибираємо варистор типу HEL-10D681K [22] з класифікаційною напругою $U_{\text{кл}} = 680 \text{ В}$.

Процедура проєктування фільтру електромагнітних перешкод передбачає вибір ємності Х-конденсаторів у діапазоні від $0.01 \cdot \text{мкФ}$ до 2.2 мкФ в залежності від потужності.

Виберемо три Х-конденсатори типу R76PR412050H3J [23] з ємністю $C_X = 1.2 \text{ мкФ}$ та максимальною напругою 400 В .

Вибір ємності Y-конденсаторів в залежності від допустимого витоку за формулою:

$$C_Y = \frac{I_{\text{доп}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U} = \frac{3.92}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 380} = 32.9 \text{ (мкФ)}, \quad (5.21)$$

де $I_{\text{доп}}$ – допустимий струм витоку; U – діюче значення напруги відносно землі; f – частота напруги.

Обираємо три Y-конденсатори типу PHB1405350KRSD [24] з ємністю $C_Y = 35 \text{ мкФ}$ та максимальною напругою 400 В .

Вибір синфазного дроселя в залежності від величини струму; в перетворювачах частоти синфазний дросель має в кожній фазі по декілька витків, виконаних дротом, діаметр якого розраховується у відповідності з номінальним вхідним струмом перетворювача. Враховуючи вхідний струм перетворювача який дорівнює $I_{\text{max}} = 48.9 \text{ А}$.

Обрано синфазний дросель типу 3ELF50 ET [25] з параметрами: $I_n = 50 \text{ А}$; $U_n = 440 \text{ В}$.

Варистори вибираються за значенням амплітудної лінійної напруги, яка дорівнює $U_{\text{на}} = 311 \text{ В}$, та коефіцієнт запасу $k_3 = 1.1$, розраховують значення класифікаційної напруги варистора за виразом 4.22.

$$U_{\text{VAR}} = U_{\text{на}} \cdot k_3 = 311 \cdot 1.1 = 342.1 \text{ (В)}. \quad (5.22)$$

Згідно розрахунку обираю варистор V230LU40CPX570 [26] з параметрами $U_{VAR} = 354 \text{ В}$, $U_{AC} = 230 \text{ В}$.

Вибір датчиків струму здійснюють за максимальний струмом, який необхідно вимірювати, тобто щоб вимірюваний діапазон датчика був більшим від максимально допустимого струму в системі. Для вимірювання струмів на виході перетворювача для вибору використовують значення максимального струму.

Вибір датчика струму може бути здійснений по розрахованому значенню I_{dc} вибираємо датчик типу L08P100D15 [27], діапазон вимірювання якого складає 100 А.

Канал вимірювання напруги ланки постійного струму може бути побудований з використанням датчика типу LV 100-800 [28], схема підключення якого показана на рисунку 5.8.

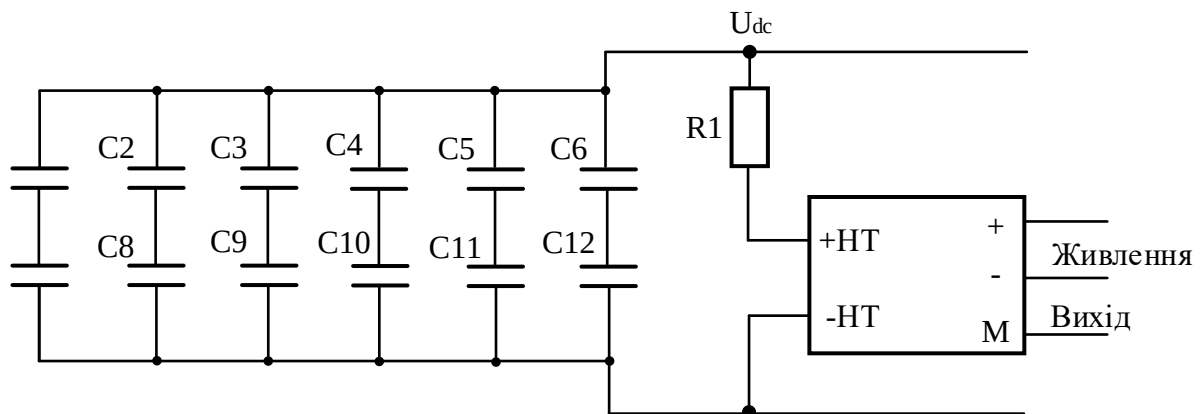


Рисунок 5.8 – Підключення датчика напруги

В документації на датчик вказано, що максимальний струм первинного кола $I_{pmax} = 12.5 \text{ мА}$. Тому значення опору резистора R_1 дорівнює:

$$R_1 = \frac{U_{dcmax}}{I_{pmax}} = \frac{800}{0.0125} = 64 \text{ (кОм)}. \quad (5.23)$$

Зі стандартного ряду резисторів вибираємо С2-29в – $R_1 = 64.9 \text{ кОм}$ [29].

ВИСНОВКИ

У даному дипломному проєкті було розроблено електропривод установки мобільного комплексу для виготовлення спіральновитих полімерних труб. Завданням даної роботи було розробити електропривод, який повинен забезпечувати підтримання заданої швидкості обертання двигунів при зміні моменту навантаження.

В ході роботи було проаналізовано технологічний процес і розглянуто принцип роботи установки. Визначено вимоги до електропривода та обрано систему керування – перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ-АД) з непрямым векторним керуванням, що є найбільш ефективною для даного проєкту.

В середовищі Matlab Simulink розроблено модель, в якій реалізовано від’ємний зворотній зв’язок за швидкістю, завдяки якому, була отримана можливість регулювання та підтримання необхідної швидкості двигунів. Проведено такі досліді: підтримання номінальної швидкості двигунів при подачі номінального моменту навантаження; підтримання 50% від значення номінальної швидкості при подачі номінального моменту; подача двократного та 50% від значення номінального моменту.

На основі аналізу отриманих графіків перехідних процесів, зроблено наступні висновки: при відпрацюванні заданої швидкості, забезпечуються умови асимптотичного відпрацювання заданих траєкторій похибок відпрацювання кутової швидкості та модуля вектора потокозчеплення ротора, відбувається полеорієнтування, процеси в механічній та електромагнітній підсистемах повністю розв’язані. Відсоток перерегулювання швидкості в номінальному режимі становить 4.9 %.

Проблеми підтримання швидкості двигунів та їх синхронізації були вирішені реалізацією в системі керування від’ємного зворотного зв’язку за швидкістю. Було використано принцип «ведучий-ведений двигун»: на першому

двигуні встановлено датчик швидкості, який передає сигнал на керуючий контролер, а він, в свою чергу, розраховує швидкість обертання двигуна. Таким чином, перший двигун є ведучим для всієї системи, а інші двигуни – веденими, які синхронізуються по сигналу ведучого двигуна.

Після проведених досліджень, можна вважати, що мета даного проєкту досягнута. Її практична значимість полягає в тому, що вона дозволить підприємствам, які займаються прокладанням полімерних труб, заощадити час та кошти, адже така установка набагато полегшує процес прокладання труби, при цьому є не менш ефективною та не ресурсовимогливою.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Повышение качества полиэтиленовых газопроводных труб. URL: https://studbooks.net/1851573/tovarovedenie/povyshenie_kachestva_polietileno-vyh_gazoprovodnyh_trub (Дата звернення: 14.04.2021).
2. Полимерные термопластовые и реактопластовые трубы: разновидности и сферы применения. URL: <http://trubamaster.ru/vodoprovodnye/polimernye-truby.html> (Дата звернення: 14.04.2021).
3. Скалярное и векторное управление асинхронными двигателями - в чем различие? URL: <http://electricalschool.info/elprivod/1975-skaljarnoe-i-vektornoe-upravlenie.html> (Дата звернення: 15.04.2021).
4. Бешта О. С., Балахонцев О. Б., Худолій С. С., Худий Є. Г., Михайленко О. В. Электропривод шахтных подъемных установок. Перспективы розвитку. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 2007. №78. С. 107–111.
5. Червячные редукторы с 4-ч полосным двигателем. URL: http://siti.com.ua/gearboxes/worm-gearboxes-gearmotors/worm-gear-series-u_-mu/4p (Дата звернення 19.04.2021).
6. Мотор-редукторы для эффективных проектов. URL: <https://technoprivod.com.ua/types/motor-reduktory/> (Дата звернення 19.04.2021).
7. Теорія мехатронних систем – 1: Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання на прямую підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. –К.: НТУУ "КПІ", 2011 р. –96 с.
8. Параметры рабочего режима. URL: <http://www.tvid.ru/price/nizkovoltnye-elektroprivody/parametry-rabocego-rezima> (Дата звернення 20.04.2021).

9. Пересада С. М. Обобщенный алгоритм прямого векторного управления асинхронным двигателем / С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса // Техн. електродинаміка. - 2002. - № 4. - С. 17-22. - Библиогр.: 10 назв. - рус.

10. Пересада С. М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть I. Проблемы векторного управления в асинхронном электроприводе: краткий обзор и формулировка проблемы // Техн. електродинаміка. –1999. –№ 2. –С. 27–32.

11. Пересада С. М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть II. Синтез алгоритма отработки модуля потока и угловой скорости // Техн. електродинаміка. –1999. –№ 4. – С. 26–31.

12. Методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів напрямку підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, С. С. Димко –К.: НТУУ "КПІ", 2014 р. 43 с.

13. KBPC5012 Datasheet (PDF) – Diotec Semiconductor. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/884/DOC003884683.pdf> (Дата звернення 17.05.2021).

14. FP10R12W1T7B11BOMA1 Datasheet (PDF) – Infineon. URL: https://eu.mouser.com/datasheet/2/196/Infineon_FP10R12W1T7_B11_DataSheet_v00_10_EN-1532050.pdf (Дата звернення 17.05.2021).

15. ACS-5S-62R-J Datasheet (PDF) – Arcol Resistors. URL: <https://www.tme.eu/Document/eead17bd66979b43a6d5ef2d9169718c/ACS-6-11.50.pdf> (Дата звернення 17.05.2021).

16. РЭК77/3 Datasheet (PDF) – IEK. URL: http://www.fotorele.net/pdf/rele_RJeK77_RJeK78.pdf (Дата звернення 17.05.2021).

17. ALF80G112EL450 Datasheet (PDF) – KEMET. URL: https://eu.mouser.com/datasheet/2/212/1/KEM_A4085_ALF80-1670318.pdf (Дата звернення 19.05.2021).

18. SGP07N120 Datasheet (PDF) – Infineon. URL: <https://www.tme.eu/Document/29a9d2ec875753ca87dcc81f57a210fd/SGP07N120.pdf> (Дата звернення 19.05.2021).
19. VS-20ETS12-M3 Datasheet (PDF) – Vishay Semiconductors. URL: <http://www.farnell.com/datasheets/2621722.pdf> (Дата звернення 19.05.2021).
20. Гальмівний резистор R911370677. URL: <https://privod.kiev.ua/tormoznoy-rezistor-05-kvt-65-om-r911370677> (Дата звернення 19.05.2021).
21. Гальмівний резистор BR1K0W020. URL: https://privod.kiev.ua/tormoznye_rezistory/tormoznoy-rezistor-1-kvt-20-om-br1k0w020?mfp=10f-%2C20-%D0%BE%D0%BC (Дата звернення 19.05.2021).
22. HEL-10D681K Datasheet (PDF) – SR Passives. URL: https://www.tme.eu/Document/f3a73f1f31dd3c98c00176480078d0ff/SR_PAS-SIVES-VAR10.pdf (Дата звернення 19.05.2021).
23. R76PR412050H3J Datasheet (PDF) – KEMET. URL: https://eu.mouser.com/datasheet/2/212/1/KEM_F3118_R76H-1847248.pdf (Дата звернення 19.05.2021).
24. PHB1405350KRSD Datasheet (PDF) – Nichicon. URL: https://eu.mouser.com/datasheet/2/293/polypropylene_phb_rhb_5002c704f1-1869426.pdf (Дата звернення 20.05.2021).
25. Фільтр 3ELF50ET. URL: <https://semismart.com.ua/produkt-siya/setevye-pomekhopodavlyayushchie-25-250a/3elf50-et-12> (Дата звернення 20.05.2021).
26. V230LU40CPX570 Datasheet (PDF) – Littelfuse. URL: https://www.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/varistors/littelfuse_varistor_ciii_datasheet.pdf.pdf (Дата звернення 20.05.2021).
27. L08P100D15 Datasheet (PDF) – Tamura Corp. URL: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/397/L08PXXXD15-1206979.pdf> (Дата звернення 20.05.2021).

28. LV 100-800 Datasheet (PDF) – LEM. URL:
[https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lv_100 - 800.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lv_100_-_800.pdf)
(Дата звернення 20.05.2021).

29. Резистор С2-29в. URL: <https://www.chipdip.ru/product0/9000217677>
(Дата звернення 20.05.2021).