

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА
(підпис)

“ ____ ” _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи

автоматизації, електропривод та електромобільність»

**зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

на тему:

Векторно-керований асинхронний електропривод екструдерної установки

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ЕП-41мп

Іващенко Ростислав Вячеславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н. Приймак Богдан Іванович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

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

Рецензент асистент, д.ф. Стуліщенко Андрій Сергійович

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

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

(підпис)

Київ – 2025 р.

ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	141.0006.006.МД	Завдання на магістерську дисертацію	3	
2	A4	141.0006.006.МД	Пояснювальна записка	100	
3	A1	141.0006.006.МД	Схема електрична принципова	1	
4	A1	141.0006.006.МД	Вигляд панелі оператора НМІ	1	
5	A1	141.0006.006.МД	Результати моделювання	1	
6	A1	141.0006.006.МД	Функціональна схема	1	
7	A1	141.0006.006.МД	Структура програми моделювання	1	
8	A1	141.0006.006.МД	Структурна схема	1	

				141.0006.006.МД		
ПІБ		Підп.	Дата			
Розробн.	Іващенко Р.В.			<i>Векторно-керований асинхронний електропривод екструдерної установки</i>	Лист	Листів
Керівн.	Приймак Б.І.				2	100
Консулт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-41мп	
Н/контр.						
Зав.каф.	Ковбаса С.М.					

**Пояснювальна записка
до магістерської дисертації**

на тему: «Векторно-керований асинхронний електропривод екструдерної
установки»

Київ – 2025 р.

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА

(підпис)

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Іващенко Ростиславу Вячеславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: «Векторно-керований асинхронний електропривод екструдерної установки»

науковий керівник дисертації Приймак Богдан Іванович, доц. к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Строк подання студентом дисертації 17.12.2025

3. Об'єкт дослідження: Векторно-керований асинхронний електропривод екструдерної установки.

4. Вихідні дані до проекту: Безступінчасте регулювання частоти обертання черв'яка в діапазоні не менше 15.Привід повинен забезпечувати жорсткість характеристик в межах $\pm 2\%$ Стабільність швидкості обертання двигуна черв'ячного преса і тягового пристрою з помилкою до 3% на нижній межі частоти обертання . Продуктивність екструдера становить 600-800мм/хв.

5. Зміст пояснювальної записки: 1 Аналітичний огляд літератури за темою дисертації, 2 Розрахунок потужності двигуна та вибір силового обладнання, 3 Розрахунок схеми заміщення, 4 Розробка функціональної схеми системи векторного керування екструдерної установки, та вибір обладнання, 5 Побудова моделі системи в середовищі MATLAB/SIMULINK та дослідження статичних і динамічних режимів САК АЕП екструдерної установки, 6 Розробка програми системи керування автоматизації, 7 Розробка стартап-проекту впровадження інтелектуальної системи керування екструзійним обладнанням «Smartmelt control».

6. Перелік графічного матеріалу (із зазначеннями обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

1. А1 Схема електрична принципова, 2. А1 Вигляд панелі оператора НМІ, 3. А1 Результати моделювання, 4. А1 Функціональна схема, 5. А1 Структура програми моделювання 6. А1 Структурна схема.

7. Орієнтовний перелік публікацій: _____

8. Консультанти розділів проекту*

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

9. Дата видачі завдання 8 вересня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН – ГРАФІК
виконання магістерської дисертації
студентом Іващенко Ростиславом Вячеславовичем

на тему

«Векторно-керований асинхронний електропривод екструдерної установки»

№ з/п	Назва етапів роботи, які мають бути виконані відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Аналітичний огляд літератури за темою роботи	30.09.25	
2	Формування технічних вимог до системи автоматичного керування (САК) асинхронним електроприводом (АЕП) екструдерної установки	05.10.25	
3	Розрахунок потужності двигуна та вибір силового обладнання	12.10.25	

4	Математичний опис об'єкта керування	20.10.25	
5	Побудова функціональної схеми САК АЕП екструдерної установки	25.10.25	
6	Синтез регуляторів системи векторного керування швидкістю АЕП екструдерної установки	15.11.25	
7	Побудова моделі системи в середовищі MATLAB/Simulink та дослідження статичних і динамічних режимів САК АЕП екструдерної установки	25.11.25	
8	Підготовка стартап-проекту	02.12.25	
9	Підготовка дисертації у чорновому варіанті та передача її на перевірку	12.12.25	
10	Завершальне оформлення роботи, підготовка презентації і доповіді для захисту	18.12.25	

Студент _____ Р.В. Іващенко

Студент

(підпис)

Ростислав ІВАЩЕНКО

(ініціали, прізвище)

Керівник дипломного проєкту

(підпис)

Богдан ПРИЙМАК

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить: сторінок – 100, рисунків – 19, таблиць – 17, графічну частину на 6 листах А1.

Основною метою магістерської дисертації є побудова та дослідження системи векторного керування асинхронним електроприводом екструдерної установки, яка забезпечує високі показники якості роботи з урахуванням змінної в'язкості екструзійного матеріалу.

В результаті виконання магістерської дисертації було обґрунтовано вибір алгоритму прямого векторного керування та розроблено структуру спостерігача магнітного потоку для забезпечення стабільності технологічного процесу екструзії.

Розроблено систему автоматизації та обрано необхідне обладнання. Відповідно до схеми електричної принципової створено програму та панель оператора для керування.

Для дослідження динамічних та статичних характеристик створено математичну модель в програмному середовищі MATLAB Simulink. Дослідження проводилося для обраного алгоритму керування та частотного керування, щоб порівняння динамічних та статичних режимів при різних алгоритмах керування.

АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ЕКСТРУДЕРНА УСТАНОВКА, ПРЯМЕ ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, MATLAB SIMULINK, ПРОГРАМОВАНИЙ ЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЕР

					141.0006.006.МД			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Іващенко Р.В.</i>			<i>Векторно-керований асинхронний електропривод екструдерної установки</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Приймак Б.І.</i>					7	100
<i>Н. Контр.</i>						<i>НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-41мп</i>		
<i>Затверд.</i>		<i>Ковбаса С.М.</i>						

SUMMARY

The master's thesis contains: pages – 100, figures – 19, tables – 17, graphic part on 6 sheets of A1.

The main objective of the master's thesis is to construct and study a vector control system for an asynchronous electric drive of an extruder unit, which ensures high performance indicators taking into account the variable viscosity of the extrusion material.

As a result of the master's thesis, the choice of a direct vector control algorithm was justified and the structure of a magnetic flux observer was developed to ensure the stability of the extrusion process.

An automation system for an extruder was developed to, and the necessary equipment was selected. In accordance with the electrical schematic diagram, a program and operator panel were created for control.

To study the dynamic and static characteristics, a mathematical model was created in the MATLAB Simulink software environment. The study was conducted for the selected control algorithm and frequency control in order to compare the dynamic and static modes under different control algorithms.

ASYNCHRONOUS MOTOR, EXTRUDER, DIRECT VECTOR CONTROL, FREQUENCY CONVERTER, MATLAB SIMULINK, PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER

	<i>Letter</i>	<i>Nº of doc</i>	<i>Sing.</i>	<i>Date</i>				
<i>Devel.</i>	<i>R. Ivashchenko</i>					<i>L</i>	<i>Page</i>	<i>Pages</i>
<i>Checked</i>	<i>B. Pryymak</i>						<i>8</i>	<i>100</i>
<i>N. Contr.</i>					<i>NTUU "KPI them Igor Sikorsky", FEA, dep. ESA-ED, EP-41ms</i>			
<i>Approvad.</i>	<i>S. Kovbasa</i>							

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ	12
1.1 Призначення та класифікація екструдерних установок.....	12
1.2 Технологічний процес екструзії та його основні параметри.....	16
1.3 Конструкція та основні вузли екструдера	20
1.4 Огляд існуючих електроприводів екструдерних установок.....	22
1.5 Енергоефективність асинхронного електропривода екструдера	25
1.6 Основи векторного керування асинхронними двигунами.....	27
Проблема керування асинхронним двигуном.....	27
1.7 Вимоги до електроприводу екструдера	30
2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА ТА ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ	32
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ	38
4 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ЕКСТРУДЕРНОЇ УСТАНОВКИ, ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ	41
4.1 Функціональна схема САК АЕП екструдерної установки	42
4.2 Вибір необхідного обладнання.....	49
5 ПОБУДОВА МОДЕЛІ СИСТЕМИ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ САК АЕП ЕКСТРУДЕРНОЇ УСТАНОВКИ	56
5.1 Загальна структура моделі	56
5.2 Реалізація алгоритму прямого векторного керування.....	57
5.3 Результати моделювання режимів роботи.....	60
6 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ	69
6.1 Опис контролера та програмного забезпечення	69
6.2 Середовище розробки та структура програми	71
6.3 Оголошення змінних.....	71
6.4 Опис алгоритму керування	72

6.5 Лістинг програми	73
6.6 Розробка людинно машинного інтерфейсу НМІ	76
6.7 Головний екран керування (Main Screen).....	77
6.8 Екран графіків (Trend Screen)	78
6.9 Екран журналу аварій (Alarm History)	79
6.10 Навігація та системна область	80
7 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕКСТРУЗІЙНИМ ОБЛАДНАННЯМ «SMARTMELT CONTROL».....	82
7.1 Опис ідеї проекту та аналіз актуальності	82
7.2 Технологічний аудит ідеї проекту	84
7.3 Аналіз ринкових можливостей	86
7.4 Аналіз конкурентного середовища	86
7.5 Розроблення маркетингової стратегії.....	87
7.6 Фінансово-економічний аналіз проекту	88
7.7 Аналіз ризиків проекту	92
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	95
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	97

ВСТУП

Сучасна промисловість, зокрема у галузях переробки полімерів, харчовій та хімічній промисловості, висуває високі вимоги до якості кінцевої продукції. Ключову роль у забезпеченні стабільності технологічних параметрів відіграють екструдерні установки. Ефективність роботи екструдера, у свою чергу, напряду залежить від точності, надійності та енергоефективності його електроприводу. На сьогодні традиційні системи керування (скалярні або приводи постійного струму) не завжди можуть забезпечити необхідний діапазон регулювання та точність підтримки швидкості і моменту, особливо при змінних навантаженнях, характерних для процесу екструзії. У зв'язку з цим, актуальною науково-технічною задачею є модернізація таких установок шляхом впровадження сучасних систем векторно-керованого асинхронного електроприводу, які поєднують надійність асинхронних машин з високими динамічними та статичними показниками.

Об'єктом дослідження є технологічний процес екструзії та система електроприводу екструдерної установки.

Предметом дослідження є процеси автоматичного керування швидкістю та моментом асинхронного двигуна за допомогою векторних алгоритмів.

Метою магістерської дисертації є побудова та дослідження системи векторного керування асинхронним електроприводом екструдерної установки, яка забезпечує високі показники якості роботи з урахуванням змінної в'язкості екструзійного матеріалу.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ

1.1 Призначення та класифікація екструдерних установок

Екструзія є одним з ключових та найбільш високопродуктивних безперервних технологічних процесів у сучасній промисловості, що використовується для переробки різноманітних матеріалів, переважно полімерів. Процес полягає у примусовому продавлюванні (витисканні) матеріалу, який знаходиться у в'язкотекучому стані, через формуючий отвір (відомий як фільєра або екструзійна головка), поперечний переріз якого визначає профіль кінцевого виробу.

Установка, що реалізує цей процес, називається екструдером або екструдерною установкою.

Призначення екструдерних установок

Основне призначення екструдера — це перетворення вихідної сировини (зазвичай у формі гранул, порошку або стрічки) у гомогенний (однорідний) розплав та подальше формування з нього безперервного профілю, труби, плівки, листа, оболонки кабелю чи іншого виробу.

- Сучасні екструдерні установки є складними технологічними лініями, які, окрім безпосередньо формування, виконують низку критично важливих супутніх функцій:
 - Транспортування: Переміщення матеріалу від завантажувального бункера до фільєри.
 - Пластифікація та плавлення: Переведення твердого матеріалу у в'язкотекучий стан за рахунок тепла від зовнішніх нагрівачів та внутрішнього тепла, що виділяється внаслідок тертя (дисипативне тепловиділення).
 - Гомогенізація (усереднення): Забезпечення однорідності розплаву за температурою, в'язкістю та складом (у випадку використання сумішей чи композитів).

- Створення тиску: Нагнітання розплаву під високим тиском, необхідним для подолання опору фільтри.
- Дегазація: Видалення летких компонентів (вологи, газів, мономерів), що покращує якість кінцевого продукту.

Найбільш широке застосування екструдери знайшли у полімерній промисловості для виробництва труб, шлангів, плівок, листів, сайдингу, віконних профілів, ізоляції кабелів та грануляту (для подальшого лиття). Окрім полімерів, екструзія широко використовується у харчовій промисловості (виробництво макаронних виробів, сухих сніданків, снєків, кондитерських виробів), хімічній промисловості (виробництво каталізаторів, змішування компонентів) та у виробництві кормів для тварин.

Класифікація екструдерних установок

Екструдерні установки класифікують за низкою основних ознак, що визначають їх конструкцію та сферу застосування.

1) За конструкцією основного робочого органу:

Шнекові (гвинтові) екструдери: Найбільш поширений тип, де матеріал переміщується та пластифікується за допомогою одного або кількох обертових шнеків (гвинтів) усередині циліндричного корпусу (матеріального циліндра).



Рисунок 1.1 – Шнековий екструдер

Одношнекові: Мають один шнек. Це класична та найпростіша конструкція, ефективна для багатьох завдань.

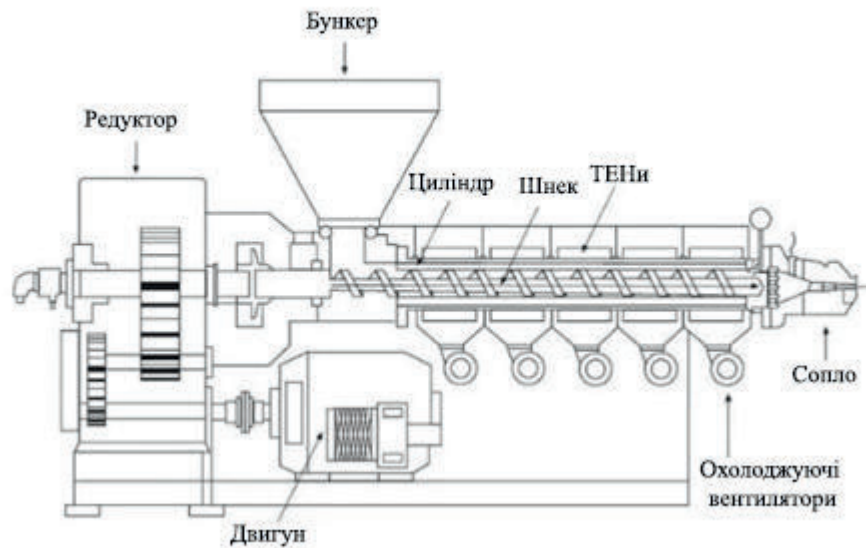


Рисунок 1.2 – Одношнековий екструдер

Двошнекові: Мають два шнеки, що значно покращує процеси змішування, гомогенізації та дегазації. Вони, у свою чергу, поділяються на:

За напрямком обертання: співнапрямлені (обертаються в один бік) та протинапрямлені (обертаються у різні боки).

За типом зачеплення: з повним зачепленням (самоочисні) або частковим.

За геометрією: з циліндричними або конічними шнеками.

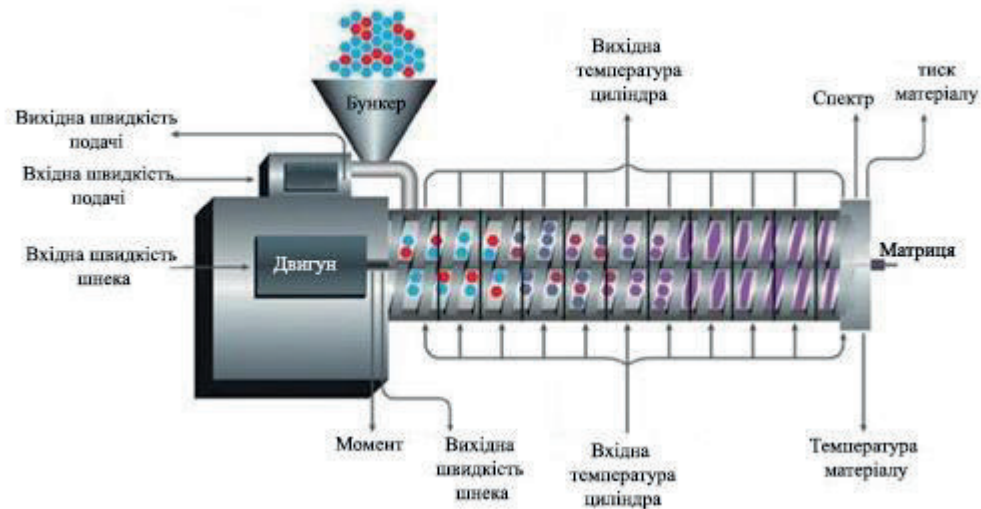


Рисунок 1.3 – Двошнековий екструдер.

Безшнекові екструдери: Використовують інші принципи для створення тиску.

Плунжерні (поршневі): Працюють за принципом періодичної дії (циклічно), використовуються для спеціальних матеріалів або в лабораторних умовах.

Дискові: Пластифікація відбувається за рахунок тертя матеріалу між обертовим та нерухомим дисками.

2) За принципом дії:

Безперервної дії: Більшість шнекових та дискових екструдерів, що забезпечують постійний вихід продукту.

Періодичної (циклічної) дії: Переважно плунжерні екструдери.

3) За типом матеріалу, що переробляється:

Екструдери для пластмас (термопластів).

Екструдери для гумових сумішей (мають специфічні вимоги до температурних режимів).

Харчові екструдери (вимагають відповідності санітарним нормам, виготовляються з нержавіючої сталі).

4) За розташуванням матеріального циліндра:

Горизонтальні: Найбільш поширене компонування.

Вертикальні: Застосовуються рідше, переважно для специфічних процесів, де потрібна подача розплаву вниз (наприклад, деякі види ізоляції кабелю).

5) За наявністю зони дегазації:

Стандартні: Без спеціальної зони для відведення газів.

Дегазаційні: Мають одну або декілька зон вздовж шнека, де тиск знижується (аж до вакуумування), дозволяючи летючим речовинам покинути розплав.

Таким чином, екструдерна установка є складним електромеханічним комплексом, що виконує ключову роль у процесі перетворення сировини на готовий виріб. Вибір конкретного типу екструдера, його конструкції та системи керування безпосередньо залежить від вимог технологічного процесу переробки конкретного матеріалу та номенклатури продукції, що випускається.

1.2 Технологічний процес екструзії та його основні параметри

Технологічний процес екструзії (у контексті переробки полімерів) — це безперервна операція, що перетворює тверду сировину (зазвичай у формі гранул або порошку) на гомогенний (однорідний) розплав і формує з нього виріб із заданим поперечним перерізом.

Цей процес реалізується в матеріальному циліндрі екструдера за допомогою обертового шнека (гвинта). Весь шлях матеріалу всередині екструдера умовно поділяють на три технологічні зони, кожна з яких виконує свою функцію.

Етапи (зони) технологічного процесу

1) Зона живлення (завантаження):

Призначення: Приймання твердої сировини із завантажувального бункера та її транспортування вздовж циліндра.

Процес: У цій зоні шнек має глибокі канали. Матеріал (гранулят) захоплюється витками шнека і починає рухатися вперед. Відбувається попереднє ущільнення матеріалу та його початковий прогрів за рахунок контакту з гарячим циліндром. Температура в цій зоні підтримується відносно низькою, щоб запобігти передчасному плавленню та утворенню пробки.

2) Зона пластифікації (плавлення або стиснення):

Призначення: Повне плавлення полімеру та його переведення у в'язкотекучий стан.

Процес: Глибина каналу шнека в цій зоні поступово зменшується. Це призводить до стиснення матеріалу, видалення повітря, що потрапило, та інтенсифікації теплообміну. Плавлення відбувається за рахунок двох джерел тепла:

Зовнішнє тепло: Від електричних нагрівачів, розташованих на матеріальному циліндрі.

Внутрішнє (дисипативне) тепло: Виділяється внаслідок інтенсивного внутрішнього тертя в матеріалі та тертя матеріалу об шнек і циліндр. У високошвидкісних екструдерах це джерело тепла може бути домінуючим.

Наприкінці цієї зони весь матеріал повинен перейти в стан розплаву.

3) Зона дозування (нагнітання):

Призначення: Гомогенізація (усереднення) розплаву за температурою та в'язкістю, а також створення високого тиску, необхідного для продавлювання розплаву через формуючий інструмент.

Процес: Ця зона має найменшу і постійну глибину каналу шнека. Шнек працює як насос для розплаву. Відбувається остаточне перемішування матеріалу, що забезпечує однорідність продукту. Створений тиск (який може сягати десятків МПа) змушує розплав пройти через фільтр (для очищення від домішок) і вийти через екструзійну головку (фільтру), яка формує профіль майбутнього виробу.

Після виходу з фільтри виріб проходить стадії калібрування (надання точної форми), охолодження (у водяній ванні або повітрям), протягування (тягнучим пристроєм) та порізки на мірні довжини або намотування в бухту.

Основні технологічні параметри

Для забезпечення стабільної якості продукції та необхідної продуктивності, процес екструзії контролюється низкою взаємопов'язаних параметрів. Керування цими параметрами є основним завданням системи керування екструдерною установкою.

1) Температурний режим (Температура по зонах):

Це набір заданих значень температури вздовж матеріального циліндра (зазвичай 3-5 зон нагріву) та екструзійної головки.

Вплив: Неправильно підібраний температурний профіль може призвести до неповного плавлення (брак "непроплав"), термічної деструкції (перегріву) матеріалу, зміни в'язкості розплаву і, як наслідок, до нестабільної геометрії виробу. Це ключовий параметр для якості.

2) Швидкість обертання шнека (n):

Вимірюється в обертах за хвилину (об/хв). Це основний параметр, що регулюється електроприводом.

Вплив: Безпосередньо визначає продуктивність екструдера (кількість матеріалу, що видавлюється за одиницю часу). Також впливає на:

3) Час перебування матеріалу в екструдері.

Інтенсивність дисипативного тепловиділення (чим вища швидкість, тим більше тепла виділяється за рахунок тертя).

Якість гомогенізації розплаву.

Тиск розплаву в головці (P):

Тиск, що створюється в зоні дозування перед фільтрою.

Вплив: Є індикатором стабільності процесу. Його коливання свідчать про нестабільну подачу матеріалу, пульсації продуктивності або засмічення фільтра. Підтримання стабільного тиску критично важливе для отримання виробу з постійними геометричними розмірами.

4) Крутний момент на валу шнека (M):

Характеризує опір, який чинить матеріал обертанню шнека.

Вплив: Цей параметр безпосередньо пов'язаний з в'язкістю розплаву. В'язкість, у свою чергу, залежить від температури та властивостей самого матеріалу. Контроль крутного моменту (або споживаного струму двигуна) дозволяє системі керування реагувати на зміни у властивостях сировини та запобігати перевантаженню привода.

Вимоги до сучасного електроприводу екструдера полягають у здатності точно підтримувати задану швидкість обертання шнека незалежно від коливань крутного моменту (навантаження), забезпечуючи таким чином стабільну продуктивність та високу якість кінцевого продукту.

1.3 Конструкція та основні вузли екструдера

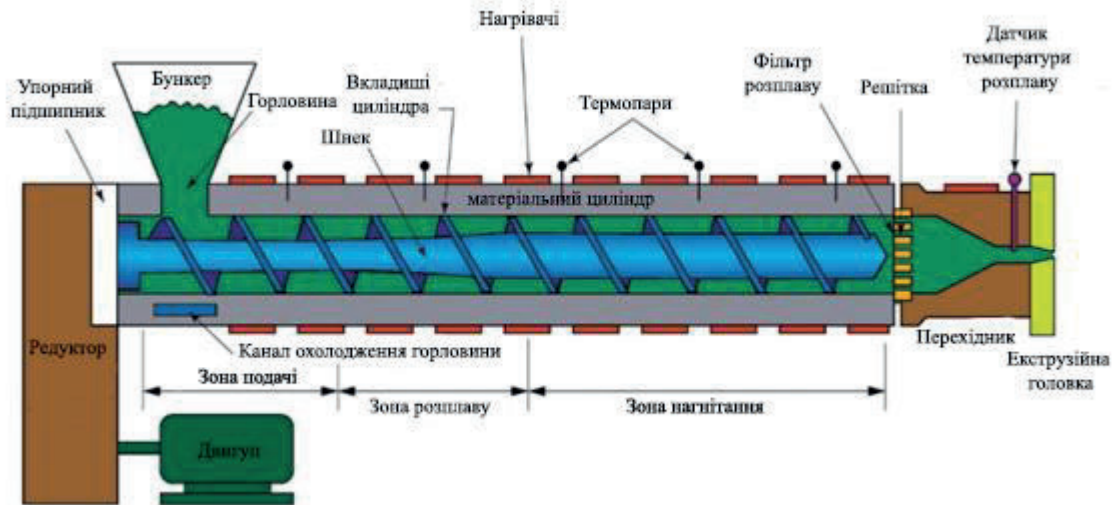


Рисунок 1.4 – конструкція екструдера

Екструдерна установка є складним машинобудівним комплексом, який складається з низки взаємопов'язаних функціональних вузлів. Кожен вузол виконує свою специфічну роль у процесі переробки матеріалу. Типова конструкція одношнекового екструдера, що є основою більшості екструзійних ліній, включає наступні основні елементи:

1) Завантажувальний бункер (Hopper):

Призначення: Є ємністю для зберігання та контрольованої подачі вихідної сировини (гранул, порошку) у матеріальний циліндр екструдера.

Особливості: Зазвичай має конічну форму для кращого стікання матеріалу. Може бути оснащений системами попереднього сушіння матеріалу (що критично важливо для гігроскопічних полімерів, таких як ПЕТ, ПК, ПА), а також системами дозування добавок.

2) Матеріальний циліндр (Barrel):

Призначення: Усередині цього циліндра обертається шнек, і відбувається весь процес транспортування, плавлення та гомогенізації матеріалу.

Особливості: Виготовляється зі зносостійких сталей. По всій довжині циліндра розташовані електричні нагрівачі (бандажні або індукційні), що забезпечують заданий температурний профіль. Кожна зона нагріву має свій термодатчик і регулятор температури. Для інтенсивного охолодження циліндра можуть використовуватися вентилятори або водяне охолодження. В зоні живлення циліндр завжди охолоджується для запобігання передчасному плавленню матеріалу та утворення пробки.

3) Шнек (Screw):

Призначення: Головний робочий орган екструдера. Забезпечує транспортування матеріалу, його пластифікацію за рахунок інтенсивного перемішування та створення тиску.

Особливості: Представляє собою сталевий вал з витками, що розташовані по спіралі. Геометрія шнека (діаметр, довжина, крок витків, глибина каналу, наявність змішувальних елементів) ретельно проектується під конкретний тип полімеру та вимоги до продукції. Шнеки виготовляються з високоміцних та зносостійких сталей.

4) Привід шнека (Screw Drive):

Призначення: Забезпечує обертання шнека із заданою швидкістю та передачу необхідного крутного моменту.

Особливості: Складається з електричного двигуна (зазвичай асинхронного, рідше постійного струму або синхронного), редуктора (для зниження швидкості та збільшення крутного моменту) та системи керування двигуном (перетворювача частоти, контролера). Це центральний елемент, що визначає продуктивність та енергоефективність установки.

5) Нагрівальні елементи та система контролю температури (Heaters and Temperature Control System):

Призначення: Підтримання заданого температурного профілю вздовж матеріального циліндра та екструзійної головки.

Особливості: Включає електричні нагрівачі, термопари (датчики температури), а також мікропроцесорні регулятори температури, що здійснюють автоматичне підтримання заданих значень.

6) Змінний інструмент (фільєра, екструзійна головка) (Die Head):

Призначення: Формування розплаву в безперервний профіль заданої форми (плівка, труба, лист, профіль, оболонка).

Особливості: Конструкція головки залежить від типу виробу. Вона також оснащена власними нагрівальними елементами для підтримки температури розплаву перед виходом з неї. Перед головкою часто встановлюється фільтр розплаву (сітка) для видалення механічних домішок та дозуюча матриця для вирівнювання потоку.

7) Станина та опорні конструкції (Frame and Support Structures):

Призначення: Забезпечення стабільного та надійного розміщення всіх вузлів екструдера, поглинання вібрацій та навантажень.

8) Система керування (Control System):

Призначення: Централізований контроль та керування всіма параметрами екструзійного процесу.

Особливості: Зазвичай реалізується на базі промислового контролера (PLC), що взаємодіє з операторською панеллю (HMI). Керує швидкістю шнека, температурними зонами, тиском розплаву, швидкістю протяжки, намотуванням та іншими допоміжними функціями.

1.4 Огляд існуючих електроприводів екструдерних установок

Електропривод є одним з ключових вузлів екструдерної установки, оскільки він безпосередньо визначає основний технологічний параметр — швидкість обертання шнека (n), і, як наслідок, продуктивність та стабільність процесу.

До електропривода екструдера висувається низка специфічних вимог, що впливають з особливостей технологічного процесу (розглянутих у 1.2):

- Висока стабільність швидкості: Здатність підтримувати задану швидкість обертання з високою точністю незалежно від значних коливань навантаження (зміни в'язкості розплаву, коливань тиску).
- Високий пусковий момент: Необхідність долати значний опір холодного або в'язкого матеріалу при запуску (часто вимагається 150-200% від номінального крутного моменту).
- Широкий діапазон регулювання швидкості: Можливість плавної зміни швидкості (часто в діапазоні 1:10 або 1:20) для адаптації до різних типів сировини та номенклатури виробів.
- Висока надійність та мінімальне обслуговування: Екструзійні лінії часто працюють у безперервному цілодобовому режимі.
- Історично та в сучасній практиці для приводу шнека екструдера застосовувалися (і застосовуються) три основні типи регульованих електроприводів.

1) Електроприводи постійного струму (ДПС)

Історично, приводи на базі двигунів постійного струму (ДПС) з тиристорними перетворювачами були домінуючим рішенням для екструдерних установок.

Переваги: Вони забезпечують чудові характеристики регулювання: високу точність підтримки швидкості, широкий діапазон регулювання та високий пусковий момент, який легко контролювати.

Недоліки: Головним і критичним недоліком ДПС є наявність щітково-колекторного вузла (ЩКВ). Цей вузол вимагає регулярного технічного обслуговування (заміна щіток), є джерелом іскріння та вугільного пилу, а також є найменш надійним елементом системи. В умовах хімічних виробництв або при переробці матеріалів, що виділяють леткі компоненти, іскріння є неприпустимим. Через це ДПС практично повністю витіснені з сучасних екструдерних ліній.

2) Асинхронні електроприводи зі скалярним керуванням (U/f)

З розвитком силової електроніки приводи на базі асинхронних двигунів (АД) з короткозамкненим ротором та перетворювачів частоти (ПЧ) стали масовим рішенням.

Переваги: Асинхронний двигун є виключно надійним, простим за конструкцією, не має зношуваних частин (як ЩКВ) та має значно нижчу вартість.

Недоліки (при скалярному керуванні): Найпростіший метод керування таким двигуном — скалярний. Цей метод забезпечує плавне регулювання швидкості, але має фундаментальний недолік: він не контролює ковзання двигуна. При зміні навантаження на валу (наприклад, при коливанні в'язкості полімеру) швидкість ротора суттєво "просідає" (змінюється). Таким чином, скалярне керування не здатне забезпечити високу стабільність швидкості, що є ключовою вимогою для екструзії. Крім того, такий привід має низький крутний момент на низьких частотах (при запуску).

3) Векторно-керовані асинхронні електроприводи

Вирішенням проблем скалярного керування при збереженні всіх переваг асинхронного двигуна стало впровадження векторного керування.

Принцип: Сучасні ПЧ з функцією векторного керування (Field Oriented Control, FOC) використовують складну математичну модель двигуна. Це дозволяє їм, подібно до приводу постійного струму, незалежно керувати двома компонентами струму статора:

Компонентою, що створює магнітний потік (аналог струму збудження в ДПС).

Компонентою, що створює крутний момент (аналог струму якоря в ДПС).

Переваги: Такий підхід забезпечує характеристики, ідентичні або навіть кращі, ніж у приводу постійного струму:

Висока точність підтримки швидкості незалежно від коливань навантаження.

Повний номінальний (і вище) крутний момент у всьому діапазоні швидкостей, включаючи нульову швидкість (для "підриву" шнека).

Швидка реакція на зміни навантаження.

Висока надійність та відсутність обслуговування двигуна.

Висновок: Через сукупність вимог (висока стабільність швидкості, високий пусковий момент, надійність) саме векторно-керований асинхронний електропривод на сьогодні є де-факто промисловим стандартом для сучасних екструдерних установок. Він поєднує в собі надійність і простоту асинхронного двигуна з високими регульовальними характеристиками привода постійного струму, що робить його предметом даного дослідження.

1.5 Енергоефективність асинхронного електропривода екструдера

Екструдерні установки належать до класу високо енергоємного обладнання. Вони характеризуються значною встановленою потужністю привода (десятки, а іноді й сотні кіловат) та, як правило, тривалим безперервним режимом роботи (часто 24/7). У зв'язку з цим, сумарне енергоспоживання електропривода становить значну частину експлуатаційних витрат (ОРЕХ) виробничої лінії.

Тому питання енергоефективності є одним із ключових факторів при проектуванні та модернізації системи керування екструдером. Ефективність сучасного асинхронного електропривода визначається сукупністю ефективності його компонентів та інтелектуальністю системи керування.

1) Ефективність асинхронного двигуна

Основою сучасного привода є асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором. Його власний коефіцієнт корисної дії (ККД) є першим фактором енергозбереження. Сучасні двигуни класифікуються за міжнародним стандартом ІЕС 60034-30-1 за класами енергоефективності:

- ІЕ1 (Standard): Стандартна ефективність (зараз заборонені для ввезення у багатьох країнах).

- IE2 (High): Висока ефективність.
- IE3 (Premium): Преміум-ефективність.
- IE4 (Super Premium): Надвисока ефективність.

Використання двигунів класів IE3 та IE4 є обов'язковою вимогою для нового енергоефективного обладнання. Вони мають суттєво нижчі внутрішні втрати (втрати в міді обмоток, втрати в сталі на перемагнічування, механічні втрати) порівняно зі старими двигунами, що дає пряму економію електроенергії за будь-якого режиму роботи.

2) Ефективність системи керування (Перетворювач частоти)

Сам по собі АД, підключений напряму до мережі, є нерегульованим і вкрай неефективним з точки зору технологічного процесу, оскільки не дозволяє змінювати швидкість. Ключовим елементом енергозбереження в приводі екструдера є перетворювач частоти (ПЧ).

Вплив ПЧ на енергоефективність проявляється у двох аспектах:

Оптимальне регулювання швидкості: ПЧ дозволяє точно встановити швидкість обертання шнека відповідно до конкретних вимог технологічного процесу (тип сировини, геометрія виробу). Це усуває потребу в роботі на "номінальній" швидкості, яка часто є завищеною, та виключає будь-які механічні засоби регулювання, що призводять до втрат. Можливість гнучко знижувати швидкість при частковій завантаженості лінії дає фундаментальну економію, оскільки споживана потужність має пряму залежність від крутного моменту та швидкості.

Оптимізація роботи двигуна при часткових навантаженнях: Технологічний процес екструзії не завжди вимагає від привода повного номінального крутного моменту. Наприклад, при роботі з менш в'язкою сировиною або на зниженій продуктивності, двигун працює в режимі часткового навантаження.

При простому скалярному керуванні, ПЧ підтримує повний магнітний потік у двигуні, незалежно від реального навантаження на валу. Це призводить

до значних втрат на перемагнічування в сталі двигуна, оскільки він залишається "перезбудженим" відносно необхідного моменту.

Сучасні векторні алгоритми керування дозволяють вирішити цю проблему. Вони безперервно оцінюють необхідний крутний момент і динамічно оптимізують магнітний потік (знижуючи його при малих навантаженнях). Це значно знижує втрати в двигуні та підвищує ККД всієї системи саме в режимах часткового навантаження, які є дуже поширеними на практиці.

Таким чином, максимальна енергоефективність електропривода екструдера досягається не просто використанням ПЧ, а застосуванням інтелектуальних алгоритмів керування, таких як векторне, що здатні адаптувати енергоспоживання двигуна до реальних і миттєвих потреб технологічного процесу.

1.6 Основи векторного керування асинхронними двигунами

Проблема керування асинхронним двигуном

Як було зазначено у розділі 1.4, асинхронний двигун (АД) є винятково надійним та конструктивно простим, однак він є складним об'єктом керування. Його фундаментальна проблема полягає у тому, що він є багатозв'язною нелінійною системою.

На відміну від двигуна постійного струму (ДПС), де струм якоря прямо пропорційний крутному моменту, а струм збудження незалежно визначає магнітний потік, в асинхронному двигуні один і той самий струм статора одночасно відповідає і за створення магнітного потоку, і за створення крутного моменту.

При простому скалярному керуванні ці дві компоненти нерозривно пов'язані. Будь-яка зміна навантаження на валу призводить до зміни ковзання, що, у свою чергу, впливає на магнітний потік і навпаки. Це призводить до

низької динаміки, неможливості точного контролю моменту та "просідання" швидкості під навантаженням.

1. Принцип векторного керування (FOC)

Метод векторного керування (Vector Control), або польово-орієнтованого керування (Field-Oriented Control, FOC), був розроблений для вирішення саме цієї проблеми.

Основна ідея: математично перетворити складну систему АД у просту, "розв'язану" систему, яка поводить себе ідентично до ідеального двигуна постійного струму.

Це досягається шляхом переходу від нерухомої трифазної системи координат, пов'язаної зі статором, до обертової двофазної системи координат, яка жорстко прив'язана до вектора магнітного потоку ротора.

Цей математичний перехід (що виконується в реальному часі мікропроцесором перетворювача частоти) дозволяє розділити сумарний вектор струму статора на дві незалежні, ортогональні (перпендикулярні) складові:

1. Поздовжня складова струму :

- Цей вектор спрямований уздовж вектора магнітного потоку.
- Він відповідає виключно за створення магнітного потоку у машині.
- Є повним аналогом струму збудження у двигуні постійного струму.

2. Поперечна складова струму:

- Цей вектор спрямований перпендикулярно до вектора магнітного потоку.
- Він відповідає виключно за створення крутного моменту.
- Є повним аналогом струму якоря у двигуні постійного струму.

3. Реалізація системи векторного керування

Практично система векторного керування реалізується за допомогою перетворювача частоти (ПЧ) з відповідним програмним забезпеченням.

Основні етапи циклу керування:

4. Вимірювання: Система вимірює миттєві значення струмів у двох фазах статора, у класичній реалізації, точне положення ротора за допомогою енкодера (датчика положення).
5. Перетворення (Clarke & Park): За допомогою математичних перетворень Кларка та Парка, ПЧ обчислює реальні значення (потік) та (момент).
6. Регулювання: Система має два незалежних контури регулювання (зазвичай ПІ-регулятори):
 - Контур потоку: Порівнює заданий потік (зазвичай номінальний) з реальним і коригує його.
 - Контур моменту: Зовнішній контур швидкості видає завдання на необхідний момент. Це завдання порівнюється з реальним і миттєво коригується.
7. Зворотне перетворення: Обчислені керуючі напруги та перетворюються назад у трифазну систему.
8. Формування ШІМ: Перетворювач генерує необхідні імпульси напруги (ШІМ-сигнал) для живлення двигуна.

Переваги для екструдера: Завдяки такому розділенню, векторно-керований асинхронний привід забезпечує надзвичайно високу динаміку та точність:

- Миттєва реакція на зміну навантаження: Якщо в'язкість матеріалу в екструдері різко зростає, система це бачить як відхилення (або швидкості) і миттєво збільшує цей струм, не зачіпаючи магнітний потік. Швидкість залишається стабільною.
- Високий пусковий момент: Привід здатний розвивати повний (і вище) номінальний момент на нульовій та низькій швидкості, що критично важливо для "зриву" шнека із застиглим матеріалом.

Саме ці характеристики роблять векторне керування найбільш придатною технологією для прецизійного керування електроприводом екструдера.

1.7 Вимоги до електроприводу екструдера

1. Безступінчасте регулювання частоти обертання черв'яка в діапазоні не менше 15.
2. Привід повинен забезпечувати жорсткість характеристики в межах $\pm 2\%$ по швидкості при стандартних коливаннях напруги в мережі.
3. Надійність і довговічність.
4. Мінімально можливі габаритні розміри і маса.
5. Можливість автоматизації внаслідок безперервності та високої продуктивності процесу екструзії.
6. Стабільність швидкості обертання двигуна черв'ячного преса і тягового пристрою з помилкою до 3% на нижній межі частоти обертання.
7. Можливість одночасного узгодження зміни швидкості з одного значення на інші для всіх механізмів.

Висновки до розділу 1

1. У даному розділі проведено аналіз технологічного процесу екструзії та вимог до електроприводу екструдерних установок.

2. Встановлено, що екструзія є складним енергоємним процесом, ключовими параметрами якого є стабільність температури розплаву та тиску в зоні дозування. Забезпечення сталості геометричних розмірів виробу вимагає від електроприводу високої жорсткості механічних характеристик.

3. Визначено, що основними проблемами існуючих приводів є низька енергоефективність при дроселюванні або скалярному керуванні, а також недостатній пусковий момент для подолання опору холодного матеріалу ("зрив" шнека).

4. Порівняльний аналіз систем електроприводу показав, що найбільш перспективним рішенням для модернізації екструдера є використання частотно-регульованого асинхронного електроприводу з векторним керуванням. Ця система поєднує надійність асинхронного двигуна з високими динамічними показниками, аналогічними приводам постійного струму, і дозволяє реалізувати незалежне керування моментом і потоком.

2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА ТА ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

В якості екструдера вибираємо черв'ячний прес ЧП-45 для виготовлення поліамідних оболонок, з наступними технічними характеристиками:

Таблиця 2.1 – номінальні параметри ЧП-45

Тип преса	Число заходів	Діаметр ізольова. провода	відн. L/D	ступінь стисення	Кількість Обертів В хв	лінійна швидкість мм/хв	Діаметр Черв'яка
ЧП-45	1	4-13мм	28	2,5-3,5	6-160	600-800	45мм

Для розрахунку визначаємо швидкість здвигу по формулі 172 із [3]:

$$S = \frac{\pi^2 D^2 n}{60 \delta \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}} \quad (2.1)$$

де D - діаметр чер'вяка, D= 4.5 см,

$\delta=0.015$ см - величина радіального зазору

t=4 см - крок винтового каналу

n=160 об/хв - частота обертання

$$S = \frac{\pi^2 \cdot 4.5^2 \cdot 160}{60 \cdot 0.015 \sqrt{\pi^2 \cdot 4.5^2 + 4^2}} = 2417.01 \frac{1}{сек} \quad (2.2)$$

ефективна в'язкість $\mu_9 = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{сек} / \text{см}^2$

Втрати потужності на подолання тертя в зазорі визначаємо по формулі 171 в [3]:

$$\begin{aligned}
 N_2 &= \frac{10^{-4} \cdot \pi^3 \cdot D^3 e L_H \mu_3 n^2}{36 \delta t} = \\
 &= \frac{10^4 \cdot 3.14^3 \cdot 4.5^3 \cdot 0.6 \cdot 6 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 160^2}{36 \cdot 0.015 \cdot 4} = 6.018 \text{ кГМ/сек}
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

По формулі 169 в [3] визначаємо використовувану потужність для зміної глибини каналу

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{10^{-4} \cdot \pi^3 (t-e) L J \mu_3 h^2}{36 t} + \frac{10^{-3} d^2 \Delta p \cdot n}{6} = \\
 &= \frac{10^4 \cdot 3.14^3 (4-0.6) \cdot 6 \cdot 340.97 \cdot 0.5 \cdot 10^3 \cdot 160^2}{36 \cdot 4} + \frac{10^3 \cdot 1.94 \cdot 17.2 \cdot 160}{6} = \\
 &= 2.8 \text{ кГМ/сек}
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

де коефіцієнт J

$$\begin{aligned}
 J &= \frac{\pi^2 D^2 - 4t^2}{\pi^2} + \frac{(D+d_2)^3 - (D+d_1)^3}{3(d_2-d_1)} + \frac{2.3 \cdot \pi^2 D^5}{(t^2 + \pi^2 D^2)(h_H - h_2)} \lg \frac{h_H}{h_2} = \\
 &= \frac{\pi^2 \cdot 4.5^2 - 4 \cdot 4^2}{\pi^2} + \frac{(4.5+3.75)^3 - (4.5+4)^3}{3(3.75-4)} + \frac{2.3 \cdot \pi^2 \cdot 4.5^2}{(4^2 + 3.14^2 \cdot 4.5^2)(0.23-0.45)} = 340.97
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

$h_H=0.23$ – глибина гвинтового каналу на початку зони дозування, см

$d_2=3.75$ – діаметр осердя в кінці черв'яка, см

$d_1=4$ – діаметр осердя на початку зони дозування, см

$h_2=0.45$ – глибина гвинтового каналу в кінці черв'яка, см

$\Delta p=17.2$ – перепад тиску в головці, кг/ см²

$\alpha_2=1.94$ – постійна прямого потоку в см³

$L=6$ – довжина зони дозування, см

$e=0.6$ – ширина гребеня, см.

Загальна потужність потрібного двигуна:

$$N_{\partial} = \frac{N_1 + N_2}{\eta} = \frac{2.806 + 6.018}{0.6} = 14.7 \text{ кВт}
 \tag{2.6}$$

З [15] вибираємо асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу АІР160S4 У2 ІМ 1081. Номінальні дані двигуна наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Номінальні параметри АІР160S4 У2 ІМ 1081

Найменування параметрів двигуна	Значення параметрів
1. Номінальна потужність, $P_{2н}$	15 кВт
2. Лінійна напруга статора, $U_{1лн}$	380 В
3. Кількість пар полюсів, p_n	2
4. Момент інерції, J_d	0.06 кг·м ²
5. Синхронна частота обертання, n_c	1500 об/хв
6. Коефіцієнт корисної дії, $\eta_{дв}$	0.89
7. Коефіцієнт потужності, $\cos\varphi$	0.88
8. Кратність пускового моменту, m_n	2.2
9. Перевантажувальна здатність, m_k	2.3
10. Номінальне ковзання, s_n	0.02
11. Критичне ковзання, s_k	0.11
12. Номінальна частота мережі, f_n	50 Гц
13. Індуктивний опір розсіювання, x_μ	4.3 в.о.
14. Індуктивний опір розсіювання обмотки статора, x_1'	0.085 в.о.
15. Активний опір розсіювання обмотки статора, r_1'	0.042 в.о.
16. Індуктивний опір розсіювання обмотки ротора, x_2''	0.13 в.о.
17. Активний опір розсіювання обмотки ротора, r_2''	0.024 в.о.

Номінальна швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p_n} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ сек}^{-1} \quad (2.7)$$

Номінальна швидкість двигуна обертання валу двигуна:

$$\omega_n = (1 - s_n) \cdot \omega_0 = (1 - 0.02) \cdot 157 = 153.86 \frac{\text{рад}}{\text{сек}} \quad (2.8)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{15000}{153.86} = 97.5 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.9)$$

Обравши необхідний двигун, необхідно визначитись з наступними елементами для забезпечення потреб нашої системи.

Для регулювання частотою двигуна необхідно обрати частотний перетворювач

Для того щоб ми могли отримати необхідну швидкість обертів шнека в 160 об/хв. потрібно обрати редуктор

$$i = \frac{n_{\text{двигуна}}}{n_{\text{шнека max}}} = \frac{1500}{160} = 9.375 \quad (2.10)$$

Переглянувши каталог редукторів виробника Bonfiglioli найкращим для нас редуктором буде Bonfiglioli HDP 60 2 8.8 LP 160, даний редуктор з передаточним числом 8.8 дасть нам 170 об/хв на максимальній частоті чого буде достатньо для наших вимог.

Ключовим елементом сучасної системи електроприводу є частотний перетворювач (ПЧ). Для екструдерної установки, що характеризується важким режимом пуску та необхідністю стабілізації швидкості під навантаженням, вибір ПЧ є критичним етапом проектування.

Вибір конкретної моделі перетворювача частоти здійснювався на основі параметрів асинхронного електродвигуна (згідно з табл. 2.2) та технологічних вимог:

1. Напряга живлення: Трифазна промислова мережа 380 В, 50 Гц.
2. Потужність навантаження: Номінальна потужність двигуна кВт.
3. Номінальний струм: ПЧ повинен забезпечувати тривалий вихідний струм не менше за розрахунковий струм двигуна в режимі важкого навантаження (Heavy Duty).

Розрахунковий струм двигуна:

$$I_{n,Дв} = \frac{P_{2n}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{15000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.88 \cdot 0.89} \approx 29.1\text{A} \quad (2.11)$$

Режим роботи: Екструдер вимагає режиму постійного моменту (Constant Torque), тому ПЧ обирається за характеристиками Heavy Duty (HD).

4. Метод керування: Векторне керування (Vector Control) для забезпечення жорстких механічних характеристик.

- Обрання моделі

На основі розрахунків обрано частотний перетворювач компанії Mitsubishi Electric серії FR-A800, модель FR-A840-00470-2-60.

Технічні характеристики моделі FR-A840-00470 (в режимі HD):

- Номінальна потужність (HD): 15 кВт.
- Номінальний вихідний струм (HD): 31.0 А.
- Перевантажувальна здатність (HD): 200% (62 А) протягом 60 с; 250% (77.5 А) протягом 3 с.
- Діапазон вихідної частоти: 0.2 – 590 Гц.

Вибір моделі FR-A840-00470 зумовлений повною відповідністю вимогам надійності та функціональності:

1. Запас по струму: У режимі Heavy Duty перетворювач забезпечує номінальний струм 31.0 А, що перевищує номінальний струм двигуна (29.1 А).

2. Висока перевантажувальна здатність: Здатність витримувати 200% перевантаження дозволяє системі легко долати пускові моменти екструдера (де , тобто 220% короткочасно), запобігаючи аварійним зупинкам.

3. Векторне керування: Підтримка технології Real Sensorless Vector Control дозволяє отримувати повний крутний момент навіть на низьких частотах (до 0.3 Гц) без використання датчика зворотного зв'язку (енкодера), що спрощує конструкцію приводу.

4. Інтеграція: Вбудований контролер (PLC) та підтримка протоколу Modbus RTU дозволяють реалізувати алгоритми керування екструзією безпосередньо в частотному перетворювачі.

Таким чином, перетворювач Mitsubishi FR-A840-00470 є оптимальним рішенням, яке гарантує стабільну роботу екструдера у важких режимах навантаження.

Висновок до розділу 2

1. У розділі виконано розрахунок потужності та вибір силового електрообладнання для модернізації екструдера ЧП-45.

2. На основі розрахунку моментів опору від тертя та в'язкості полімеру обрано асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу AIP160S4 потужністю 15 кВт. Перевірка показала, що даний двигун забезпечує необхідний запас потужності для роботи в тривалому режимі.

3. Для узгодження швидкості двигуна (1500 об/хв) з технологічною швидкістю шнека обрано редуктор Bonfiglioli з передавальним числом 8.8.

4. Обґрунтовано вибір перетворювача частоти Mitsubishi Electric серії FR-A800 (модель FR-A840-00470). Вибір базується на наявності режиму Heavy Duty (перевантажувальна здатність 200%), підтримці технології бездавачевого векторного керування та можливості інтеграції в промислову мережу, що є критичним для забезпечення надійного пуску та стабільної роботи установки.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ

Знайдемо значення параметрів для побудови динамічної моделі: α , σ .

Номінальне значення фазної напруги:

$$U_{1\phi n} = \frac{U_{1\phi n}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219.4 \text{ В}; \quad (3.1)$$

Амплітуда фазної напруги:

$$U_{1\phi n \max} = U_{1\phi n} \cdot \sqrt{2} = 219.393 \cdot \sqrt{2} = 310.3 \text{ В}; \quad (3.2)$$

Номінальне значення фазного струму:

$$I_{1\phi n} = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_{1\phi n} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{15000}{3 \cdot 219.4 \cdot 0.88 \cdot 0.89} = 29.1 \text{ А}; \quad (3.3)$$

Кутова швидкість вектора напруги статора:

$$\omega_{0c} = 2\pi f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314.159 \text{ рад/с}; \quad (3.4)$$

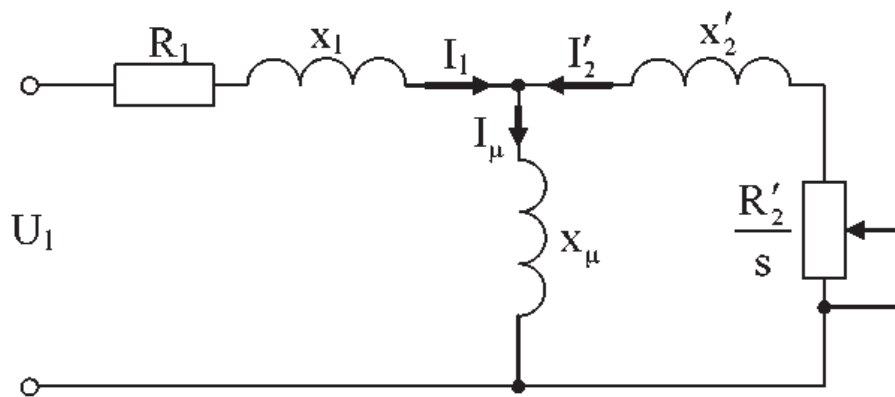


Рисунок 3.1 – Т-подібна схема заміщення АД

Знаходимо параметри Т- подібної схеми заміщення в:

Активний опір статора:

$$R_1 = R'_1 \cdot \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0.042 \cdot \frac{219.4}{29.1} = 0.31 \text{ Ом}; \quad (3.5)$$

Індуктивний опір статора:

$$X_1 = X'_1 \cdot \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0.085 \cdot \frac{219.4}{29.1} = 0.64 \text{ Ом}; \quad (3.6)$$

Активний опір ротора, приведений до статора:

$$R'_2 = R''_2 \cdot \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0.024 \cdot \frac{219.4}{29.1} = 0.18 \text{ Ом}; \quad (3.7)$$

Індуктивний опір ротора, приведений до статора:

$$X'_2 = X''_2 \cdot \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0.13 \cdot \frac{219.4}{29.1} = 0.98 \text{ Ом}; \quad (3.8)$$

Індуктивний опір розсіювання:

$$X_\mu = X'_\mu \cdot \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 4.3 \cdot \frac{219.4}{29.1} = 32.4 \text{ Ом}. \quad (3.9)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{X_\mu}{\omega_{0c}} = \frac{32.4}{314.159} = 0.1 \text{ Гн}; \quad (3.10)$$

Індуктивність розсіювання статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_{0c}} = \frac{0.64}{314.159} = 2.03 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; \quad (3.11)$$

Індуктивність розсіювання ротора:

$$L_{2\sigma} = \frac{X'_2}{\omega_{0c}} = \frac{0.98}{314.159} = 3.11 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; \quad (3.12)$$

Індуктивність статора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.1 + 2,03 \cdot 10^{-3} = 0.102 \text{ Гн}; \quad (3.13)$$

Індуктивність ротора:

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.1 + 2.57 \cdot 10^{-3} = 0.103 \text{ Гн}. \quad (3.14)$$

Параметри динамічної моделі:

$$\sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} = 0.102 - \frac{0.098^2}{0.103} = 0.008 \text{ Гн}; \quad (3.15)$$

$$\alpha = \frac{R'_2}{L_2} = \frac{0.15}{0.0885} = 1.69 \text{ с}^{-1}; \quad (3.16)$$

Висновок до розділу 3

1. У розділі проведено розрахунок параметрів схеми заміщення обраного асинхронного двигуна AIP160S4, необхідних для подальшого математичного моделювання.

2. Отримані чисельні значення параметрів є вихідними даними для налаштування регуляторів струму, потоку та швидкості в системі векторного керування, а також для побудови імітаційної моделі в середовищі MATLAB/Simulink у наступних розділах роботи.

4 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ЕКСТРУДЕРНОЇ УСТАНОВКИ, ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ

Векторне керування (ВК) асинхронними двигунами (АД) бере свій початок у 70-х роках ХХ століття. Завдяки значному прогресу в силовій напівпровідниковій електроніці та мікропроцесорних системах, ці високопродуктивні електроприводи сьогодні серійно виробляються провідними електротехнічними компаніями світу.

Принципова відмінність від скалярного керування

Ключова різниця між методами полягає у трактуванні фізичних величин:

Скалярне керування оперує ефективними (середніми) значеннями напруг, струмів і потокозчеплень, вважаючи їх скалярними величинами. Воно базується на залежностях схеми заміщення АД.

Векторне керування розглядає ті самі величини як просторові вектори. Воно ґрунтується на структурних схемах і математичному описі АД в обертовій системі координат.

Механізм векторного керування

Принцип ВК полягає у досягненні незалежного керування потоком і моментом, роблячи АД подібним до двигуна постійного струму (ДПС). Це досягається завдяки наступним крокам:

Визначення вектора потоку: Спочатку необхідно знайти напрямок і кутове положення вектора потокозчеплення ротора.

Система координат : Вводиться ортогональна система координат , де вісь суміщена з напрямком вектора потоку ротора.

Роздільне регулювання:

Вісь (Потік/Збудження): Складова струму статора , яка регулюється напругою , відповідає за формування та підтримку необхідної амплітуди вектора потокозчеплення ротора (аналог обмотки збудження ДПС).

Вісь (Момент/Якір): Складова струму статора , яка регулюється напругою , визначає електромагнітний момент, що розвиває двигун (аналог якірної обмотки ДПС).

Живлення АД при цьому забезпечує інвертор, здатний у будь-який момент часу сформувати вектор напруги (або струму) статора з необхідною амплітудою та кутовим положенням.

Еволюція методів визначення потоку

Ранні системи векторного керування (як, наприклад, розробка Siemens кінця 60-х) використовували пряме вимірювання магнітного потоку.

Рання реалізація: Використовувалися датчики Хола, встановлені в повітряному зазорі двигуна (зазвичай два, зсунуті на електричних градусів), для безпосереднього вимірювання головного магнітного потоку.

Недолік: Головним мінусом такого підходу була необхідність використання спеціалізованих двигунів з вбудованими датчиками, що підвищувало їхню вартість та ускладнювало конструкцію.

Перехід до керування на основі моделі

Через конструктивні обмеження та необхідність підвищення надійності, розвиток векторних систем пішов шляхом відмови від прямого вимірювання на користь оцінки потоку за допомогою математичної моделі.

Сучасні системи використовують математичні моделі електромагнітних процесів в АД для обчислення вектора потокозчеплення на основі вимірних напруг і струмів статора. Цей перехід, відомий як безсенсорне керування або керування на основі спостерігача, став можливим лише завдяки подальшим успіхам у галузі мікропроцесорної техніки та силової електроніки.

4.1 Функціональна схема САК АЕП екструдерної установки

Функціональна схема системи регулювання швидкості електропривода при векторному керуванні АД наведена на рисунку. 4.1.

Математичний опис АД. Традиційно розв'язання задач синтезу та аналізу векторно-керованих АЕП базується на математичному описі ідеалізованої асинхронної машини. В системі рухомих координат (d,q) , що обертається з кутовою швидкістю ω_0 , ідеалізований короткозамкнений АД описуватиметься системою рівнянь (4.1) – (4.10):

$$\frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_0 \Psi_{sq} + R_s I_{sd} = U_{sd}; \quad (4.1)$$

$$\frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_0 \Psi_{sd} + R_s I_{sq} = U_{sq}; \quad (4.2)$$

$$\frac{d\Psi_{rd}}{dt} - \omega_{sl} \Psi_{rq} + R_r I_{rd} = 0; \quad (4.3)$$

$$\frac{d\Psi_{rq}}{dt} + \omega_{sl} \Psi_{rd} + R_r I_{rq} = 0; \quad (4.4)$$

$$\Psi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd}; \quad \Psi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq}; \quad (4.5)$$

$$\Psi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd}; \quad \Psi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq}; \quad (4.6)$$

$$\Psi_{md} = L_m I_{md}; \quad \Psi_{mq} = L_m I_{mq}; \quad (4.7)$$

$$I_{md} = I_{sd} + I_{rd}; \quad I_{mq} = I_{sq} + I_{rq}; \quad (4.8)$$

$$M_E = \frac{3z_p}{2} K_r (\Psi_{rd} I_{sq} - \Psi_{rq} I_{sd}); \quad (4.9)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = (M_E - M_H) \frac{1}{J}, \quad (4.10)$$

де змінними є: компоненти узагальнених векторів напруги статора $\bar{U}_s = [U_{sd}, U_{sq}]^T$, струму статора $\bar{I}_s = [I_{sd}, I_{sq}]^T$, струму ротора $\bar{I}_r = [I_{rd}, I_{rq}]^T$, струму намагнічування $\bar{I}_m = [I_{md}, I_{mq}]^T$, потокозчеплення статора $\bar{\Psi}_s = [\Psi_{sd}, \Psi_{sq}]^T$, потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r = [\Psi_{rd}, \Psi_{rq}]^T$; головного потокозчеплення $\bar{\Psi}_m = [\Psi_{md}, \Psi_{mq}]^T$;

M_E – електромагнітний момент двигуна;

M_H – момент навантаження;

J – сумарний момент інерції АЕП;

z_p – кількість пар полюсів АД;

ω – кутова швидкість обертання ротора двигуна;

$\omega_{sl} = \omega_0 - z_p \omega$ – кутова швидкість ковзання АД;

R_s, R_r – відповідно активні опори фаз статора та ротора, зведеного до статора;

L_m – взаємна індуктивність між статором та ротором;

$L_s = L_m + L_{s\sigma}, L_r = L_m + L_{r\sigma}$ – повні індуктивності фаз;

$L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – індуктивності від полів розсіювання статора та ротора відповідно; $K_r = L_m/L_r$.

Опис (4.1) – (4.10) отримано для припущення, що всі параметри моделі є сталими.

Якщо рухомі координати (d, q) зорієнтовані за вектором потокозчеплення ротора, що математично виражається у вигляді умов

$$\Psi_{rq} = 0; \quad \frac{d\Psi_{rq}}{dt} = 0; \quad \Psi_{rd} = \Psi_r = |\bar{\Psi}_r|, \quad (4.12)$$

то із (4.1) – (4.10) отримаємо модель АД у вигляді системи диференціальних рівнянь (4.13) – (4.16)

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = -\frac{\Psi_r}{T_r} + \frac{I_d L_m}{T_r}; \quad (4.13)$$

$$\frac{dI_d}{dt} = -\frac{I_d R'_s}{L'_s} + \frac{U_{sd}}{L'_s} + \frac{(\omega_0 L'_s I_q + K_r \Psi_r / T_r)}{L'_s}; \quad (4.14)$$

$$\frac{dI_q}{dt} = -\frac{I_q R'_s}{L'_s} + \frac{U_{sq}}{L'_s} - \frac{(\omega_0 L'_s I_d + K_r \Psi_r z_p \omega)}{L'_s}; \quad (4.15)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = (M_E - M_H) \frac{1}{J}, \quad (4.16)$$

де $I_d \equiv I_{sd}$, $I_q \equiv I_{sq}$ – відповідно потокова та моментна компоненти вектора струму статора АД;

$$\Psi_r = |\bar{\Psi}_r|;$$

$$T_r = L_r / R_r \text{ – стала часу ротора;}$$

$$L'_s = L_{s\sigma} + K_r L_{r\sigma}; \quad R'_s = R_s + K_r^2 R_r.$$

При цьому швидкість обертання $\bar{\Psi}_r$ дорівнюватиме

$$\omega_0 = \omega_{sl} + z_p \omega, \quad (4.17)$$

де швидкість ковзання $\omega_{sl} = K_r R_r I_q / \Psi_r$, а електромагнітний момент двигуна в (16) визначатиметься як

$$M_E = \frac{3z_p}{2} K_r I_q \Psi_r. \quad (4.18)$$

На основі (13) – (18) реалізується традиційне векторне керування АД. Математичний опис ПЧ. Динамічні властивості перетворювача частоти, як відомо, з достатньою для практики точністю відтворюються аперіодичною ланкою 1-го порядку. Саме такий опис ми використаємо нижче при синтезі регуляторів змінних стану АЕП.

Система векторного керування. Функціональна схема системи векторного керування АЕП представлена на рис.4.1. В даній системі можна умовно виділити силову частину, частину векторних перетворень та частину регулювання.

До силовій частині входять випрямляч напруги трифазної стандартної мережі живлення В, інвертор напруги з широтно-імпульсною модуляцією ПН та АД.

Частину векторних перетворень системи складають перетворювачі фаз ПФ1, ПФ2, перетворювачі координат ПК1, ПК2, блок компенсації зв'язків БКЗ

та підсистема оцінювання вектора потокозчеплення ротора АД. У ПФ2 вимірювані сигнали струмів фаз статора I_A, I_B трифазної системи А,В,С перетворюються у сигнали I_α, I_β двофазної системи α, β згідно із співвідношеннями

$$I_\alpha = I_A; \quad I_\beta = (I_A + 2I_B)/\sqrt{3}. \quad (4.19)$$

У ПК2 сигнали I_α, I_β перетворюються у сигнали I_d, I_q рухомої системи координат d,q згідно із виразами

$$I_d = I_\alpha \cos\Theta_0 + I_\beta \sin\Theta_0; \quad I_q = I_\beta \cos\Theta_0 - I_\alpha \sin\Theta_0, \quad (4.20)$$

де Θ_0 є кутом повороту вектора $\bar{\Psi}_r$. У БКЗ визначаються сигнали u_{dk}, u_{qk} компенсації внутрішніх зв'язків моделі АД згідно із отриманими на основі рівнянь (5.14) та (5.15) виразами

$$u_{dk} = -(L'_s \omega_0 I_q + K_r \Psi_r / T_r) / K_u; \quad u_{qk} = (L'_s \omega_0 I_d + K_r z_p \omega \Psi_r) / K_u, \quad (4.21)$$

де K_u – коефіцієнт передачі ІН. Після обчислення u_{dk}, u_{qk} у БКЗ визначаються завдання $u_{d\Sigma}, u_{q\Sigma}$ складових вектора напруги статора двигуна U_d, U_q відповідно, як

$$u_{d\Sigma} = u_d + u_{dk}; \quad u_{q\Sigma} = u_q + u_{qk}. \quad (4.22)$$

У ПК1 здійснюється перетворення сигналів із системи координат d,q у систему координат α, β згідно із виразами

$$u_\alpha = u_{d\Sigma} \cos\Theta_0 - u_{q\Sigma} \sin\Theta_0; \quad u_\beta = u_{d\Sigma} \sin\Theta_0 + u_{q\Sigma} \cos\Theta_0. \quad (4.23)$$

В ПФ1 сигнали u_α , u_β двофазної системи перетворюються у сигнали завдання напруг статора двигуна u_A , u_B , u_C трифазної системи А,В,С, як

$$u_A = u_\alpha; \quad u_B = (-u_\alpha + \sqrt{3}u_\beta)/2; \quad u_C = (-u_\alpha - \sqrt{3}u_\beta)/2. \quad (4.24)$$

У підсистемі оцінювання вектора потокозчеплення ротора АД визначається модуль Ψ_r та кут Θ_0 вектора $\bar{\Psi}_r$ згідно із отриманими з рівняння (4.13) та (5.17) виразами

$$\Psi_r(s) = I_d(s) \times \frac{L_m}{T_r s + 1}; \quad \Theta_0(t) = \int_0^t \omega_0(\tau) d\tau, \quad (4.25)$$

де s – змінна перетворення Лапласа. Ця підсистема включає блок моделювання БМ, де оцінюється Ψ_r , та сукупність ланок для обчислення Θ_0 .

Частину регулювання зображеної на рис. 4.1 системи складають 4 регулятори ІІІ-типу з відповідними їм елементами підсумування – регулятори складових вектора струму статора двигуна РС1, РС2, регулятор швидкості РШ та регулятор потоку РП, а також давач швидкості двигуна ДШ та задавач інтенсивності зміни швидкості ЗІ. Останній забезпечує трансформацію прямокутної форми командного сигналу ω^{**} у трапецієвидну форму сигналу ω^* завдання швидкості двигуна.

Необхідно зазначити, що для успішного функціонування даної системи потрібне здійснення адаптації параметрів оцінювача $\bar{\Psi}_r$ до реальних значень опору ротора АД, який зазнає значних варіацій при змінах теплового стану двигуна. Проте, оскільки розгляд алгоритмів адаптування до змін R_r виходив за межі даної роботи, підсистема адаптації на рисунку 4.1 не показана.

Для векторного керування використовуються стандартні коефіцієнти регуляторів які підходять для будь якого двигуна. Головною умовою налаштувань цих регуляторів є те щоб вірно налаштувати коефіцієнт

демпфування для регуляторів швидкості та струму. Використовують наступні стандартні співвідношення для пропорційних та інтегральних регуляторів: $k_i = \frac{k^2}{2}$ та $k_i = \frac{k^2}{4}$, з коефіцієнтами демпфування $\xi = 0.707$ та $\xi = 1$, відповідно. Для регулятора кутової швидкості використовують коефіцієнт демпфування $\xi = 0.707$, оскільки даний коефіцієнт дозволяє швидше зменшити похибку за рахунок перегулювання, в той час в регуляторі струму використовується коефіцієнт демпфування $\xi = 1$, оскільки даний процес буде трохи повільніше зменшувати похибку до нуля, але без перегулювання. При дослідженнях використовувалися наступні коефіцієнти регуляторів: $k_{\omega} = 100$, $k_{\omega i} = 5000$ та струму $k_{id} = k_{iq} = 700$, $k_{iid} = k_{iiq} = 120000$.

4.2 Вибір необхідного обладнання

В 2 розділі було обрано двигун та частотний перетворювач.

В ролі головного органу управління системи в нас виступатиме ПЛК від фірми Mitsubishi FX5UC-32MT/D, з параметрами зазначеними в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри ПЛК Mitsubishi FX5UC-32MT/D

Параметр	Значення
Серія та модель	MELSEC iQ-F, FX5UC-32MT/D
Напруга живлення	24 В постійного струму (DC) (+20% / -15%)
Споживана потужність	5 Вт
Загальна кількість точок в/в	32 точки
Дискретні входи	16 каналів (24 В DC, 5.3 мА)
Тип підключення входів	Sink (спільний плюс)
Дискретні виходи	16 каналів
Тип виходів	Транзисторний (Sink)

Максимальний струм навантаження	0.1 А на точку (для керування реле або SSR)
Вбудовані інтерфейси	1 x Ethernet (100BASE-TX) 1 x RS-485
Підтримувані протоколи	CC-Link IE Field Basic, Modbus TCP/RTU
Пам'ять програми	64 000 кроків
Швидкодія	34 нс
Тип з'єднання (клеми)	Конектори MIP
Габаритні розміри (ШхВхГ)	42.1 x 90 x 89.1 мм

Також нам знадобляться 2 модулі розширення MITSUBISHI FX5-4AD-ADP до ПЛК щоб під'єднати необхідні нам датчики температури та тиску характеристики яких зазначено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Характеристики аналогових модулів FX5-4AD-ADP

Параметр	Значення
Модель	FX5-4AD-ADP
Кількість каналів	4 входи
Типи вхідних сигналів	Струм: 4...20 мА (DC) Напряга: -10...+10 В (DC)
Роздільна здатність	14 біт
Точність перетворення	±0.1% (від повної шкали)
Швидкість обробки	80 мкс на канал
Спосіб встановлення	З лівого боку від CPU (формат адаптера)

Для зручного управління установкою було обрано панель оператора MITSUBISHI GT GT2507-WTBD характеристики якої зазначено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – характеристики MITSUBISHI GT GT2507-WTBD

Параметр	Значення
----------	----------

Модель	GT2507-WTBD
Дисплей	7" TFT LCD, 800x480 (WVGA), 65k кольорів
Комунікаційні порти	• 2 x Ethernet (розділення мереж)• 1 x RS-232, 1 x RS-422/485• USB (Host/Device)
Пам'ять користувача	32 МБ (Flash)
Архівація даних	Слот для SD-карти, USB-порт (для логів і рецептів)
Живлення	24 В DC
Захист	IP67F (пило- та вологозахист передньої панелі)

Датчики температури встановлюються у зони нагріву циліндра та голівку екструдера характеристики яких зазначено в таблиці 4.4

Таблиця 4.4 – Характеристики датчика РТ100

Параметр	Значення
Тип датчика	Термоперетворювач опору (Pt100) з нормуючим підсилювачем
Діапазон вимірювання	0...400°C (налаштовується)
Вихідний сигнал	4...20 мА (2-провідна схема)
Клас точності	A ($\pm 0.15\% + 0.002$ *)
Напруга живлення	10...30 В постійного струму (DC)
Матеріал захисної арматури	Нержавіюча сталь AISI 304
Тип приєднання	Різьбове (наприклад, G1/2" або M20x1.5)

Датчик тиску розплаву використовується для контролю тиску полімеру перед філь'єрою. Це найдорожчий і найвідповідальніший датчик, характеристики якого наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – характеристики датчика Gefran

Параметр	Значення
Виробник / Серія	Gefran / Серія M32
Призначення	Вимірювання тиску високотемпературних в'язких середовищ
Діапазон вимірювання	0...350 Бар (або 0...500 Бар)
Вихідний сигнал	4...20 мА (2-провідна схема)
Максимальна температура середовища	400°C (на мембрані)
Точність (похибка)	±0.25% від повної шкали (FS)
Напруга живлення	10...30 В постійного струму (DC)
Механічне з'єднання	Стандартне різьблення 1/2-20 UNF

Енкодер необхідний для зворотного зв'язку системи векторного керування двигуном, характеристики якого вказані в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Характеристики енкодера

Параметр	Значення
Виробник / Серія	Omron E6B2-CWZ6C
Тип	Інкрементальний, оптичний
Роздільна здатність	1024 імпульсів/оберт (P/R)
Вихідні фази	A, B, Z (фаза Z — нульова мітка)
Тип виходу	Відкритий колектор NPN
Напруга живлення	5...24 В постійного струму (DC)
Максимальна частота відгуку	100 кГц
Діаметр валу	6 мм (з'єднується через муфту)
Підключення	До швидкісних входів

Датчик рівня встановлюється в завантажувальний бункер для виявлення наявності гранул пластику. Характеристики датчика наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Характеристики датчика рівня

Параметр	Значення
Модель	Autonics CR30-15DN
Тип датчика	Ємнісний безконтактний (Capacitive Proximity Sensor)
Діаметр корпусу	M30 (30 мм)
Відстань спрацювання	15 мм (регулюється потенціометром)
Об'єкт виявлення	Пластикові гранули, порошок, рідина
Напруга живлення	12-24 В постійного струму (DC)
Тип виходу	NPN, Нормально Відкритий (NO)
Індикація спрацювання	Червоний LED індикатор
Матеріал корпусу	Нікельована латунь / Термостійкий пластик
Ступінь захисту	IP65
Підключення	Кабель 2 м (3-провідний: Коричневий +24V, Синій 0V, Чорний Signal)

Для живлення контролера, НМІ та іншого обладнання обираємо блок живлення на 120 Вт від виробника Schneider характеристики якого наведені в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – характеристики блоку живлення

Параметр	Значення
Виробник та серія	Schneider Electric, Modicon ABL5 (Optimized)
Код замовлення (Артикул)	ABLS1A24050
Вхідна напруга	100...240 В змінного струму (AC), 1 фаза

Вихідна напруга	24 В постійного струму (DC)
Діапазон регулювання виходу	24.0...28.0 В (регулюється потенціометром на передній панелі)
Номінальний струм	5 А
Номінальна потужність	120 Вт (забезпечує подвійний запас потужності для нашої системи)
ККД (Ефективність)	> 88% (при 230 В)
Захисні функції	Від короткого замикання (автоматичне відновлення)• Від перевантаження• Від перенапруги• Від перегріву
Індикація	Світлодіод (LED) статусу вихідної напруги
Монтаж	DIN-рейка (35 мм)
Габаритні розміри (ШxВxГ)	40 x 123.6 x 117.6 мм
Робоча температура	-20...+70 °С (зі зниженням потужності після 55°С)

Одним з головних елементів безпеки є кнопка аварійної зупинки, згідно зі стандартами вона повинна мати «грибоподібну» форму, червоний колір на жовтому фоні та механізм фіксації, загальні характеристики наведено в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Характеристики кнопки аварійної зупинки

Параметр	Значення
Модель	Schneider XB4BS8445
Тип головки	Грибоподібна Ø 40 мм
Колір	Червоний (Red)
Спосіб повернення	Поворот для розблокування
Контактна група	1 NC + 1 NO (NC розриває коло безпеки, NO дає сигнал на ПЛК про аварію)

Механічний ресурс	300 000 циклів
Матеріал корпусу	Хромований метал
Додатковий аксесуар	Жовта етикетка "Emergency Stop"

Висновок до розділу 4

1. У розділі розроблено функціональну схему системи керування та здійснено вибір засобів автоматизації.
2. Детально розглянуто математичний апарат векторного керування, що базується на координатних перетвореннях Кларка-Парка. Обґрунтовано необхідність використання спостерігача стану для оцінки потокозчеплення ротора без використання датчиків Хола.
3. Сформовано апаратну базу системи керування на основі компонентів Mitsubishi Electric. Обраний ПЛК серії FX5UC забезпечує достатню швидкодію для обробки сигналів датчиків та реалізації ПД-законів регулювання температури.
4. Підібрано комплект датчиків (температури Pt100, тиску розплаву Gefran, енкодер Omron), які забезпечують повний контроль технологічного процесу та зворотний зв'язок для системи керування.
5. Розроблена апаратна конфігурація (ПЛК + Панель оператора GT2507 + ПЧ FR-A800) створює єдину інформаційну систему, що дозволяє реалізувати складні алгоритми захисту та керування, необхідні для сучасного екструдера.

5 ПОБУДОВА МОДЕЛІ СИСТЕМИ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ САК АЕП ЕКСТРУДЕРНОЇ УСТАНОВКИ

Для перевірки працездатності розробленої системи керування та дослідження динамічних характеристик електроприводу шнека екструдера було розроблено імітаційну модель у середовищі MATLAB Simulink.

Модель базується на системі диференціальних рівнянь асинхронного двигуна у рухомій системі координат ($d-q$) та реалізує алгоритм прямого векторного керування (Direct Field Oriented Control — DFOC) з використанням адаптивного спостерігача стану.

5.1 Загальна структура моделі

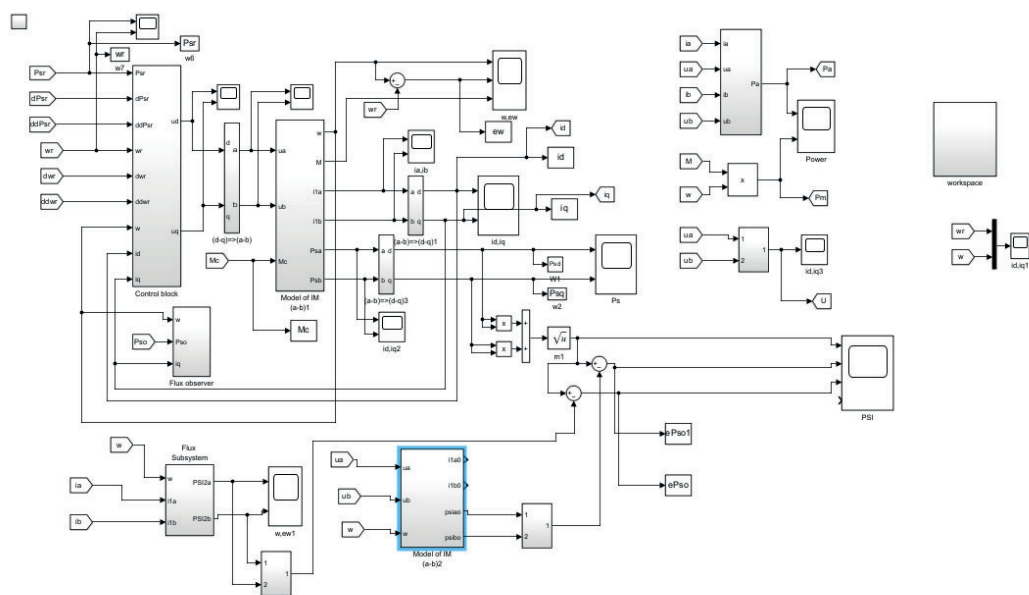


Рисунок 5.1 – Загальний вигляд моделі

Загальний вигляд розробленої моделі наведено на рисунку 5.1. Система побудована за модульним принципом і складається з наступних функціональних блоків:

1. Control block (Блок керування): Головний обчислювальний вузол, що містить регулятори швидкості, потоку та струмів. На його виході формуються керуючі сигнали напруги u_d, u_q .
2. Flux observer (Спостерігач потоку): Блок, що відновлює значення модуля та кута вектора потокозчеплення ротора, а також оцінює швидкість обертання на основі виміряних струмів та напруг статора.
3. Model of IM (Модель двигуна): Підсистема, що імітує фізичні процеси в асинхронному двигуні потужністю 15 кВт. Вхідними величинами є фазні напруги u_a, u_b , вихідними — струми статора (i_a, i_b) та кутова швидкість.
4. Coordinate Transformations (Блоки перетворень): Блоки $(d-q) \Rightarrow (a-b)$ та $(a-b) \Rightarrow (d-q)$, що здійснюють прямі та обернені перетворення Парка-Горєва для переходу між нерухомою та обертовою системами координат.
5. Load Torque (Момент навантаження): Блок M_c , що формує збурення на валу двигуна, імітуючи опір шнека екструдера.

5.2 Реалізація алгоритму прямого векторного керування

Ключовим елементом системи є підсистема керування (Control block), внутрішня структура якої наведена на рисунку 5.2.

Схема реалізує принцип каскадного (підпорядкованого) регулювання і складається з чотирьох взаємопов'язаних регуляторів:

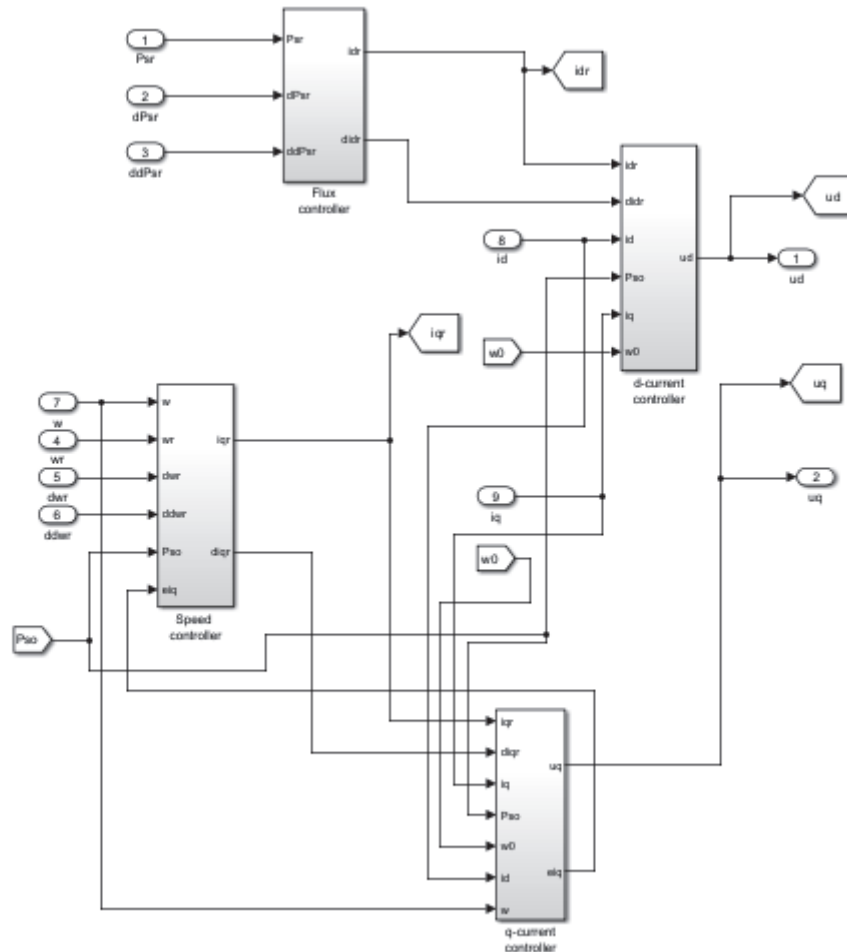


Рисунок 5.2 – Внутрішня структура Control block

Зовнішній контур, що відповідає за підтримку заданої швидкості обертання шнека.

- Входи: Завдання швидкості (ω), дійсна швидкість (ω^r), їх похідні ($d\omega^r, dd\omega^r$) та оцінка потоку (P_{so}).
- Функція: Блок порівнює задану та дійсну швидкості. Вихідний сигнал регулятора (i_{qr}) є завданням на активну складову струму статора (i_d^*), яка пропорційна електромагнітному моменту двигуна.

Контур регулювання потоку (Flux controller). Відповідає за стабілізацію магнітного стану машини.

Входи: Завдання потокозчеплення (P_{sr}) та його похідні.

Функція: Формує завдання на реактивну складову струму статора (i_{dr} або i_d^*), яка створює магнітний потік збудження.

Контури регулювання струму (d-current / q-current controller)

Це швидкодіючі внутрішні контури, які забезпечують відпрацювання завдань по струму.

Особливістю реалізованої схеми є наявність перехресних зв'язків для повної компенсації взаємовпливу осей d та q. Як видно зі схеми, на входи регуляторів струму подаються:

P_{so} (Psi Observer): Значення потоку від спостерігача.

ω_0 : Синхронна кутова швидкість системи координат.

i_d, i_q : Реальні значення струмів.

Використання цих сигналів дозволяє математично компенсувати ЕРС обертання та перехресні індуктивні зв'язки, забезпечуючи незалежне керування моментом і потоком.

Спостерігач стану (Flux Observer)

Для реалізації прямого векторного керування та можливості роботи без датчика швидкості (в аварійному режимі) в модель введено блок спостерігача.

Він розв'язує рівняння стану асинхронного двигуна в режимі реального часу, використовуючи виміряні миттєві значення струмів (i_a, i_b) та напруг (u_a, u_b).

Вихідними даними блоку є вектор потокозчеплення ротора (ψ_r) та оцінка кутової швидкості, які використовуються для орієнтації системи координат (d, q).

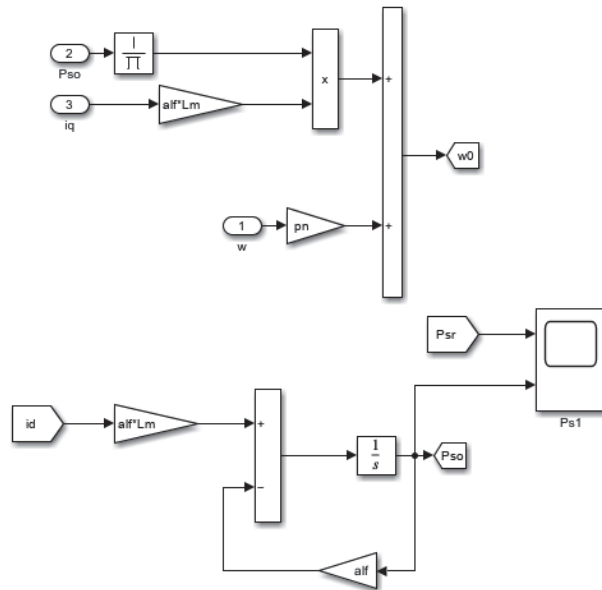


Рисунок 5.3 – Внутрішня структура Flux observer

5.3 Результати моделювання режимів роботи

За допомогою розробленої моделі проведено дослідження трьох основних режимів роботи екструдера.

Перший режим роботи при статичному номінальному навантаженні. Змодельовано розгін навантаженого двигуна до номінальної швидкості. Графіки перехідних процесів, рис. 5.4 – 5.5, показують, що завдяки роздільному керуванню струмами i_d та i_q , пусковий момент досягає кратності номінального моменту навантаження без перевищення допустимих струмів статора. Час регулювання швидкості при накиді навантаження складає менше 0.2 с, статична похибка відпрацювання швидкості відсутня, динамічна похибка, яка присутня при розгоні та гальмуванні, за малий проміжок часу затухає до нуля. При статичному моменті навантаження алгоритм векторного керування забезпечує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій.

Для дослідження другого режиму роботи необхідно на номінальній швидкості прикладати момент що є сумою статичного складника M_n та

динамічного складника синусоїдної форми з амплітудою $0.2M_n$ та частотою 1 Гц. Наявність динамічного складника моменту навантаження відображає нестабільність в'язкості екструзійного матеріалу, оскільки коливання в'язкості сировини досить характерні для процесів екструзії. Графіках перехідних процесів, рис. 5.6 – 5.7, показують, що при відпрацюванні даного моменту навантаження присутня динамічна похибка на всьому проміжку часі відпрацюванні заданої траєкторії. Динамічна похибка відпрацюванні швидкості має також саму частоту коливань як і динамічний момент навантаження при цьому амплітуда її становить 0.33 рад/с, що становить 0.22% відхилення від номінальної швидкості. При цьому модуль струму не перевищує $1.5I_n$.

При дослідженні третього режиму роботи двигун працює на швидкості 10 рад/с, $1/15$ від номінальної, при цьому прикладається момент що є сумою статичного складника M_n та динамічного складника синусоїдної форми з амплітудою $0.2M_n$ та частотою 0.5 Гц. Динамічна похибка також як і в попередньому досліді повторює частоту коливань моменту, але при цьому амплітуда похибки дорівнює 0.167 рад/с, що становить від заданої швидкості 1.67%. Так як і в попередньому досліді модуль струму не перевищує $1.5I_n$.

За результатами математичного моделювання можна зробити наступний висновок, що система прямого векторного керування відповідає всім поставленим вимогам та забезпечує точність керування в уставлених межах.

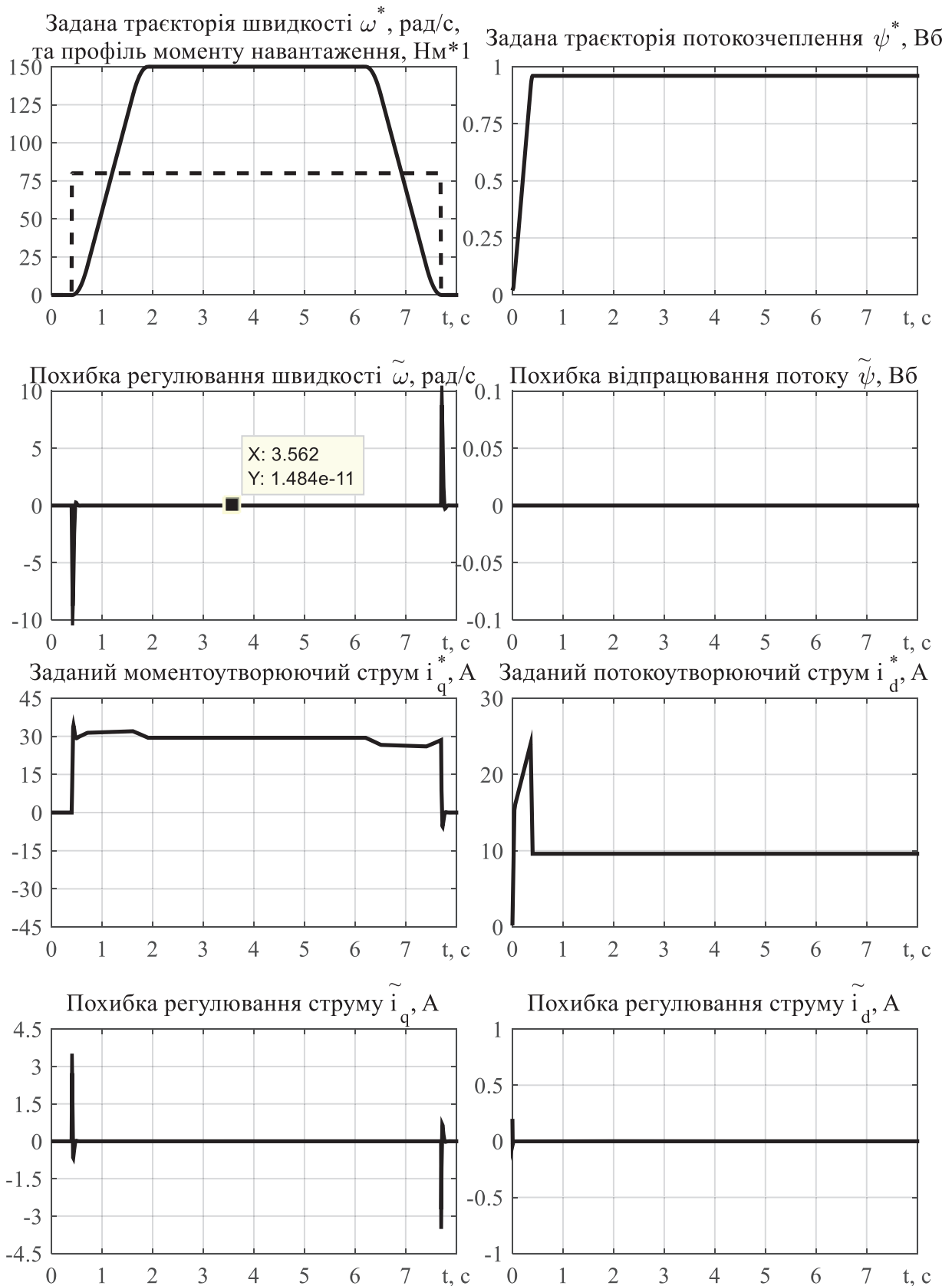


Рисунок 5.4 – Графіки перехідних процесів при номінальному навантаженні

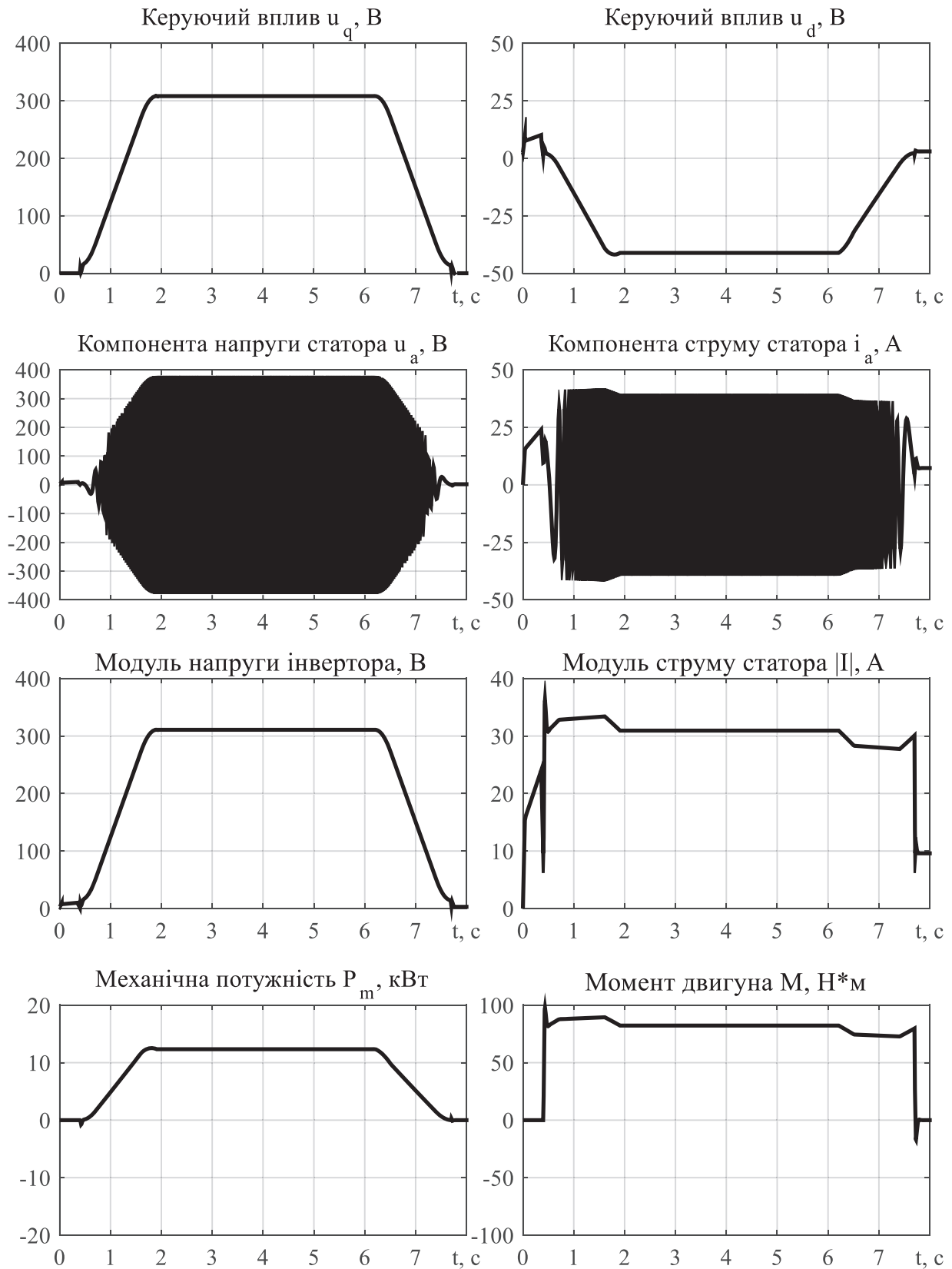


Рисунок 5.5 – Графіки перехідних процесів при номінальному навантаженні

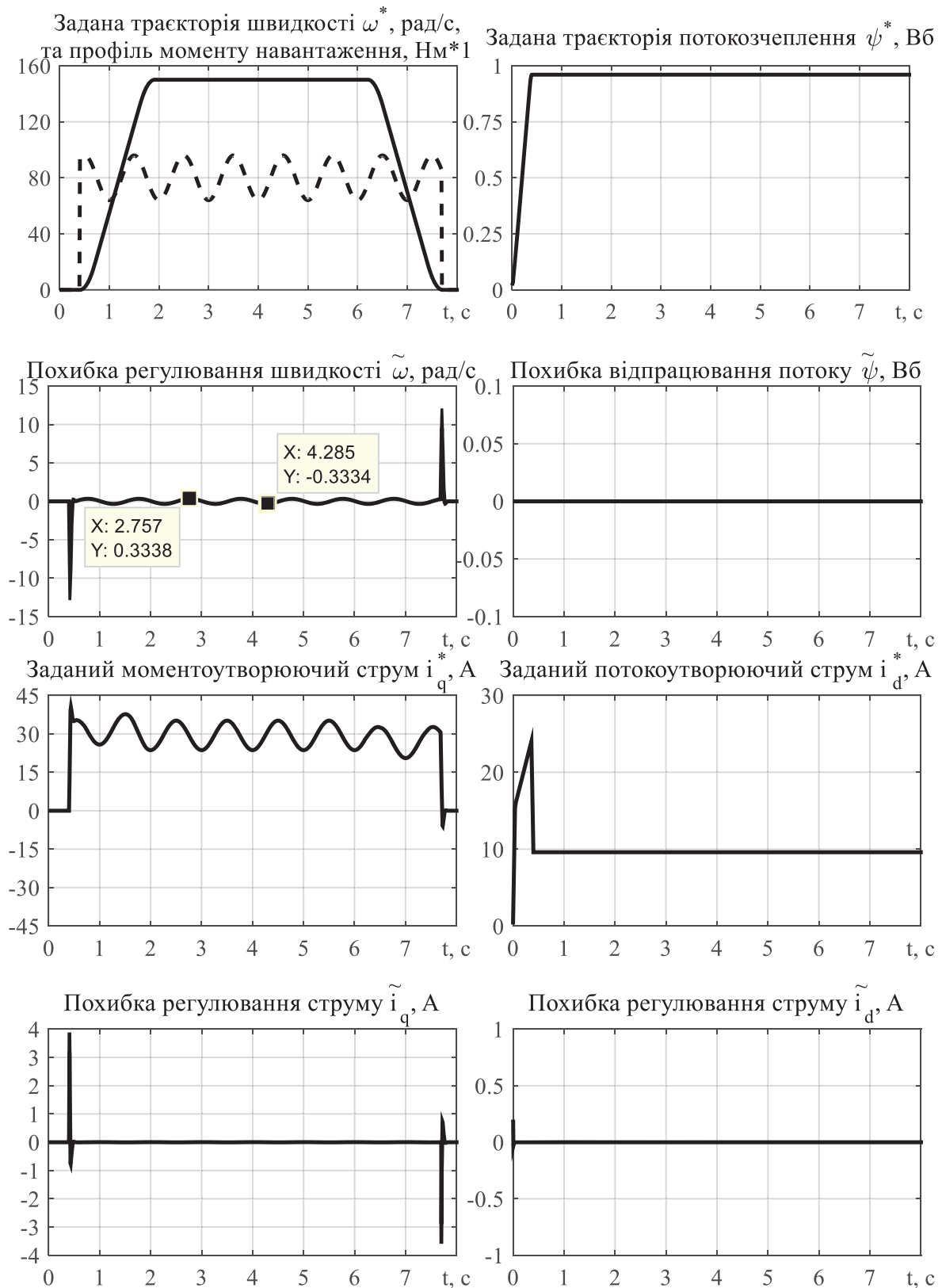


Рисунок 5.6 – Графіки перехідних процесів при динамічному моментів навантаження

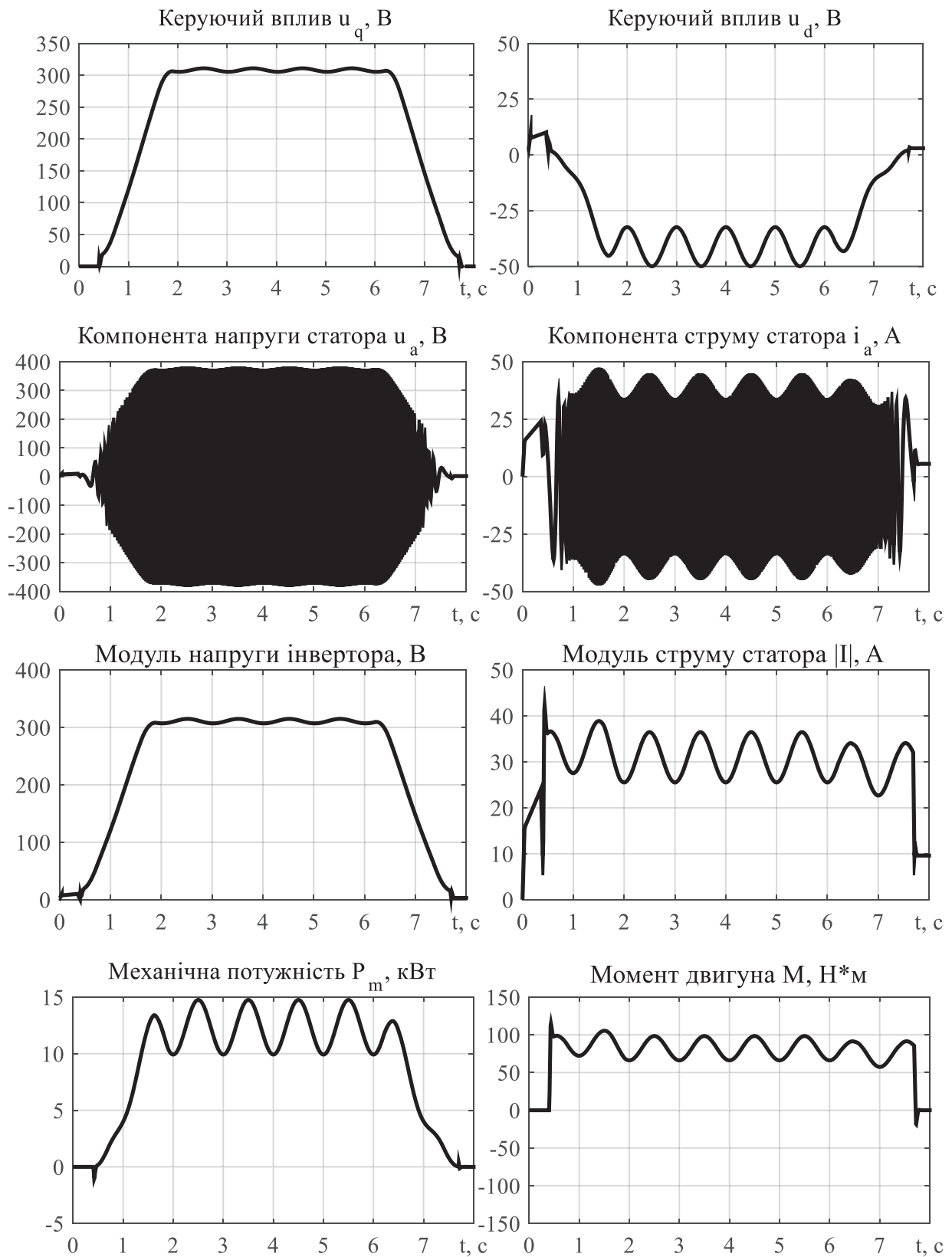


Рисунок 5.7 – Графіки перехідних процесів при динамічному моментів навантаження

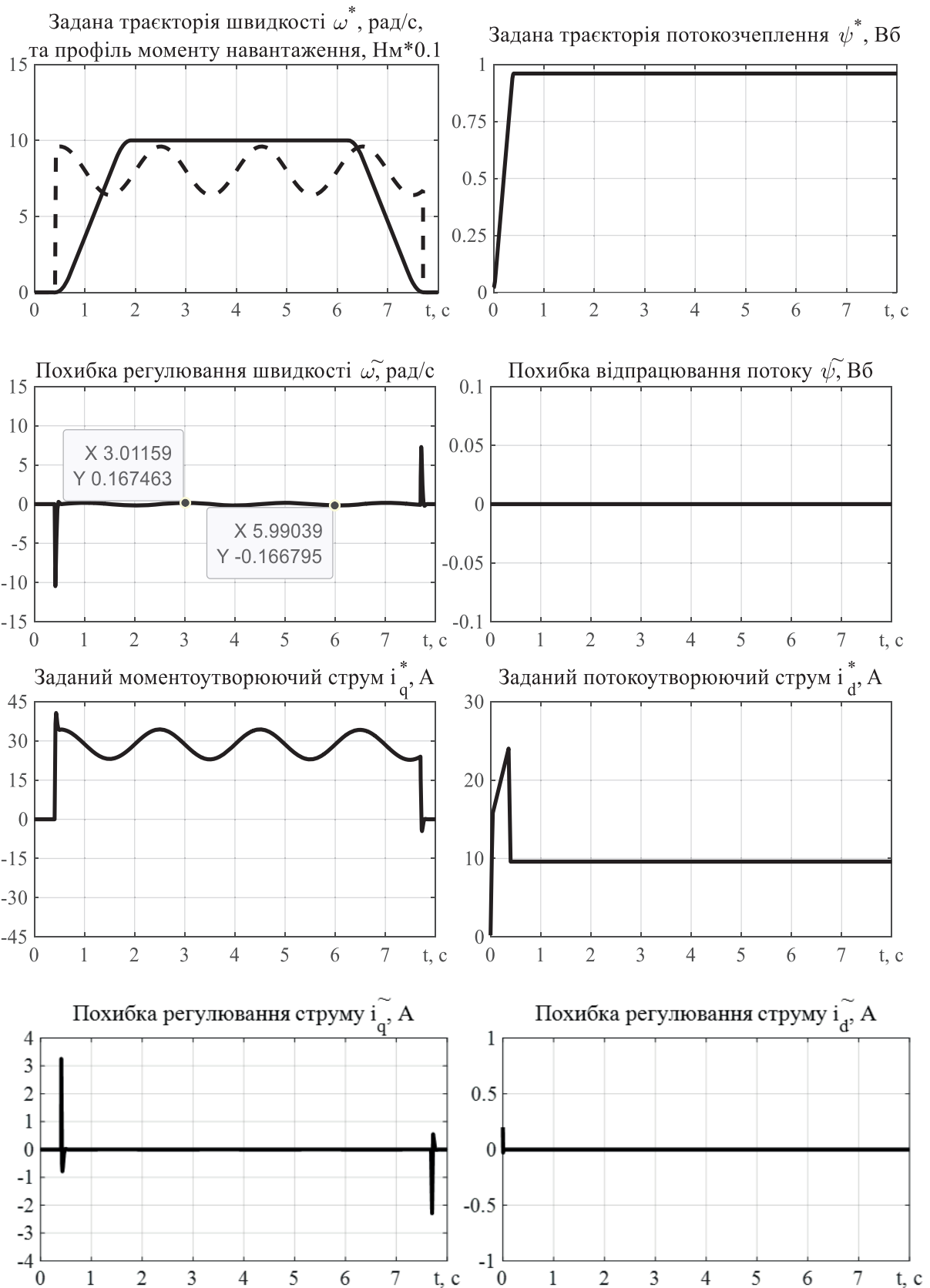


Рисунок 5.8 – Графіки перехідних процесів при динамічному моментів навантаження на швидкості 1/15 від номінальної

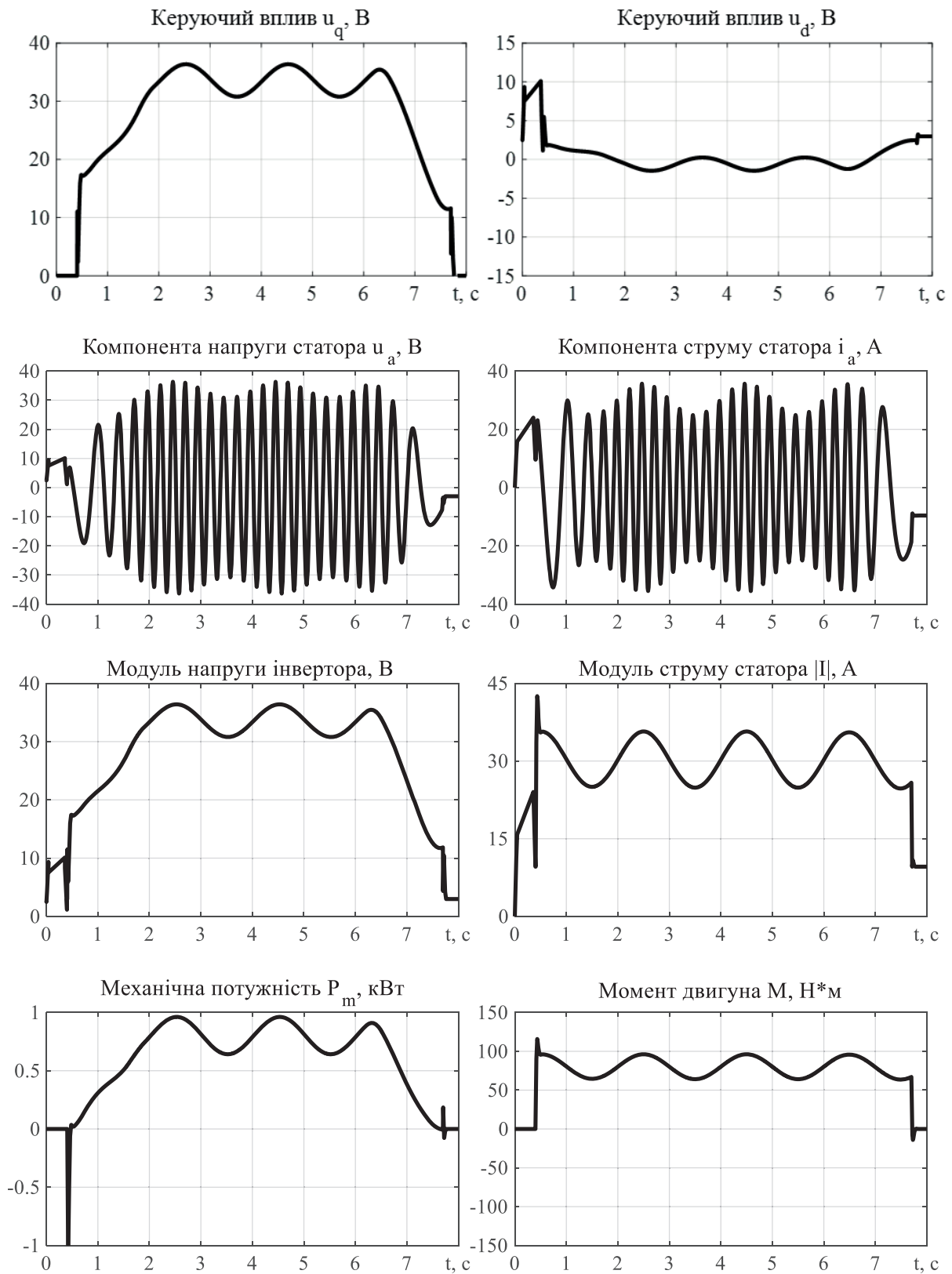


Рисунок 5.9 – Графіки перехідних процесів при динамічному моментів навантаження на швидкості 1/15 від номінальної

Висновки до розділу 5

1) Результати дослідження підтверджують, що при відпрацюванні статичного моменту навантаження алгоритм прямого векторного керування забезпечує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій.

2) Доцільність практичного застосування сучасних алгоритмів керування обґрунтовується їхньою здатністю забезпечувати відмінні динамічні характеристики системи, зокрема швидкість реакції та стійкість.

3) Результати дослідження при відпрацюванні моменту навантаження який складається із статичної та динамічної складової показали, що алгоритм прямого векторного керування дозволяє відпрацьовувати задані траєкторії з допустимою динамічною похибкою відпрацювання траєкторії швидкості.

4) Дослідження показали, що чим більша частота коливань динамічного моменту навантаження тим більшою буде похибка відпрацювання заданої траєкторії швидкості.

5) Обраний алгоритм прямого векторного керування відповідає всім поставленим вимогам.

6 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ

6.1 Опис контролера та програмного забезпечення

Для реалізації системи керування екструдерною установкою в розділі 3 було обрано компактний програмований логічний контролер (ПЛК) компанії Mitsubishi Electric серії MELSEC iQ-F, модель FX5UC-32MT/D.

Вибір саме цієї моделі зумовлений необхідністю побудови швидкодіючої та компактної системи керування, що працює з логікою 24 В постійного струму. Контролер поєднує в собі високу продуктивність (швидкодія 34 нс на інструкцію) та мінімальні габарити, що дозволяє оптимізувати розміри шафи керування.

Функціональні можливості в контексті проекту.

На відміну від стандартних задач автоматизації, для керування екструдером критично важливими є наступні інтегровані функції обраного ПЛК:

Комунікаційні можливості (Ethernet): Вбудований порт Ethernet підтримує протокол CC-Link IE Field Basic. Це дозволяє створити єдину цифрову мережу між контролером, частотним перетворювачем FR-A800 та панеллю оператора GT2507, мінімізуючи кількість дротів та забезпечуючи високу швидкість обміну даними.

Розширене ПД-регулювання: Контролер має вбудовані алгоритми для багатоканального ПД-регулювання, що необхідно для точного підтримання температури у зонах нагріву циліндра та головки екструдера.

Високошвидкісні лічильники: Наявність швидкісних входів дозволяє підключити інкрементальний енкодер для отримання зворотного зв'язку по швидкості обертання шнека, що є необхідною умовою для векторного керування.

Модульність: Архітектура FX5UC дозволяє пряме підключення спеціалізованих адаптерів (серії ADP) для збору даних з аналогових датчиків тиску та температури (4-20 мА) без використання громіздких модулів розширення.

Роль контролера в системі.

У розробленій системі ПЛК виконує роль головного керуючого пристрою (Master), який реалізує наступні алгоритми:

Захист від "холодного пуску": Блокування команди запуску приводу до досягнення робочої температури розплаву.

Захист по тиску: Безперервний моніторинг сигналу з датчика тиску та аварійна зупинка системи при перевищенні критичної межі (300 бар).

Координація швидкості: Передача завдання частоти на перетворювач FR-A800 на основі даних, введених оператором через HMI.

Середовище розробки GX Works3.

Програмування та налагодження контролера здійснюється в сучасному інженерному середовищі GX Works3. Це програмне забезпечення є частиною пакету iQ Works і підтримує міжнародний стандарт IEC 61131-3, що дозволяє реалізувати складні алгоритми керування.

Для даного проекту ключовими перевагами GX Works3 є:

Підтримка мови Structured Text (ST): Використання ST дозволяє зручно описувати складні математичні обчислення та машину станів (State Machine) для автоматичного режиму роботи екструдера, що було б громіздким при використанні релейно-контактних схем (LD).

Інструмент конфігурації параметрів: Дозволяє налаштувати параметри мережі Ethernet та модулів розширення в графічному інтерфейсі без написання додаткового коду.

Вбудований симулятор: Надає можливість протестувати логіку захистів та температурних режимів на комп'ютері до фізичного підключення обладнання, що значно скорочує час пусконалагодження.

Діагностика: Функції системного моніторингу дозволяють у реальному часі відстежувати стан входів/виходів, буферну пам'ять аналогових адаптерів та статус зв'язку з частотним перетворювачем.

6.2 Середовище розробки та структура програми

Розробка прикладного програмного забезпечення для контролера Mitsubishi FX5UC виконана в середовищі GX Works3. В якості мови програмування обрано мову структурованого тексту ST (Structured Text) згідно зі стандартом IEC 61131-3. Це дозволяє реалізувати складні алгоритми обробки аналогових сигналів та математичні обчислення в компактному та зрозумілому вигляді.

Програма побудована за модульним принципом і складається з наступних логічних блоків:

1. Блок керування режимами: Обробка сигналів пуску/зупинки та блокувань.
2. Блок термоконтролю: Аналіз даних з температурних датчиків та захист від "холодного пуску".
3. Блок комунікації з ПЧ: Керування частотним перетворювачем через інструкцію IVDR.
4. Блок аварійних захистів: Моніторинг критичних значень температури та тиску.

6.3 Оголошення змінних

Для реалізації алгоритму створено базу даних змінних (Global Labels), які пов'язують фізичні входи/виходи контролера з логікою програми. Перелік основних змінних наведено на рис.5.1.

<Filter>		Easy Display	Display Setting	Check	
	Label Name	Data Type		Class	Assign (Device/Label)
1	Start_button	Bit	...	VAR_GLOBAL	X1
2	Fill_Sensor	Bit	...	VAR_GLOBAL	X2
3	Heat	Bit	...	VAR_GLOBAL	
4	TE1	Word [Unsigned]/Bit String [16-bit]	...	VAR_GLOBAL	SD6301
5	Min_temp_limit	Word [Unsigned]/Bit String [16-bit]	...	VAR_GLOBAL	D100
6	TE2	Word [Unsigned]/Bit String [16-bit]	...	VAR_GLOBAL	SD6341
7	TE3	Word [Unsigned]/Bit String [16-bit]	...	VAR_GLOBAL	SD6381
8	TE4	Word [Unsigned]/Bit String [16-bit]	...	VAR_GLOBAL	SD6421
9	Run_cmd	Bit	...	VAR_GLOBAL	
10	Auto_mode	Bit	...	VAR_GLOBAL	
11	Stop_button	Bit	...	VAR_GLOBAL	
12	Speed_set	Word [Signed]	...	VAR_GLOBAL	
13	Max_temp_limit	Word [Unsigned]/Bit String [16-bit]	...	VAR_GLOBAL	
14	EMERGENCY_STOP	Bit	...	VAR_GLOBAL	
15	ERR2	Bit	...	VAR_GLOBAL	
16	ERR3	Bit	...	VAR_GLOBAL	
17	ERR4	Bit	...	VAR_GLOBAL	
18	PE	Word [Unsigned]/Bit String [16-bit]	...	VAR_GLOBAL	SD6661
19	ERR	Word [Unsigned]/Bit String [16-bit]	...	VAR_GLOBAL	
20	ERR9	Bit	...	VAR_GLOBAL	
21	Min_pressure_limit	Bit	...	VAR_GLOBAL	
22	ERR5	Bit	...	VAR_GLOBAL	
23	ERR6	Bit	...	VAR_GLOBAL	
24	ERR7	Bit	...	VAR_GLOBAL	
25	ERR10	Bit	...	VAR_GLOBAL	
26	WARNING_1	Bit	...	VAR_GLOBAL	
27			...		

Рисунок 6.1 – Таблиця змінних

6.4 Опис алгоритму керування

Логіка запуску та захисту від "холодного пуску"

Алгоритм передбачає перевірку готовності системи перед запуском. Активація автоматичного режиму (Auto_mode) можлива лише при наявності сировини (Fill_Sensor) та натисканні кнопки пуску.

Ключовою особливістю програми є реалізація захисту шнека від поломки ("холодний пуск"). Змінна Run_cmd, яка дозволяє обертання двигуна, стає активною (TRUE) тільки за умови, що температури у всіх зонах контролю (TE1–TE4) перевищили мінімально допустиму межу Min_temp_limit.

Керування частотним перетворювачем (Інструкція IVDR)

Для керування частотним перетворювачем FR-A800 через вбудований інтерфейс RS-485 (або Ethernet) використовується спеціалізована функція Mitsubishi Electric — IVDR (Inverter Drive).

У програмі вона має вигляд:

IVDR(Run_cmd, K3, H0ED, Speed_set, K1, SM4095);

Де аргументи функції мають наступне значення:

- Run_cmd: Умова виконання інструкції (доки TRUE — інструкція активна).

- K3: Номер станції частотного перетворювача в мережі (Station No. 3).
- H0ED: Код команди (Command Code). В даному випадку використовується для запису частоти або команди ходу.
- Speed_set: Змінна, що містить значення заданої швидкості.
- K1: Режим виконання інструкції.
- SM4095: Системний прапор завершення виконання інструкції.

6.5 Лістинг програми

Нижче наведено основний код програми мовою ST, що реалізує описані вище алгоритми.

```
// БЛОК 1: КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ
```

```
// Увімкнення автоматичного режиму при наявності сировини
```

```
IF Start_button AND Fill_Sensor THEN
```

```
    Auto_mode := TRUE;
```

```
END_IF;
```

```
// Вимкнення автоматичного режиму кнопкою СТОП
```

```
IF Stop_button THEN
```

```
    Auto_mode := FALSE;
```

```
    Run_cmd := FALSE; // Скидання команди ходу
```

```
END_IF;
```

```
// БЛОК 2: АВТОМАТИЧНИЙ ЦИКЛ ТА ТЕРМОКОНТРОЛЬ
```

```
IF Auto_mode THEN
```

```
    Heat := TRUE; // Увімкнення нагріву зон
```

```
// ЗАХИСТ ВІД ХОЛОДНОГО ПУСКУ
// Дозвіл на запуск двигуна тільки якщо всі зони прогріті
IF (TE1 > Min_temp_limit) AND
  (TE2 > Min_temp_limit) AND
  (TE3 > Min_temp_limit) AND
  (TE4 > Min_temp_limit) THEN

  Run_cmd := TRUE; // Дозвіл роботи приводу

ELSE
  Run_cmd := FALSE; // Блокування, якщо хоча б одна зона холодна
END_IF;

END_IF;

// БЛОК 3: КОМУНІКАЦІЯ З ПЧ (MITSUBISHI PROTOCOL)

// Відправка команди на частотник (Станція №3)
// Виконується тільки якщо активний Run_cmd
IVDR(Run_cmd, K3, H0ED, Speed_set, K1, SM4095);

// БЛОК 4: СИСТЕМА АВАРІЙНИХ ЗАХИСТІВ

// --- Захист від перегріву (High Temperature Alarm) ---
IF TE1 > Max_temp_limit THEN
  ERR1 := TRUE;
  EMERGENCY_STOP := TRUE;
END_IF;
```

```
IF TE2 > Max_temp_limit THEN
    ERR2 := TRUE;
    EMERGENCY_STOP := TRUE;
END_IF;
```

```
IF TE3 > Max_temp_limit THEN
    ERR3 := TRUE;
    EMERGENCY_STOP := TRUE;
END_IF;
```

```
IF TE4 > Max_temp_limit THEN
    ERR4 := TRUE;
    EMERGENCY_STOP := TRUE;
END_IF;
```

```
// --- Захист від падіння температури під час роботи ---
```

```
IF TE1 < Min_temp_limit AND Run_cmd THEN
    ERR6 := TRUE;
    EMERGENCY_STOP := TRUE;
END_IF;
```

```
IF TE2 < Min_temp_limit AND Run_cmd THEN
    ERR7 := TRUE;
    EMERGENCY_STOP := TRUE;
END_IF;
```

```
// --- Захист по тиску (Melt Pressure Protection) ---
```

```
// Аварійне перевищення тиску (Захист механіки)
```

```
IF PE > Max_pressure_limit THEN
```

```
ERR9 := TRUE;
EMERGENCY_STOP := TRUE;
END_IF;

// Аварійне падіння тиску (Обрив потоку)
IF PE < Min_pressure_limit AND Run_cmd THEN
    ERR10 := TRUE;
    EMERGENCY_STOP := TRUE;
END_IF;

// Попередження про високий тиск (без зупинки)
IF PE > Pressure_warn THEN
    WARNING_1 := TRUE;
END_IF;

// Глобальна реакція на аварію
IF EMERGENCY_STOP THEN
    Auto_mode := FALSE;
    Run_cmd := FALSE;
    Heat := FALSE;
END_IF;
```

6.6 Розробка людинно машинного інтерфейсу НМІ

Для забезпечення взаємодії оператора з автоматизованою системою керування екструдером розроблено графічний інтерфейс на базі сенсорної панелі. Інтерфейс реалізовано з дотриманням принципів ергономіки та стандартів ISA-101 (High Performance HMI), використовуючи темну колірну схему для зменшення зорового навантаження оператора.

Проект візуалізації складається з трьох основних екранів: Головного екрану керування (мнемосхеми), Екрану графіків (трендів) та Журналу подій.

6.7 Головний екран керування (Main Screen)

Головний екран є основним робочим вікном оператора, на якому зосереджені ключові органи керування та індикатори стану технологічного процесу.

Елементи інтерфейсу головного екрану зображені на рис. 5.2:



Рисунок 6.2 – Головний екран

1. Мнемосхема технологічного процесу: У центральній частині екрану розміщено схематичне зображення екструдера, що включає завантажувальний бункер, матеріальний циліндр зі шнеком та привідний електродвигун. Це дозволяє оператору інтуїтивно розуміти, до якої частини установки відносяться показники датчиків.

2. Індикація технологічних параметрів: Під мнемосхемою розташовані цифрові індикатори, що відображають поточні значення з аналогових датчиків у реальному часі:

- TE1 – TE4: Температура зон нагріву циліндра та голівки екструдера (у °C). Колірна індикація рамки (зелена) свідчить про знаходження параметра в межах норми.
- PE: Тиск розплаву полімеру на виході з екструдера (у bar). Цей параметр є критичним для захисту механічної частини.
- Швидкість: Індикатор лінійної швидкості екструзії або подачі матеріалу, перерахований у мм/хв (поточне значення на прикладі: 234.0).

3. Органи керування (Control Buttons): У правій частині екрану розміщено великі сенсорні кнопки для оперативного керування приводом:

- СТАРТ (Start): Кнопка запуску автоматичного циклу. Має індикатор активного стану (зелена смужка).
- СТОП (Stop): Кнопка зупинки процесу. Має індикатор стану (червона смужка).

4. Статусні індикатори: На мнемосхемі розміщено віртуальні світлодіоди для відображення дискретних станів виконавчих механізмів:

- M1: Індикатор роботи головного двигуна (зелений – робота, сірий – зупинка).
- LE1: Індикатор наявності сировини або роботи завантажувача.

6.8 Екран графіків (Trend Screen)

Для аналізу динаміки технологічного процесу та налаштування ПД-регуляторів передбачено екран трендів.

Функціональні можливості:

- Візуалізація: Екран відображає графік зміни температури у часі ("Графік показів Температури"). Це дозволяє оцінити стабільність підтримки температури та виявити перерегулювання або коливання.

- Інструменти аналізу: У нижній частині екрану розташована панель інструментів для роботи з історією процесу:
 - Курсори для перегляду точних значень у конкретний момент часу.
 - Кнопки масштабування ("Приблизити", "Віддалити") та прокрутки графіка.
 - Перемикач режиму ONLINE/OFFLINE для перегляду архіву або живих даних.

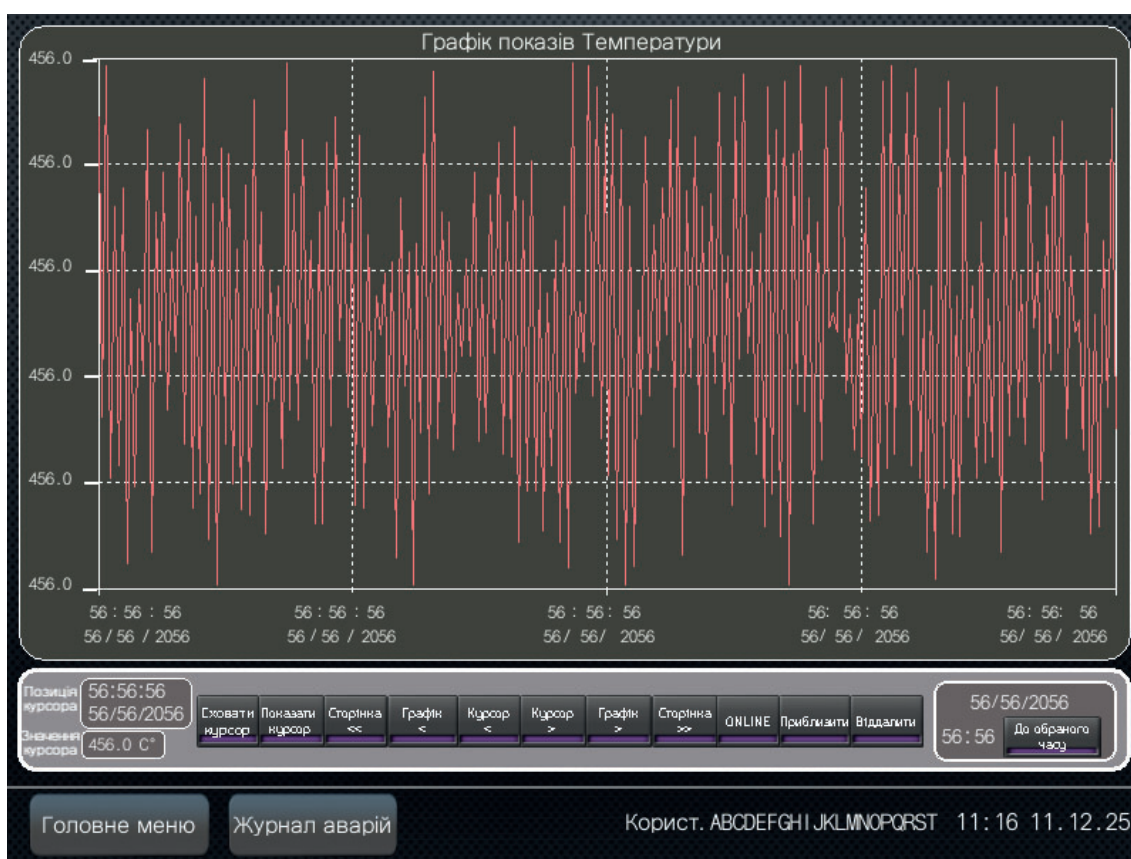


Рисунок 6.3 – Екран графіків

6.9 Екран журналу аварій (Alarm History)

Для діагностики несправностей та фіксації позаштатних ситуацій розроблено екран журналу подій.

Система автоматично реєструє події з міткою часу (дата та година). До журналу заносяться такі події як:

- Годинник реального часу: Поточний час (22:20) та дата (10.12.25), що синхронізуються з ПЛК.

Висновки до розділу 6

1. У даному розділі розроблено структуру та програмний код системи керування екструдером. Використання мови ST дозволило реалізувати гнучку логіку захистів, що включає моніторинг 11 аварійних станів (ERR1...ERR11).

2. Застосування стандартної інструкції IVDR спрощує обмін даними з частотним перетворювачем FR-A800, виключаючи необхідність написання складних комунікаційних драйверів. Алгоритм забезпечує повний захист обладнання від роботи в неприпустимих режимах (холодний пуск, надлишковий тиск), що відповідає вимогам технічного завдання.

3. Розроблений інтерфейс забезпечує повну спостережуваність процесу екструзії, надає оператору зручні інструменти для керування та дозволяє швидко реагувати на аварійні ситуації завдяки наочній візуалізації.

7 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕКСТРУЗІЙНИМ ОБЛАДНАННЯМ «SMARTMELT CONTROL»

7.1 Опис ідеї проекту та аналіз актуальності

В умовах сучасного промислового виробництва України спостерігається тенденція до підвищення вартості енергоносіїв та сировини. Водночас парк екструзійного обладнання на малих та середніх підприємствах (МСП) залишається застарілим. Значна частина екструдерів, що експлуатуються для виробництва полімерних труб, плівки та профілю, оснащені неефективними системами керування на базі релейної логіки або застарілих аналогових приводів постійного струму.

Основною проблемою таких систем є високе енергоспоживання, низька точність підтримки температури та тиску, а також відсутність захисту від помилок оператора (зокрема, так званого «холодного пуску», що призводить до поломки шнека).

В рамках даної дипломної роботи пропонується стартап-проект зі створення та виведення на ринок універсального комплексу модернізації (ретрофітінгу) під назвою «SmartMelt Control».

Суть ідеї: Створення стандартизованої шафи керування «під ключ» на базі сучасних компонентів Mitsubishi Electric (ПЛК серії FX5UC та ПЧ серії FR-A800), що містить попередньо інстальоване спеціалізоване програмне забезпечення. Це рішення дозволяє перетворити будь-який старий екструдер на сучасну цифрову установку класу Industry 4.0.

Основні характеристики та переваги пропонованого продукту наведено в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї (що пропонується)	Напрямки застосування (для кого)	Вигоди для користувача (Value Proposition)
<p>Продукт: Комплектна система автоматизації (шафа керування) з інтегрованим векторним керуванням та IoT-моніторингу.</p>	<p>1. Виробники полімерної труби (газові, водопровідні).</p>	<p>Економічні: Зниження енергоспоживання на 15-20%, зменшення браку продукції на 10%.</p>
<p>Послуга: Інжиніринг, монтаж, пусконаладження та навчання персоналу.</p>	<p>2. Виробники пакувальної плівки та пакетів.</p>	<p>Технічні: Захист механічних вузлів (шнека, редуктора), стабілізація тиску розплаву.</p>
	<p>3. Лінії грануляції (переробка пластикових відходів).</p>	<p>Експлуатаційні: Інтуїтивний інтерфейс (НМІ), можливість віддаленого контролю через смартфон.</p>
	<p>4. Кабельні заводи (нанесення ізоляції).</p>	

Відмінністю даного проекту від існуючих на ринку аналогів є використання унікального алгоритму адаптивного векторного керування, розробленого та дослідженого у попередніх розділах, який дозволяє працювати з вторинною сировиною нестабільної якості без аварійних зупинок.

7.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Для оцінки можливості реалізації стартап-проекту проведено технологічний аудит. Він базується на аналізі технічних рішень, розроблених у розділах 2-5 даної дипломної роботи.

Основою проекту є використання серійних промислових компонентів високої надійності, що мінімізує ризики апаратних збоїв. Унікальність продукту полягає у програмному забезпеченні (ноу-хау), яке інтегрує керування приводом, термостабілізацію та систему безпеки в єдиний контур.

Результати аудиту технологічної здійсненності наведено в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ з/п	Ключова технологія / параметр	Характеристика рішення в проекті	Наявність технології / Доступність
1	Силовий електропривод	Використання частотного перетворювача Mitsubishi FR-A800 з функцією Real Sensorless Vector Control.	Технологія доступна на ринку, компоненти є у вільному продажу.

2	Керуючий контролер	Компактний ПЛК FX5UC-32MT з підтримкою швидкісних лічильників та ПІД-регуляторів.	Технологія освоєна, програмний код розроблено в середовищі GX Works3.
3	Алгоритми захисту	Програмний модуль захисту від «холодного пуску» та перевищення тиску (розроблений у розділі 6).	Авторська розробка, перевірена моделюванням у MATLAB Simulink.
4	Людино-машинний інтерфейс	Сенсорна панель GT2507 з мнемосхемою та архівацією трендів.	Проект візуалізації створено в GT Designer3.
5	Датчики зворотного зв'язку	Використання уніфікованих сигналів 4-20 мА (тиск, температура).	Стандартні промислові рішення (Gefran, Jumo).

Проект є технологічно здійсненним. Рівень готовності технології (TRL) оцінюється як TRL 6 (прототип системи промодельовано та розроблено конструкторську документацію).

7.3 Аналіз ринкових можливостей

Ринок полімерної промисловості України демонструє відновлення та зростання попиту на продукцію, особливо в секторі будівельних матеріалів (труби, профіль) та упаковки. Однак, купівельна спроможність виробників обмежена, що робить купівлю нових європейських екструдерів (вартістю від 50 000 до 200 000 євро) недоступною для багатьох підприємств.

Це створює ідеальні умови для ринку ретрофітінгу – глибокої модернізації існуючого обладнання, вартість якої складає 15-20% від ціни нового станка.

7.4 Аналіз конкурентного середовища

Основними конкурентами проекту є:

Постачальники дешевих рішень (Китай): Пропонують бюджетні частотники без векторного керування та найпростіші терморегулятори.

Штатні електрики підприємств ("In-house"): Намагаються ремонтувати старі схеми самотужки.

Великі інжинірингові компанії: Пропонують рішення на базі Siemens/Schneider, але за дуже високою ціною.

Порівняльний аналіз конкурентів наведено в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Порівняльна характеристика конкурентів

Критерії порівняння	Конкурент А (Бюджетне рішення)	Конкурент Б (Преміум-інтегратори)	Проект «SmartMelt Control»
Ціна	Низька	Дуже висока	Середня

Надійність обладнання	Низька	Висока	Висока (Mitsubishi Electric)
Енергоефективність	Низька (скалярне U/f)	Висока	Висока (Векторне керування)
Захист обладнання	Відсутній	Повний	Повний (інтелектуальні захисти)
Простота обслуговування	Низька	Вимагає спец. персоналу	Висока (інтуїтивний НМІ)
Термін окупності	6 міс.	> 3 років	9-12 місяців

Стратегія ринкового позиціонування: Продукт позиціонується як «Золота середина» – професійне промислове рішення японської якості за ціною, доступною для українського малого бізнесу, з акцентом на швидку окупність за рахунок енергозбереження.

7.5 Розроблення маркетингової стратегії

Для комерціалізації проекту розроблено стратегію за моделлю «4Р» (Product, Price, Place, Promotion).

Product (Товар): Готова до монтажу шафа керування (ступінь захисту IP54) з повним комплектом документації. Клієнт отримує не просто набір деталей, а готове рішення проблеми (стабілізація виробництва).

Додаткова цінність: Гарантія 2 роки, віддалена діагностика через інтернет.

Price (Ціна): Використовується стратегія ціноутворення «Витрати плюс» (Cost-plus pricing) з урахуванням цінності для клієнта. Це дозволяє забезпечити рентабельність та конкурентоспроможність.

Place (Збут): Прямі продажі (Direct Sales) через відвідування заводів.

Співпраця з компаніями, що ремонтують механічну частину екструдерів (ОЕМ-партнерство).

Спеціалізовані виставки (наприклад, «Plast Expo UA»).

Promotion (Просування): Контент-маркетинг: Публікація статей та відео про економію електроенергії на екструдерах.

Кейс-стаді: Створення історій успіху («Як завод X зекономив 100 тис. грн за рік після модернізації»).

Демо-версія: Надання можливості безкоштовного аудиту обладнання клієнта перед модернізацією.

7.6 Фінансово-економічний аналіз проекту

Ключовим етапом стартап-проекту є розрахунок собівартості та показників ефективності. Розрахунок виконано для базової конфігурації системи для екструдера потужністю 15 кВт.

Розрахунок прямих матеріальних витрат

У таблиці 7.4 наведено детальний кошторис комплектуючих (Bill of Materials).

Таблиця 7.4 – Розрахунок вартості матеріалів та комплектуючих

№	Найменування компонента	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн
1	ПЧ Mitsubishi FR-A840-00470-2-60 (15/18.5 кВт)	1	28 500	28 500

2	ПЛК Mitsubishi FX5UC- 32MT/DSS	1	8 200	8 200
3	Панель оператора Mitsubishi GT2507-WTBD	1	12 400	12 400
4	Модулі розширення аналогові (FX5- 4AD-ADP)	2	2 100	4 200
5	Блок живлення Schneider Electric ABL5 (24В, 5А)	1	2 800	2 800
6	Датчик тиску розплаву Gefran M32 (4-20 мА)	1	9 500	9 500
7	Датчики температури Pt100 з трансмiтером	4	1 200	4 800
8	Енкодер iнкрементальний Omron E6B2	1	3 500	3 500

9	Шафа монтажна (Rittal/Sarel) 600x400x250	1	4 500	4 500
10	Комутаційна апаратура (автомати, реле, клеми, кнопки)	1 компл.	6 000	6 000
РАЗОМ	Матеріальні витрати			84 400

Розрахунок повної собівартості та ціни

Окрім матеріалів, враховуються витрати на збірку, програмування та накладні витрати.

1. Витрати на оплату праці:
 - Інженер-програміст (15 год): 6 000 грн.
 - Електромонтажник (10 год): 3 000 грн.
 - ЄСВ (22%): 1 980 грн.
 - *Разом зарплата:* 10 980 грн.
2. Інші витрати (логістика, амортизація інструменту): 2 500 грн.
3. Повна виробнича собівартість:
4. Визначення ціни реалізації:

$$S_{\text{повн}} = 84400 + 1098 + 2500 = 97880 \text{ грн.}$$

Встановлюємо норму прибутку (рентабельність) на рівні 30%.

$$\text{Ціна} = 97880 \cdot 1.3 = 127200$$

Розрахунок терміну окупності для клієнта

Найважливішим аргументом для продажу є економічний ефект для замовника.

Розрахуємо економію електроенергії за рахунок переходу від нерегульованого приводу до частотно-регульованого з векторним алгоритмом.

1. Потужність двигуна: $P = 15$ кВт.

2. Середній коефіцієнт завантаження (стара система): $K_{31} = 0.85$ (дроселювання або робота на повну).

3. Середній коефіцієнт завантаження (нова система): $K_{32} = 0.70$ (оптимізація потоку).

4. Економія потужності: $\Delta P = 15 (0.85 - 0.70) = 2.25$ кВт.

5. Режим роботи: 3 зміни (24 год), 25 днів/міс = 600 годин.

6. Тариф на електроенергію (для юр. осіб, прогноз): 8.0\$ грн/кВт·год.

Економія_{міс} = 2.25кВт · 600год · 8.0грн = 10800 грн.

Додаткова економія на зменшенні браку та простоїв оцінюється мінімум у 3 000 грн/міс.

Сумарний економічний ефект: 13 800 грн/міс.

Термін окупності проекту (PP):

$$T_{ок} = \frac{\text{Ціна системи}}{\text{Ефект в місяць}} = \frac{127200}{13800} = 9.2 \text{ місяці.}$$

Проект окупується менше ніж за 1 рік, що є високим показником інвестиційної привабливості.

7.7 Аналіз ризиків проекту

Для оцінки внутрішніх та зовнішніх факторів, що впливають на успішність стартапу, проведено SWOT-аналіз (табл. 7.5).

Таблиця 7.5 – Матриця SWOT-аналізу

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
1. Висока якість та надійність компонентів (Mitsubishi, Schneider).	1. Висока залежність від імпорту комплектуючих.
2. Унікальний програмний алгоритм захисту.	2. Відносно висока вартість порівняно з китайськими аналогами.
3. Комплексність рішення (все в одній шафі).	3. Відсутність впізнаваного бренду на етапі запуску.
4. Висока енергоефективність.	
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
1. Державні програми енергоефективності.	1. Валютні ризики (девальвація гривні).
2. Зростання ринку переробки відходів (Green Deal).	2. Порушення логістичних ланцюжків постачання.
3. Можливість масштабування на інші типи обладнання (насоси, вентилятори).	3. Демпінг з боку конкурентів.

Заходи з мінімізації ризиків:

- Створення складського запасу критичних компонентів (ПЛК, ПЧ).
- Фіксація ціни у валютному еквіваленті у договорах.
- Акцент на сервісній підтримці, яку не можуть надати китайські виробники.

• 7.7. Календарний план реалізації

Для запуску проекту розроблено поетапний план-графік робіт.

Таблиця 7.6 – Календарний план-графік

Етап	Назва етапу та види робіт	Тривалість	Очікуваний результат
1	НДДКР (R&D) Фіналізація програмного коду, тестування на моделі Simulink.	1 міс.	Верифіковане ПЗ, готова конструкторська документація.
2	Створення прототипу (MVP) Закупівля комплектуючих, збірка першого зразка шафи.	1.5 міс.	Готовий до випробувань продукт.
3	Пілотне впровадження Встановлення системи на підприємстві-партнері, налагодження.	0.5 міс.	Протокол випробувань, відгук клієнта.

4	Маркетинг та продажі Створення сайту, презентацій, участь у виставках.	Постійно	База лідів, укладені контракти.
---	---	----------	---------------------------------------

Висновки до розділу 7

1. У розділі розроблено комплексний стартап-проект з впровадження системи «SmartMelt Control».
2. Підтверджено актуальність проекту через призму енергоефективності та цифровізації виробництва.
3. Доведено технічну реалізованість на базі обраних у попередніх розділах компонентів.
4. Економічні розрахунки показали, що при вартості системи близько 127 тис. грн, вона забезпечує окупність для замовника протягом 9-10 місяців, що робить продукт конкурентоспроможним на ринку України.
5. Визначено стратегію просування, яка базується на наданні якісного сервісу та доведеної економії ресурсів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації вирішено актуальне науково-практичне завдання підвищення ефективності та надійності роботи екструдерної установки шляхом розробки системи векторного керування асинхронним електроприводом.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз технологічного процесу переробки полімерів методом екструзії. Встановлено, що для забезпечення високої якості продукції (стабільності геометричних розмірів) електропривод шнека повинен мати жорсткі механічні характеристики та високу перевантажувальну здатність. Обґрунтовано доцільність переходу від нерегульованих або скалярних систем до системи векторного керування (FOC), яка забезпечує незалежне регулювання електромагнітного моменту та потоку двигуна.

2. Виконано розрахунок та вибір силового електрообладнання. На основі розрахунку моментів опору від в'язкого тертя та стиснення матеріалу обрано асинхронний двигун потужністю 15 кВт. Для керування двигуном обрано перетворювач частоти Mitsubishi Electric серії FR-A800, який підтримує режим безсенсорного векторного керування та має необхідний запас по перевантаженню (режим Heavy Duty).

3. Досліджено динамічні та статичні режими роботи. Результати моделювання підтвердили, що розроблена система забезпечує:

1. Плавний пуск із номінальним моментом двигуна, що необхідно для "зриву" шнека.

2. Високу швидкодію контуру струму (компенсація збурень навантаження за час менше 0.2 с).

3. Стабільну роботу в зоні глибокого регулювання швидкості (1:15), що дозволяє ефективно працювати з різними типами полімерної сировини.

4. Спроектовано систему автоматизації. Розроблено апаратну структуру на базі ПЛК Mitsubishi FX5UC та панелі оператора GT2507. Створено

прикладне програмне забезпечення на мові ST, яке реалізує алгоритми захисту від "холодного пуску", контролю аварійного тиску та ПД-регулювання температурних зон. Розроблений HMI-інтерфейс забезпечує повну візуалізацію процесу та архівацію технологічних параметрів.

5. Розроблено стартап-проект «SmartMelt Control». Проведено маркетинговий та фінансово-економічний аналіз впровадження розробленої системи як комплексу для модернізації застарілих екструдерів. Розрахунки показали, що термін окупності проекту для замовника складає близько 9-10 місяців за рахунок економії електроенергії (до 15-20%) та зменшення браку продукції, що свідчить про високу інвестиційну привабливість розробки.

Таким чином, розроблена система керування є закінченим технічним рішенням, готовим до практичного впровадження на підприємствах полімерної промисловості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бернхардт Е. «Переробка термопластичних матеріалів». М.: Держхімвидав, 1968. – 748 с.
2. Козулін М.А., Шапіро А.Я., Гавуріна Р.К. «Обладнання для виробництва і переробки пластичних мас». Л.: Держхімвидав, 1963. – 783 с.
3. Лукач Ю.Е., Рябінін Д.Д. «Черв'ячні машини для переробки гумових сумішей і пластичних мас». М.: Машинобудування, 1967. – 296 с.
4. Рябінін Д.Д., Лукач Ю.Е. «Змішувальні машини для пластмас і гумових сумішей». М.: Машинобудування, 1972. – 272 с.
5. Силін В.А. «Динаміка переробки пластмас у черв'ячних машинах». М.: Машинобудування, 1970. – 150 с.
6. Радченко Л.Б. «Деякі аспекти моделювання процесів переробки термопластів екструзійним методом». К.: 1994. – 10 с. Деп. в ІНТЕІ, №1638 – Ук 94.
7. Лукач Ю.Е., Радченко Л.Б. «Тенденції створення екструзійного обладнання». Полімермаш – 91: Зб. науково-технічних конф.: К., 1991. – С. 6 – 8.
8. Алтайська Л.Б., Дьомін П.П., Радченко Л.Б. «Черв'ячний прес з комбінованими робочими органами». Хім. і нафтове машинобудування. 1985. – №2. – С. 8-10.
9. Завгородній В.К. «Обладнання для переробки пластмас. Довідковий посібник». М.: Машинобудування, 1976. – 407 с.
10. Бекін Н.Г., Шанін Н.П. «Обладнання заводів гумової промисловості». Л.: Хімія, 1978. – 398 с.
11. Усатенко С.Т., Каченюк Т.К., Терехова М.В. «Виконання електричних схем за ЄСКД» Довідник. – М.: Вид. стандартів, 1989. – 325 с.
12. Александров К.К., Кузьміна О.Г. «Електротехнічні креслення та схеми». М.: Енергоатоміздат, 1990. – 288 с.

13. «Довідник з автоматизованого електроприводу» / За ред. В.А. Єлісеєва, А.В. Шинянського. М.: Енергоатоміздат, 1983. – 616 с.
14. Щербина В.Ю., Гондляр О.В., Сівецький В.І. Іжиніринг інноваційних технологій та обладнання. Механічне обладнання для виробництва в'язучих будівельних матеріалів [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. – 147 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45720>
15. Москаленко В. В. Системи автоматизованого керування електропривода: Підручник. — К.: Вища школа, 2007.
16. Загірняк М. В., Невзлін Б. І. Енергоефективність електромеханічних систем: Навчальний посібник. — Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2011.
17. Бойко В. І., Бойко П. Г., Бурцев Ю. О. та ін. Електропривод та автоматизація установок: Підручник. — Дніпро: НГУ, 2012.
18. Раувендааль К. Экструзия полимеров. — СПб.: Профессия, 2008. (Це «біблія» екструзії, переклад з англ. *Chris Rauwendaal "Polymer Extrusion"*).
19. Клементьєв С. В., Жила В. І. Обладнання заводів переробки пластмас: Навчальний посібник. — Харків: НТУ «ХП», 2008.
20. Михалевич В. М. Технологія переробки полімерів: Навчальний посібник. — Вінниця: ВНТУ, 2011.
21. Керування електроприводами. Курсовий проект [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів, які навчаються за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. С. М. Пересада, Є. О. Ніконенко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 57 с.
22. С. М. Пересада, Є. О. Ніконенко, “Керування електроприводами – посібник”, КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, 2022, 396 с.
23. Шеремет О.І., Огнєв О.Г., Пащенко В.В. Огляд сучасних способів керування змінними в автоматизованому електроприводі // Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали IV

Всеукраїнської науково-технічної конференції / За заг. ред. О. Ф. Тарасова. Краматорськ : ДДМА, 2020.

24. Гладкий В. В. Роль сучасної силової електроніки як основа частотно-регульованого асинхронного електроприводу // Ефективне використання енергії: стан і перспективи: збірник наукових праць III Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції (м. Кам'янець-Подільський 9 листопада 2023 року). м. Кам'янець-Подільський: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 2023. с. 61-64.

25. Синявський О. Ю., Савченко В. В., Бунько В.Я., Рамш В. Ю. Електропривод виробничих машин і механізмів: навчальний посібник. К.: ФОП Ямчинський О.В. , 2020. 444 с.

26. Автоматизація виробничих процесів [Текст] : підручник для студ. ВТНЗ / Б. М. Гончаренко, С. І. Осадчий, Л. Г. Віхрова, В. М. Каліч, О. К. Дідик. – Кіровоград : Лисенко В.Ф., 2016. – 352 с.

27. Нові технології і обладнання харчових та переробних виробництв: матеріали I Всеукр. наук.-практ. інтернет-конференції (Полтава, 19-20 квітня 2023 р.) / ПДАУ: ред. кол., О. І. Біловод, А. М. Шостя, С. В. Попов, Н. В. Будник, Ю. В. Левченко. Полтава: ПДАУ, 2023. 147 с.

28. Теорія електропривода : підручник для студ. вузів, які навч. за спец. "Електропривод і автоматизація промислових установок і технологічних комплексів" / за ред. М. Г. Поповича. Київ : Вища школа, 1993. 494 с.

29. Частотне керування асинхронним приводом: Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни „Основи електропривода” для студентів напряму підготовки 6.100101 „Енергетика та електротехнічні системи в АПК” / Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О.– Ніжин.: 2011. –98 с.

30. Усольцев А.А. Частотне керування асинхронним двигуном. Навчальний посібник по дисциплінам електромеханічного циклу, 2006. – 94 с.

31. Непряме векторне керування асинхронними двигунами з властивостями робастності та адаптації до змін активного опору ротора.

Монографія / Пересада С. М., Ковбаса С. М., Красношапка Н. Д. – Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020, – 174 с. ISBN 978-617-7894-21-5.

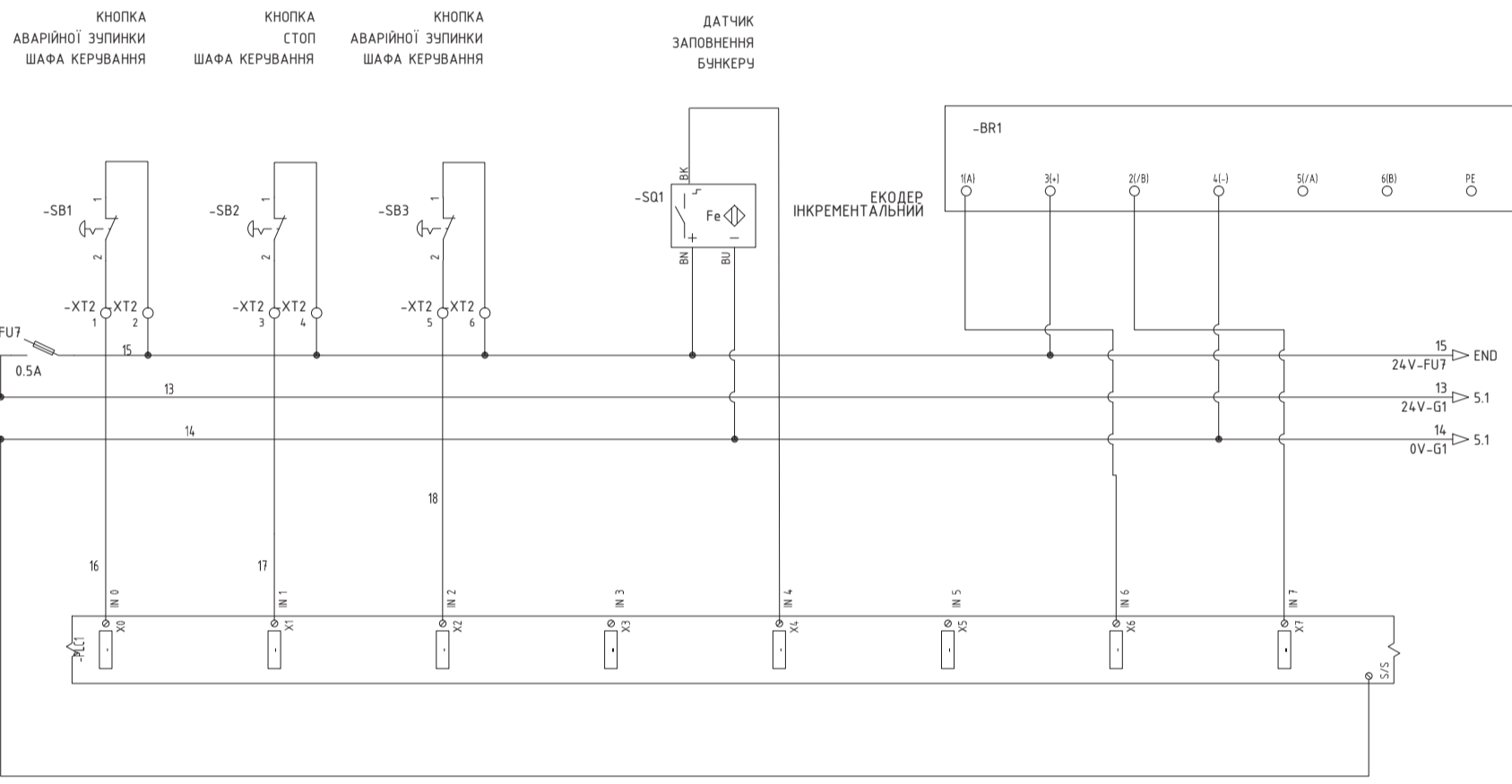
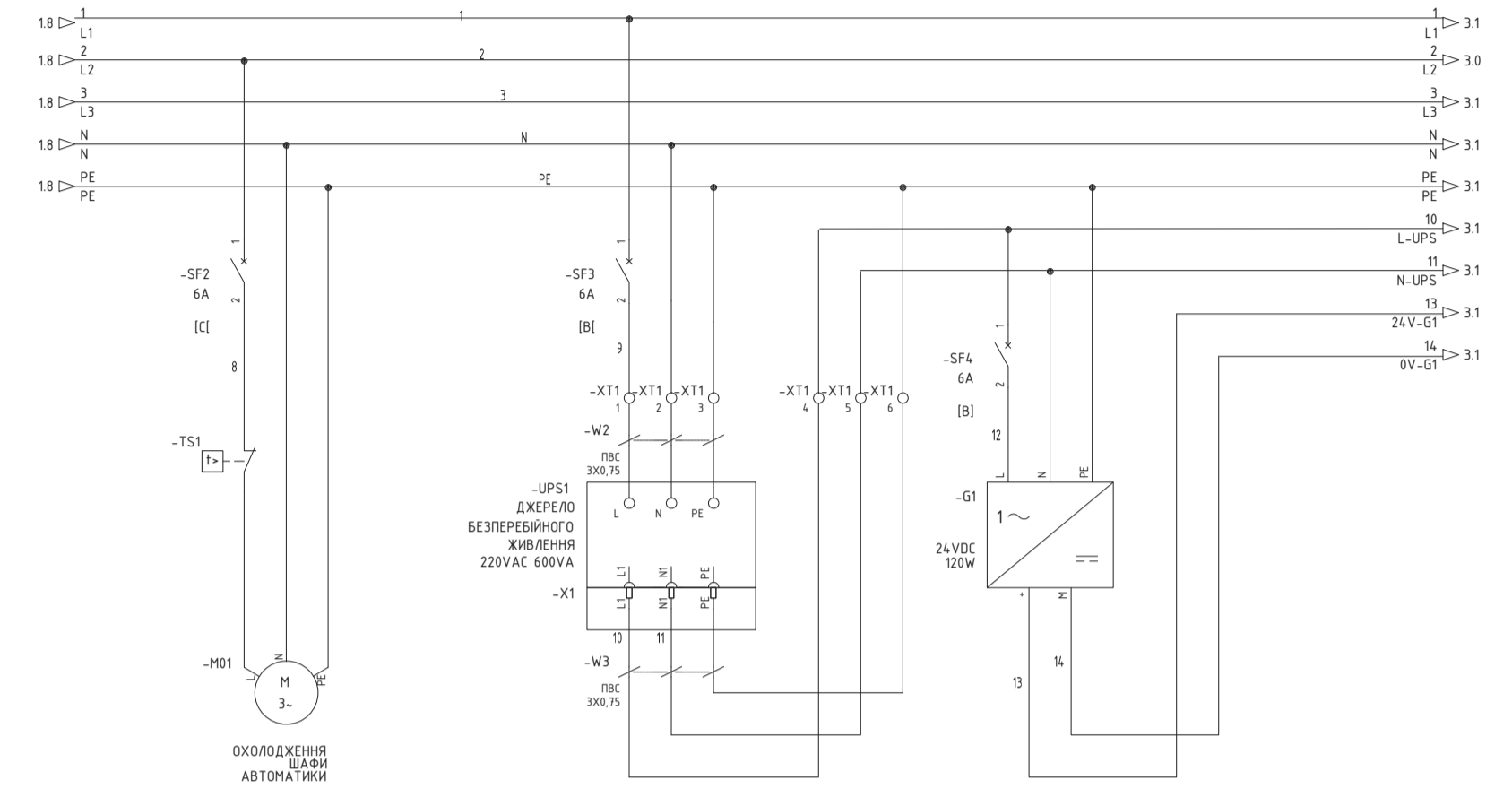
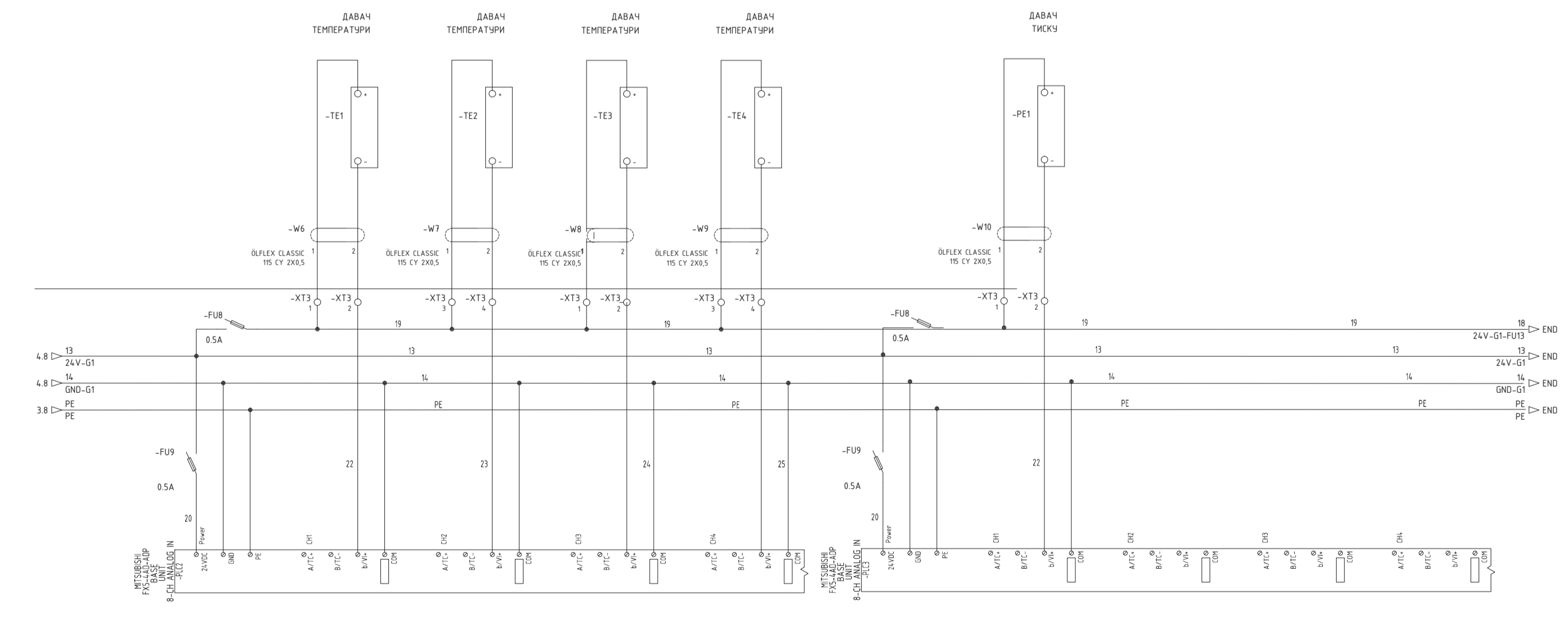
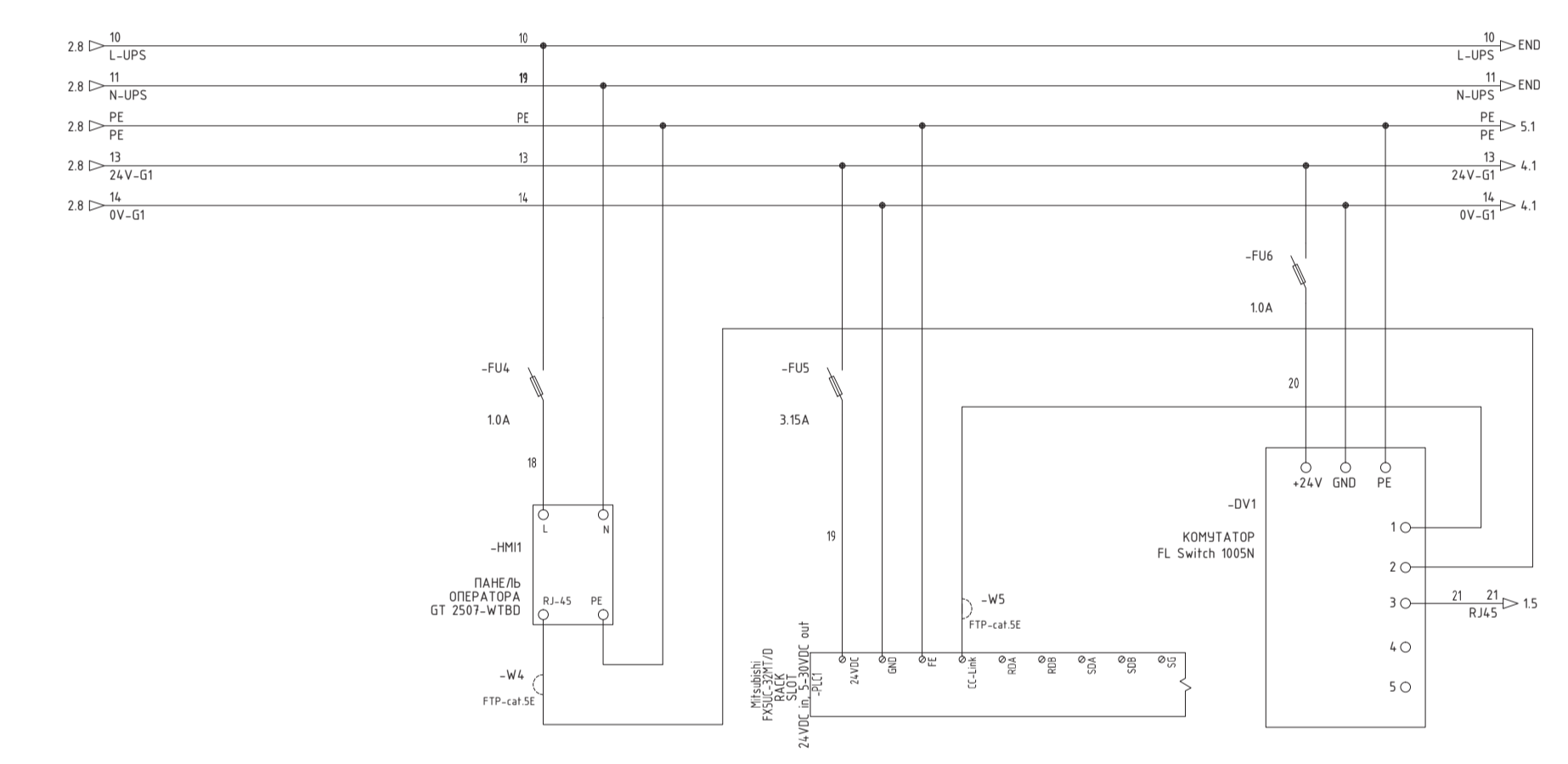
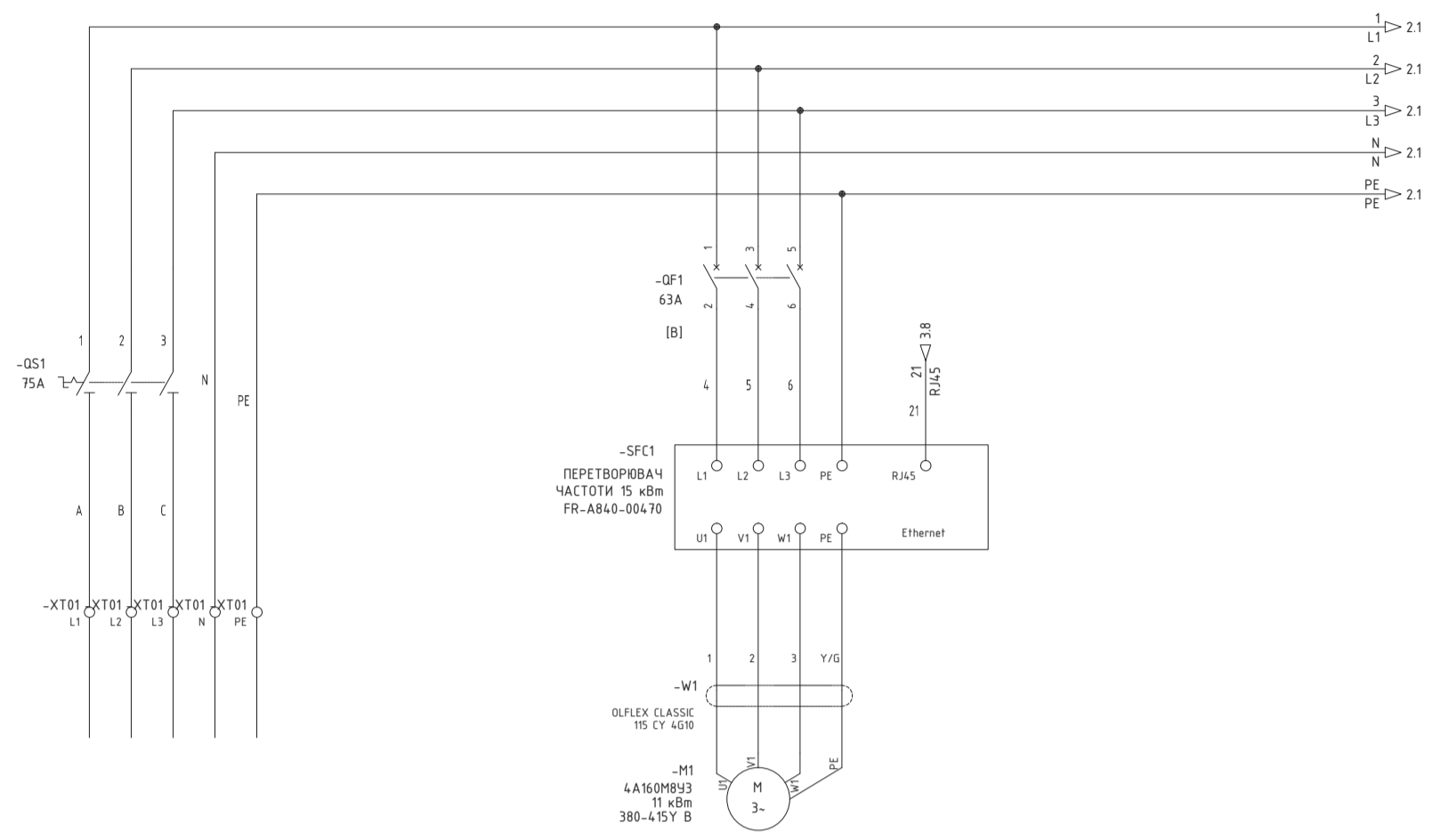
32. Основи мехатроніки: [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.М. Пересада, М.В. Пушкар. – К.: КПІ ім. Ігоря – Електронні текстові дані (1 файл: 23,6 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 136 с.

33. Pryumak B., Moreno-Eguílaz M. Characteristics of Induction Motor Drives with Torque Maximization in Field Weakening Region. Proc. of the IEEE 1st Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering “UKRCON-2017”, Kyiv, May 29–June 02, – 2017. – P. 508-513. DOI: [10.1109/ukrcon.2017.8100292](https://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100292)

34. Приймак Б.І., Желінський М.М., Теряєв В.І. Бездавачеве векторне керування асинхронним двигуном електромобіля з нечітким алгоритмом адаптації спостерігача швидкості. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. – 2024. – № 1 (88). – С. 115-125. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.15>

35. Розроблення стартап-проекту: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей // За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ» - 2015 – 28 с.

Додаток А



Поз.	НАЙМЕНОВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА	ТИП, МАРКА, ПОЗНАЧЕННЯ ДОКУМЕНТІВ, ОПТИМІЗАЛЬНОГО ЛИСТА	КОД ОБЛ. ВИРОБЦ. МАТЕРІАЛУ	ЗАВОД - ВИГОТОВЛЮВАЧ	ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ	КІЛЬКІСТЬ	МАСА ОДИНИЦІ КГ	ПРИМІТКА
Елементи щита керування								
OS1	Переточачи чотирьохполюсний	CS 75 10 U LK 3p «0-1» 75 A		ETI	шт.	1		
OF1	Автоматичний вимикач однополюсний	SH203-BK3		ABB	шт.	1		
SF1	Автоматичний вимикач однополюсний	SH201-B10		ABB	шт.	1		
SF2	Автоматичний вимикач однополюсний	ABB SH201-C6		ABB	шт.	1		
SF3, SF4	Автоматичний вимикач однополюсний	SH201-B6		ABB	шт.	2		
FU1-FU8	Класи на розробки 5X20	SH201-B6		WAGO	шт.	8		
	Запобіжник 0,5А	5x20		ETI	шт.	5		
	Запобіжник 1,0А	5x20		ETI	шт.	2		
	Запобіжник 3,15А	5x20		ETI	шт.	1		
HL1	Світельний світильник з вимикачем	TS 10W 4000K (10x1x35x23mm)		LED TS 10W 4000K	шт.	1		
HM1	Панель оператора	GT 2512-STBA		MITSUBISHI	шт.	1		
TS1	Термостат на DIN рейку	THV02		ALFA ELECTRIC	шт.	1		
MD1	Вентилятор з решіткою і фільтром	FULL1500-PELL1500		ESEN	шт.	1		
PLC1	Комп'ютер	FX5U-32MT/D		MITSUBISHI	шт.	1		
PLC2, PLC3	Модуль аналогового входу	FX5U-4AD-ADP		MITSUBISHI	шт.	2		
GI	Блок живлення	ABL51A2459		SCHNEIDER	шт.	1		
SB1	Кнопка аварійного зупинки "грибок" з фіксацією по поверненні обертання	EGM.T-R		ETI	шт.	2		
	Блок контактів	E-NC		471501	ETI	шт.	2	
UPS1	Джерело безперебійного живлення	Keor SP 600BA/360Ba		Legrand	шт.	1		
KV1	Реле контролю фаз		704764002030	Finder	шт.	1		
SFC1	Перетворювач частоти	FR-AB0-00470		MITSUBISHI	шт.	1		
DV1	Мережевий комп'ютер	FL Switch 1055N			шт.	1		
Приспоби за місцем								
M1	Асинхронний двигун	A160RBY3			шт.	1		
TE1, TE2, TE3, TE4	Датчик температури	PT100			шт.	2		
PE1	Датчик тиску	Y12		GEFRAN	шт.	1		
BR1	Інкрементальний енкадер	E6B2-CW26C		Ogura	шт.	1		
Кабельно-проводячі матеріали								
W1	Кабель сигнальний екранований	DFLEX CLASSIC 15 CY 400	1136104	Lapp	м.			
W2, W3	Кабель силовий	ПВС 3x0,75			м.			
W4, W5	Кабель шина пара екранований	FTP CA5e			м.			
W6, W7	Кабель сигнальний екранований	DFLEX CLASSIC 15 CY 2x0,5	1136752	Lapp	м.			
W6, W7	Кабель сигнальний екранований	DFLEX CLASSIC 15 CY 8x0,5	1136752	Lapp	м.			

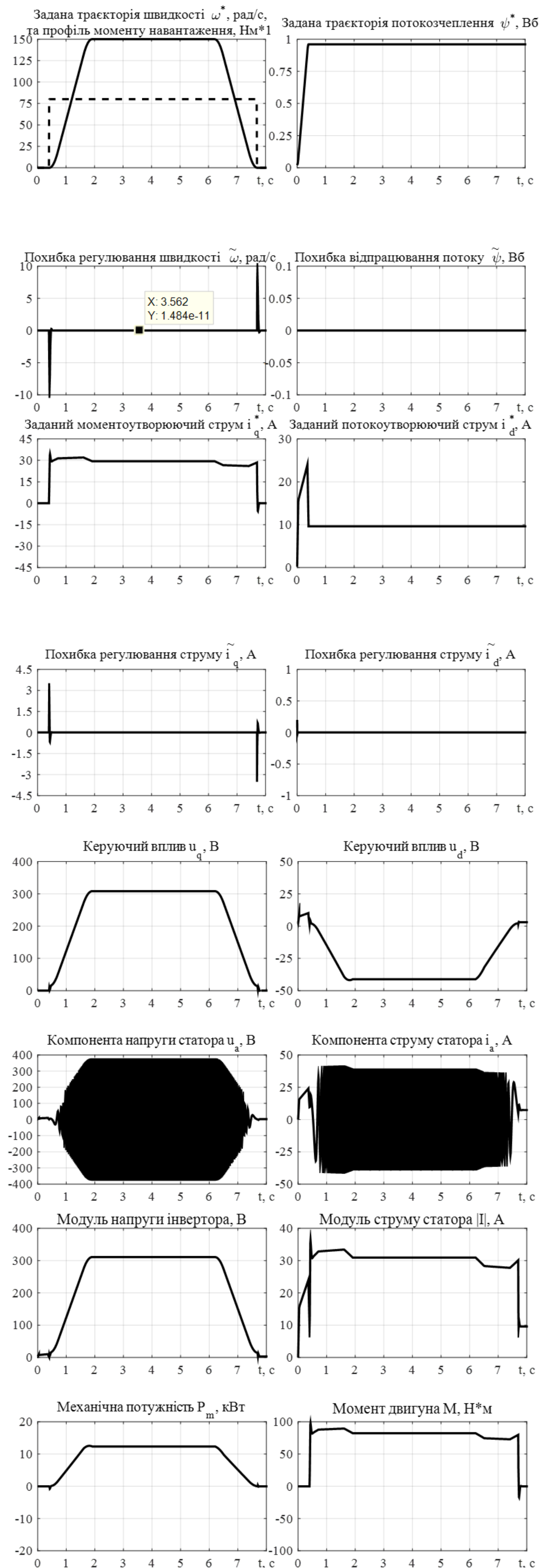
1410006.006.МД

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Лист	Маса	Масштаб
Розробив		Вашенко Р.В.					
Перевірив		Пройсмак Б.І.					
Н. контр.							
Затверд.		Ковбаса С.М.					

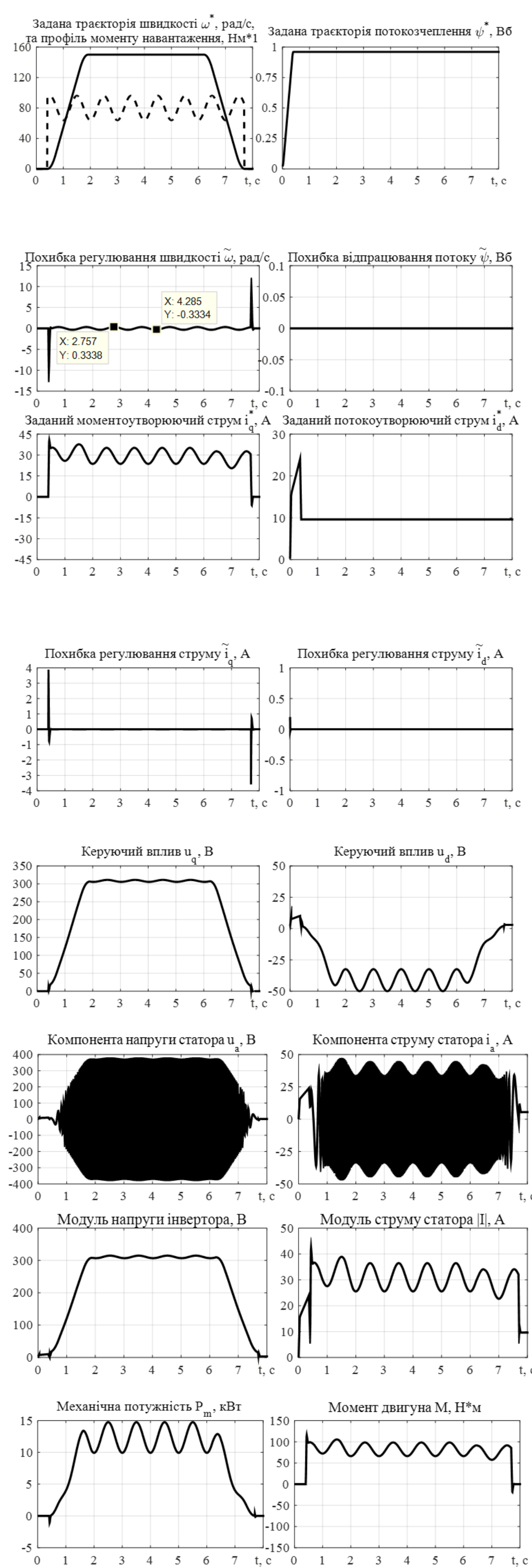
Векторно-керуваний асинхронний електродвигун екстремальної установки.
Схема електрична принципова

Аркуш 1 Аркушів 6
НТЧУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА,
каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-47п

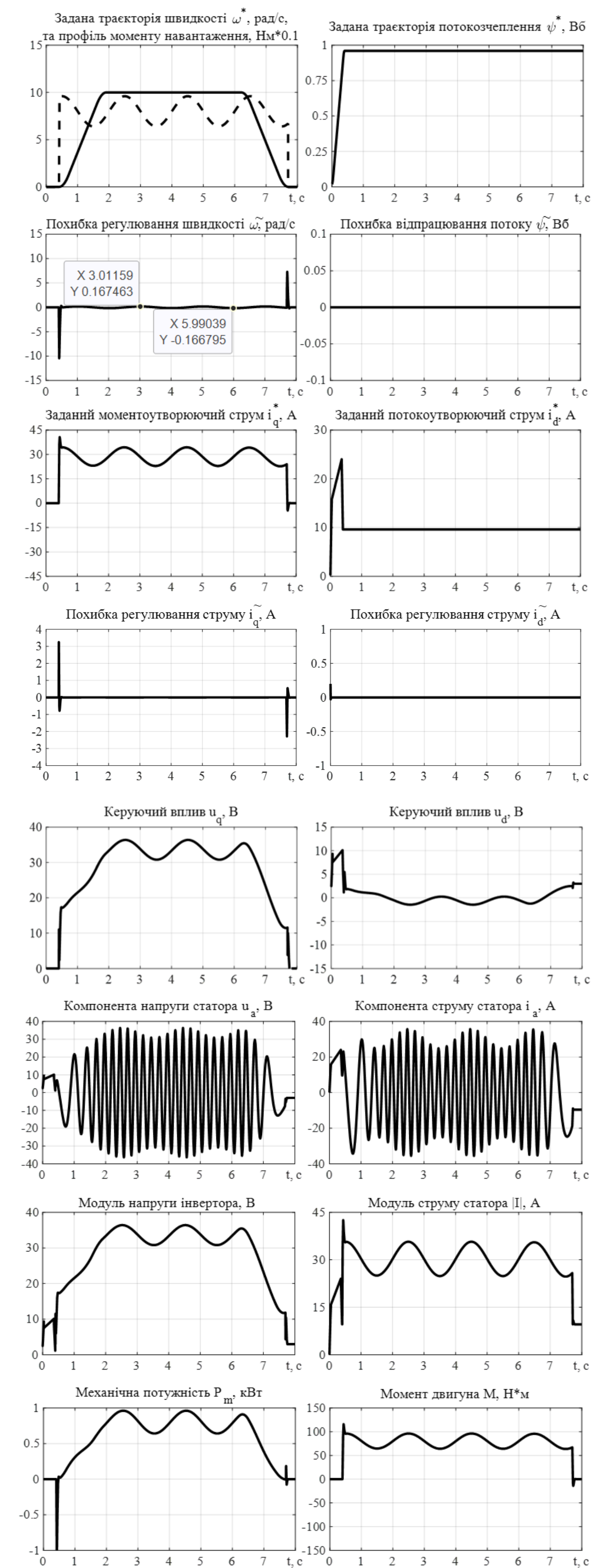
Графіки перехідних процесів при номінальному навантаженні



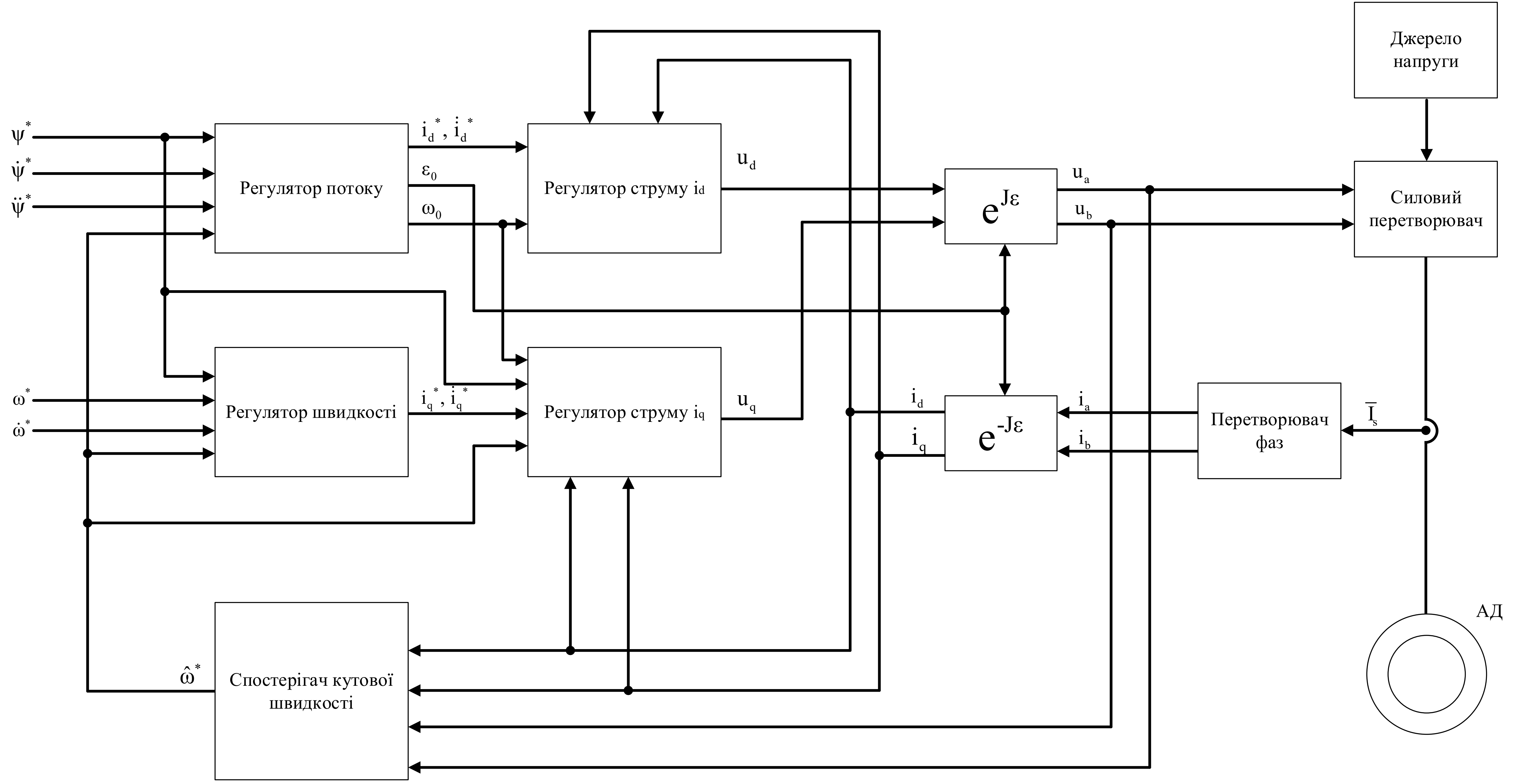
Графіки перехідних процесів при динамічному моменті навантаження



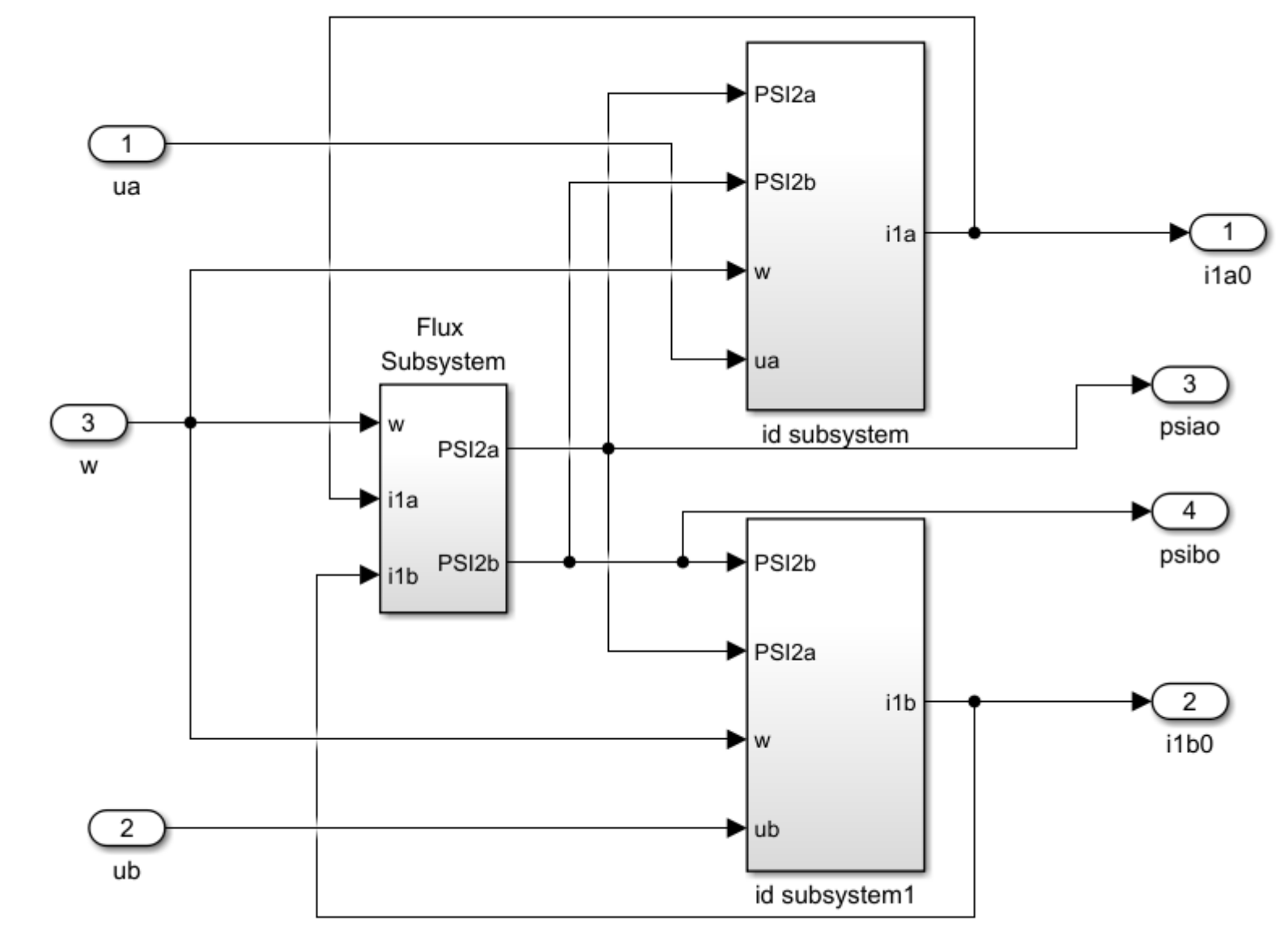
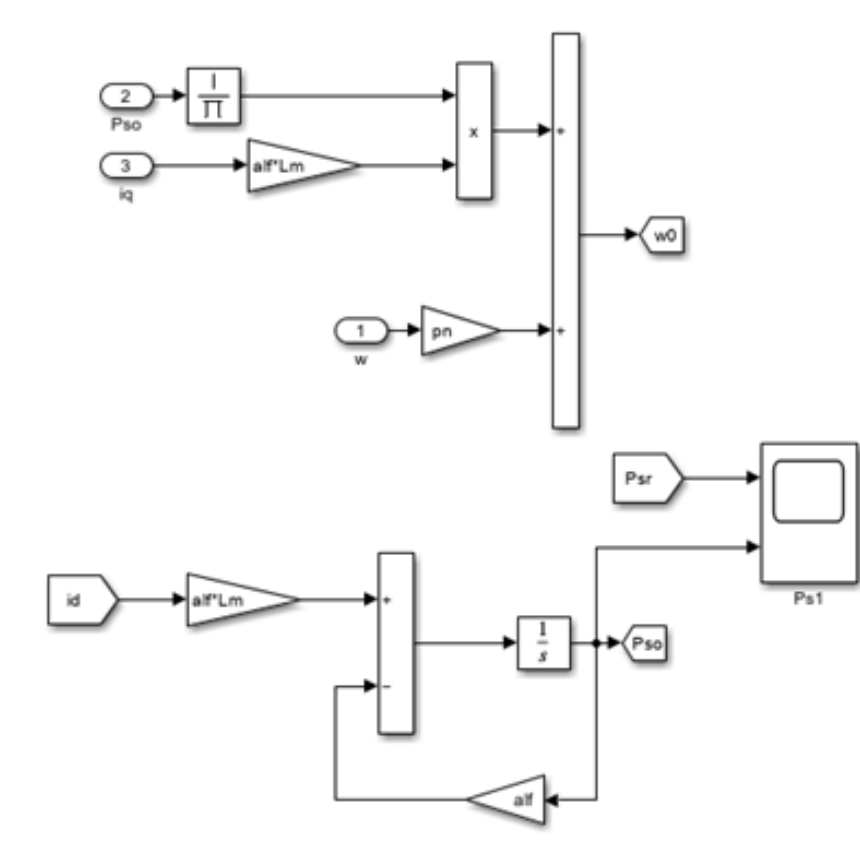
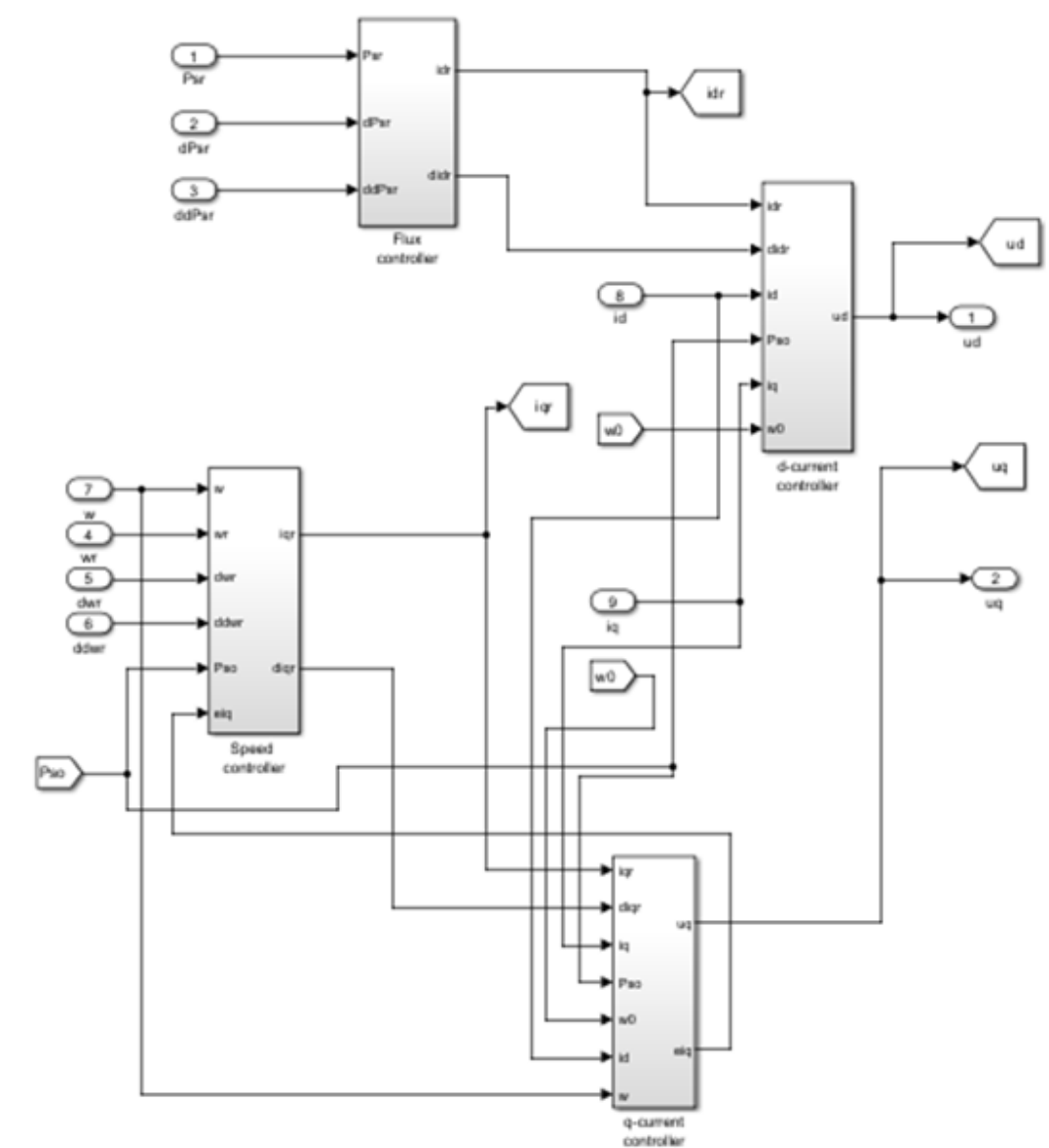
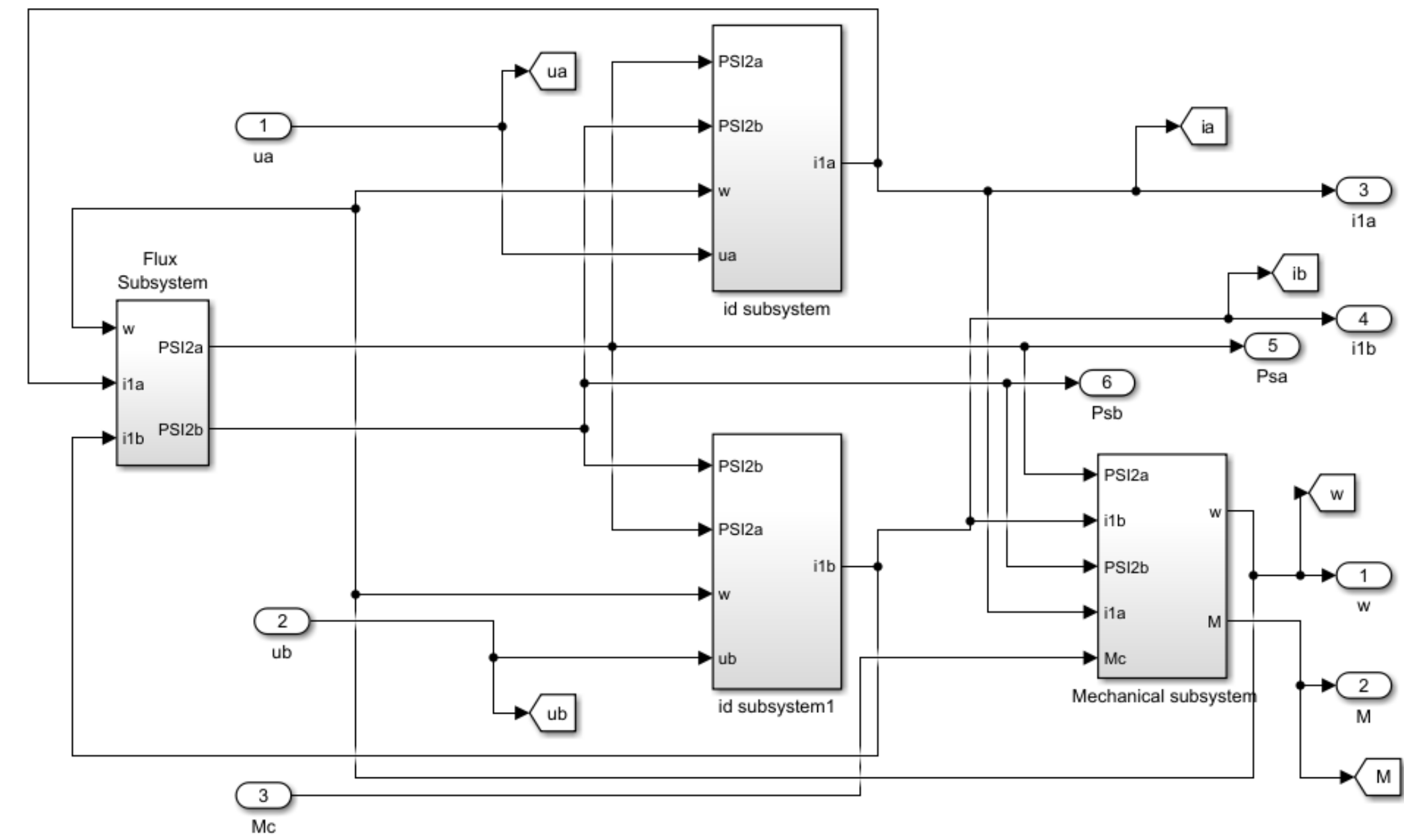
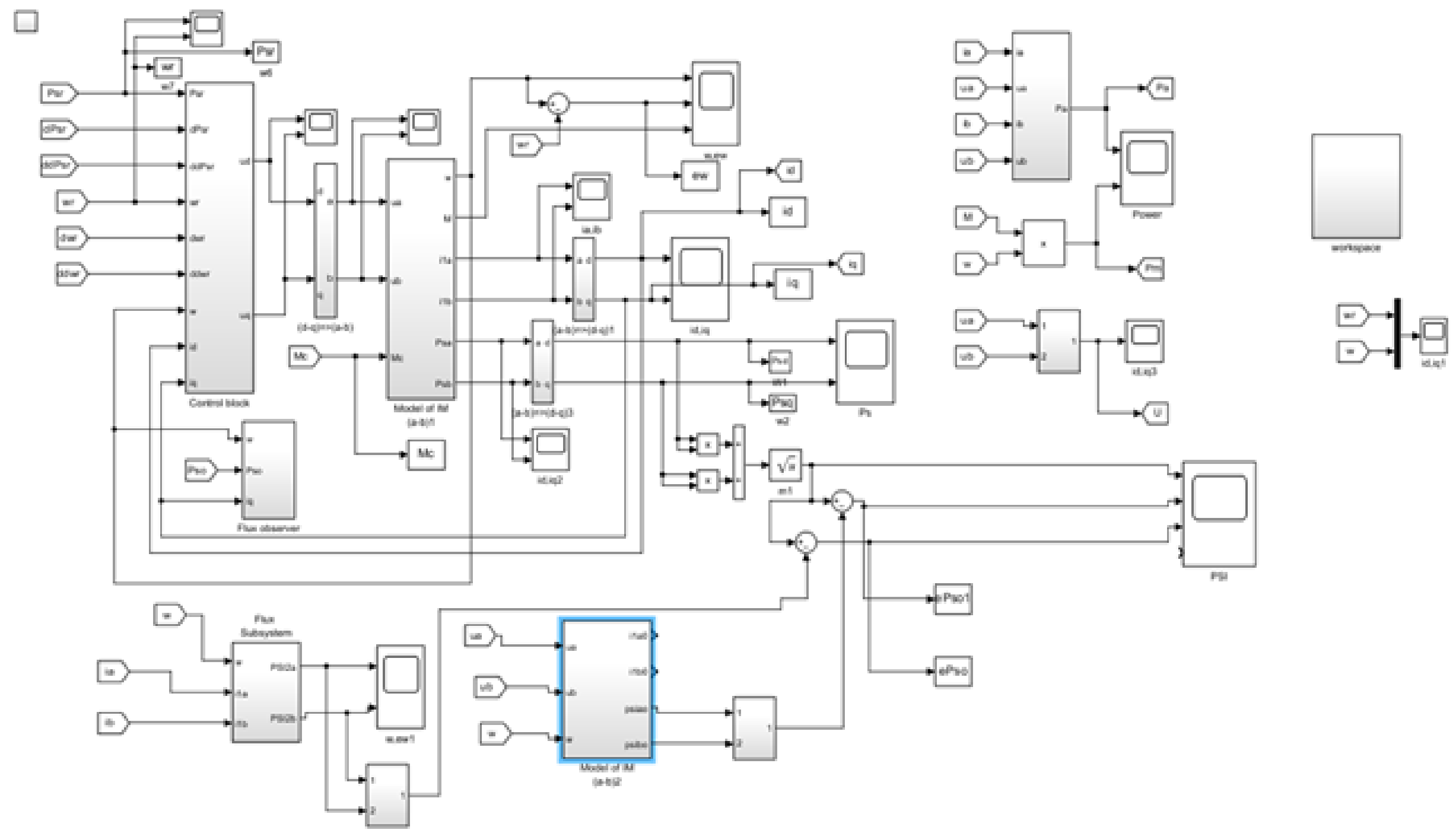
Графіки перехідних процесів при динамічному моменті навантаження на швидкості 1/15 від номінальної



				14.1.0006.006.МД		
Зм.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата		
Розробив	Івашко Р.В.					
Перевірив	Пріцак Б.І.					
Н. контр.						
Затверд.	Ковбаса С.М.					
					Лит.	Маса
					Архив	Масштаб
					3	6
					НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-4.1тп	



					14.1.0006.006.МД			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Векторно-керуваний асинхронний електродвигун екструдерної установки. Функціональна схема			
Розробив	Вячеславо Р.В.							
Перевірив	Прісман Б.І.							
Н. контр.								
Затверд.	Ковбаса С.М.				Лит.	Маса	Масштаб	
					Аркуш	4	Аркушів	6
					НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-4.191			



				14.1.0006.006.МД			
				Векторно-керуваний асинхронний електропривід екстремної установки. Структура програми моделювання			
Зм.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата	Лит.	Маса	Масштаб
Розробив	Іщенко Р.В.						
Перевірив	Пріцак Б.І.						
Н. контр.					Аркуш 5	Аркушів 6	
Затверд.	Ковбаса С.М.				НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-4/м		

