

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Сергій КОВБАСА
(підпис)

“ ” _____ 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

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

на тему: «Електромеханічна система пластинчатого конвеєру»

Виконав : студент 4 курсу, групи ЕП-01

Іващенко Ростислав Вячеславович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник к.т.н.професор. Печеник Микола Валентинович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

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

(підпис)

Рецензент к.т.н. доцент Чумак Вадим Володимирович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

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

Студент (-ка) _____
(підпис)

Київ – 2024 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

[illegible]

					141.ЕП0105.05.БР						
		№ докum.	Підпис								
Розроб.	Іващенко Р.В.				«Електромеханічна система пластинчатого конвеєру»	Літ		Арк	Аркушів		
Перевір.	Печеник М. В.							2	89		
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП					
Н. Контр.	Печеник М. В.					гр. ЕП-01					
Затверд.	Ковбаса С. М.										

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва)

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Сергій КОВБАСА

(підпис)

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Іващенко Ростислав Вячеславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Електромеханічна система пластинчатого конвеєру

керівник проекту професор Печеник М. В.

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

затверджені наказом по університету від «__» _____ 2024 р. №__

2. Термін подання студентом проекту: 05.06.2024

3. Вихідні дані до проекту: розрахункова продуктивність конвеєра $Q = 300$ т/год; Геометричні параметри траси: $L_1 = 30\text{м}$; $L_2 = 40\text{м}$; $H = 12\text{м}$. Розмір типового шматка вантажу $a' = 160\text{мм}$; насипна щільність вантажу $\rho = 2,4\text{т/м}^3$; кут природного відкосу в спокої $\varphi = 40^\circ$; коефіцієнт тертя вантажу по сталевому настилу $f = 0,5$; кут тертя вантажу об металічний настил $\varphi = \arctg f = \arctg 0,5 = 26,5^\circ$; кут нахилу похилого відрізка траси $\beta = \arctg(H / L_2)$

4. Зміст пояснювальної записки: 1 Аналітичний огляд науково-технічної літератури в області систем безперервного транспорту з ланцюговими тяговими елементами ; 2 тяговий розрахунок та вибір електродвигуна; 3

розрахунок та вибір елементів електромеханічної системи; 4 розробка математичної моделі електромеханічної системи регулятора швидкості; 5 дослідження динамічних та статичних характеристик електромеханічної системи конвеєру.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, презентацій тощо): Схема технологічної установки– А1, Схема векторно-керуваного АД – А1, Результати досліджень режимів роботи ЕМС – А1.

6. Консультанти розділів проекту*

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

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

7. Дата видачі завдання 01.04.2024

Календарний план виконання бакалаврської роботи

студента 4к. гр.ЕП-01

Іващенко Ростислав Вячеславович

на тему «Електромеханічна система пластинчатого конвеєру»

№ П/П	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	2	3	4
1.	Аналітичний огляд науково-технічної літератури.	10. 04. 2024	
2.	Тяговий розрахунок і вибір електродвигуна.	24.04.2024	
3.	Розрахунок та вибір елементів електромеханічної системи	01.05.2024	
4.	Розробка математичної моделі електромеханічної системи конвеєру. Синтез регулятора швидкості.	10.05.2024	
5.	Розробка моделі для дослідження режимів роботи електромеханічної системи	15.05.2024	
6.	Дослідження динамічних режимів роботи електромеханічної системи конвеєру.	22.05.2024	
8.	Аналіз результатів досліджень. Висновки по роботі.	24.05.2024	
9.	Розробка схемних рішень системи	29.05.2024	
10.	керування, підготовка креслень.		
11.	Оформлення роботи. Підготовка презентації та доповіді до захисту.	05.06.2024	

					141.ЕП0105.05.БР						
		№ докум.	Підпис								
Розроб.	Іващенко Р.В.				«Електромеханічна система пластинчатого конвеєру»			Літ	Арк	Аркушів	
Перевір.	Печеник М. В.								5	89	
Реценз.				КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП гр. ЕП-01							
Н. Контр.	Печеник М. В.										
Затверд.	Ковдаса С. М.										

РЕФЕРАТ

Дипломний проект складається з 89 сторінок і вміщує 36 рисунків 6 таблиць та 3 графічні матеріали в форматі А1.

У цьому проекті проведено аналітичний огляд наявної літератури щодо пластинчатих конвеєрів. Визначено вимоги до електроприводу для конвеєрної установки, а також обрано метод керування та систему електроприводу.

На основі проведених розрахунків було вибрано асинхронний двигун та визначено параметри пластинчатого конвеєра.

У прикладному пакеті програм MATLAB SIMULINK створено математичну модель системи та проаналізовано перехідні процеси параметрів системи при різних режимах роботи зі змінною швидкістю та навантаженнями.

ПЛАСТИНЧАТИЙ КОНВЕЄР, ПРЯМЕ ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, РЕГУЛЯТОР ШВИДКОСТІ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ЕЛЕКТРОПРИВОД, MATLAB, SIMULINK, СУМАРНИЙ МОМЕНТ ІНЕРЦІЇ, ВЕКТОРНА ДІАГРАМА, ДІАГРАМА ТЯГОВИХ ЗУСИЛЬ.

					141.ЕП0105.05.БР			
		№ докум.	Підпис					
Розроб.	Іващенко Р.В.				«Електромеханічна система пластинчатого конвеєру»	Літ	Арк	Аркушів
Перевір.	Печеник М. В.						6	89
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП гр. ЕП-01		
Н. Контр.	Печеник М. В.							
Затверд.	Ковдаса С. М.							

The diploma project consists of 89 pages and contains 36 figures, 6 tables and 3 graphic materials in A1 format.

In this project, an analytical review of the available literature on plate conveyors was carried out. The requirements for the electric drive for the conveyor system were determined, and the control method and electric drive system were selected.

Based on the calculations, an induction motor was selected and the parameters of the plate conveyor were determined.

A mathematical model of the system was created in the MATLAB SIMULINK software package and transient processes of the system parameters were analysed under different operating modes with variable speed and loads.

PLATE CONVEYOR, DIRECT VECTOR CONTROL, SPEED CONTROLLER, FREQUENCY CONVERTER, ELECTRIC DRIVE, MATLAB, SIMULINK, TOTAL MOMENT OF INERTIA, VECTOR DIAGRAM, TRACTION DIAGRAM.

					141.ЕП0105.05.БР		
		№ докум.	Підпис				
Розроб.	Іващенко Р.В.			«Електромеханічна система пластинчатого конвеєру»	Літ	Арк	Аркушів
Перевір.	Печеник М. В.					6	89
Реценз.					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП зр. ЕП-01		
Н. Контр.	Печеник М. В.						
Затверд.	Ковбаса С. М.						

ЗМІСТ

Вступ.....	9
1.АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ В ОБЛАСТІ СИСТЕМ БЕЗПЕРЕРВНОГО ТРАНСПОРТУ З ЛАНЦЮГОВИМИ ТЯГОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ.	10
1.1. Аналіз конструкції і режими роботи конвеєрних систем	10
1.2. Аналіз режимів роботи технологічної установки, розробка вимог до електроприводу пластинчатого конвеєра	19
2 ТЯГОВИЙ РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА.....	26
2.1 Тяговий розрахунок конвеєра.....	26
2.1 – Технічні дані двигуна АІР 250 S8У3.....	30
3 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ.	37
3.1 Розрахунок та вибір редуктора	37
3.2 Вибір перетворювача частоти та автоматичного вимикача	40
Висновок до 3 розділу	42
4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ.....	43
4.1. Синтез регулятора швидкості	43
4.2 Математична модель асинхронного електродвигуна в двофазній системі координат a і b	49
Висновок до 4 розділу	54
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ТА СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КОНВЕЄРУ	55
5.1 Розробка моделі для дослідження перехідних процесів в межах пакету прикладних програм «Matlab Simulink».....	55
5.2 Опис моделі, окремих елементів	57
Взаємодія між підсистемами	63
5.3 Методика проведення досліджень перехідних процесів.	64
Висновок по роботі	87
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	88

ВСТУП

У сучасному світі, де швидкість і ефективність стають визначальними факторами успіху у будь-якій галузі промисловості, питання оптимізації процесів виробництва набувають все більшої актуальності. Особливе місце серед засобів автоматизації виробничих процесів займають пластинчаті конвеєри – технічні системи, які забезпечують переміщення різноманітних матеріалів від однієї точки до іншої.

Пластинчаті конвеєри відіграють ключову роль у різноманітних галузях виробництва – від промисловості до сільського господарства. Їхні технічні характеристики, ефективність та надійність мають прямий вплив на продуктивність підприємств. Тому вивчення та аналіз принципів їх роботи, покращення конструкцій та технологій експлуатації є невід’ємною складовою наукових досліджень у сфері інженерії та технологій.

У даній дипломній роботі детально розглядається теоретичний аспект функціонування пластинчатих конвеєрів, проводиться аналіз сучасних рішень у галузі їхньої конструкції та експлуатації. Метою дослідження є розробка рекомендацій щодо оптимізації роботи конвеєрів з метою підвищення їхньої продуктивності та зниження витрат на обслуговування.

Результати даної роботи мають важливе значення для практичного впровадження у виробництво нових технологій та покращення існуючих систем автоматизації, що сприятиме зростанню конкурентоспроможності підприємств та загальному підвищенню рівня ефективності виробництва.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ В ОБЛАСТІ СИСТЕМ БЕЗПЕРЕРВНОГО ТРАНСПОРТУ З ЛАНЦЮГОВИМИ ТЯГОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ.

1.1. Аналіз конструкції і режими роботи конвеєрних систем

Конвеєри - складна технічна система, призначена для автоматизованого переміщення різноманітних матеріалів або виробів. Вони відіграють критичну роль у виробничих процесах, забезпечуючи швидке та ефективне транспортування від однієї точки до іншої. За допомогою різноманітних механізмів, таких як стрічки, ланцюги, або пластини, конвеєри оптимізують рух товарів на заводах, у складському господарстві, а також у логістичних системах. Ефективне використання конвеєрів сприяє підвищенню продуктивності та зниженню витрат у виробництві.

При виборі конвеєра потрібно приділяти увагу ряду ключових аспектів. Відомості про властивості та потреби виробництва, такі як типи матеріалів, що переміщуються, потрібна пропускна здатність вимоги щодо безпеки, середовища експлуатації та інші фактори, будуть вирішальними. Також варто враховувати технічні характеристики конвеєра, такі як його тип (наприклад, стрічковий, ланцюговий, пластинчатий), максимальне навантаження, швидкість переміщення, можливості регулювання, якість матеріалів і конструкції, а також вартість та витрати на обслуговування.

Напрями розвитку. Сучасний прогрес у виробництві ґрунтується на комплексній механізації та автоматизації транспортно-вантажних операцій з широким застосуванням конвеєрів, що дозволяє значно підвищити продуктивність праці та знизити вартість продукції. Для вирішення цих завдань прослідковуються такі напрями розвитку конвеєрів.

Розширення сфери застосування конвеєрів, включаючи їхнє використання в автоматизованих транспортно-технологічних системах виробництва.

Розробка конвеєрів для безперервного транспортування вантажів від початкових до кінцевих пунктів як по прямій, так і складній трасі великої

протяжності, що замінює декілька окремих конвеєрів одним або єдиною транспортною системою без перевантажень.

Підвищення продуктивності конвеєрів через оптимізацію форми вантажонесучого елемента для збільшення кількості вантажу на одиницю довжини та збільшення швидкості транспортування.

Розробка конвеєрів з крутими та складними горизонтально-вертикально-горизонтальними трасами для ефективного транспортування різноманітних вантажів.

Підвищення надійності та спрощення обслуговування конвеєрів в умовах важкої експлуатації за рахунок використання довговічних компонентів.

Автоматизація управління конвеєрами та їхніми комплексами за допомогою сучасних систем керування.

Зменшення металомісткості та розмірів конвеєрів за рахунок розробки нових легких конструкцій з використанням пластмас, легких сплавів та тонкостінних профілів.

Розробка нових типів конвеєрів на основі передових методів транспортування, таких як магнітна підвіска та повітряна подушка для вантажонесучого елемента.

Покращення умов праці персоналу та уникнення втрат вантажу через повну герметизацію та ізоляцію конвеєрів від навколишнього середовища під час транспортування різних видів вантажів.

Уніфікація та стандартизація обладнання з одночасним розширенням діапазону розмірів на основі єдиної системи компонентів.

У зв'язку з великим розмаїттям конструкцій конвеєрів для вирішення однієї задачі можна використовувати різні типи. Вибір типу конвеєра, що найкраще відповідає вимогам конкретного завдання, є важливим та відповідальним етапом розроблення проєктів механізації транспорту для підприємств. Цей вибір вимагає від проєктувальника не тільки відповідних знань щодо конструктивних і експлуатаційних властивостей конвеєрів, але й детального розуміння виробничого процесу на підприємстві, яке механізується, та умов його експлуатації.

Одними з основних критерій при виборі типу конвеєра є відповідність набору технічних вимог, а також техніко-економічна ефективність його застосування. Важливими умовами вибору конвеєра є його надійність при виконанні технічних завдань в відповідних умовах та відповідність вимогам охорони праці і безперечно техніки безпеки. Дані умови часто призводять до прийняття дорогих рішень з економічної точки зору. Раціональним є такий конвеєр (або комплекс конвеєрів), який задовольняє всім технічним вимогам виробництва і техніки безпеки, є надійним у експлуатації, забезпечує високий рівень механізації та найбільш сприятливі умови праці, а також є економічно ефективним.

На вибір оптимального типу конвеєра впливають такі фактори:

Характеристика вантажу, що транспортується. Детальний аналіз фізико-механічних властивостей вантажу може значно звузити перелік можливих до застосування типів конвеєрів.

Необхідна продуктивність. Кожен тип конвеєра має свої межі оптимальних швидкостей і продуктивності.

Довжина та конфігурація траси транспортування вантажу. Кожен тип конвеєра має різні оптимальні можливості щодо довжини і конфігурації траси.

Спосіб завантаження та розвантаження вантажів. Доцільно застосовувати конвеєри з самозавантаженням і саморозвантаженням для максимальної автоматизації вантажно-розвантажувальних операцій.

Характеристика для виробничого процесу, на основі якої виконуються з переміщенням вантажів-виробів. Обраний тип конвеєра повинен забезпечувати надійне поєднання транспортних і технологічних операцій.

Виробничі та кліматичні умови навколишнього середовища. Облаштування конвеєрів повинно враховувати кліматичні умови району знаходження підприємства та їхній вплив на обслуговування і експлуатацію, зокрема в зимовий період.

З урахуванням цих факторів може бути кілька типів конвеєрів або їхніх систем, і остаточне рішення приймається після проведення техніко-економічного аналізу.

Режими роботи конвеєра характеризуються навантаженнями та тривалістю їхньої дії, визначаються класами використання конвеєра за часом, його продуктивністю та натягом тягового елемента. Ці режими встановлюють умови для розрахунку міцності та довговічності елементів конвеєра і є показниками фактичного експлуатаційного використання машини.

До конвеєрів з ланцюговими тяговими елементами можна віднести підвісні ланцюгові конвеєри ланцюгові конвеєри скребкові та пластинчаті ланцюгові конвеєри.

Скребкові конвеєри з високими суцільними скребками призначені для перевезення пилоподібних, зернових і кускових вантажів, які добре дробляться та мало абразивні, по горизонтальних каналах, каналах зі схилами та комбінованих трасах. У таких конвеєрах вантаж переміщується за допомогою скреbkів по жолобу або трубі прямокутного або круглого перетину.



Рисунок 1.1 – Приклад скребкового конвеєра

Переваги скребкових конвеєрів включають:

- простоту конструкції та експлуатації;
- можливість завантаження та розвантаження в будь-якому місці;

- здатність до герметичного транспортування пилу, газоподібних та горючих вантажів;
- можливість двох направленою транспортування.

До недоліків скребкових конвеєрів відносяться:

- подрібнення та розрізання вантажу;
- зношування ходової частини конвеєра та жолоба, особливо при перевезенні абразивних вантажів;
- високе енергоспоживання;

значні навантаження тягового елемента через можливість застрягання важко подрібнюваних кусків вантажу між скребками та жолобом.

Значний опір руху вантажу та зношування зумовлюють обмеження швидкості, довжини та ефективності скребкових конвеєрів. Загалом, швидкість таких конвеєрів становить 0,16-0,4 м/с, іноді може досягати 0,5-1 м/с на конвеєрах що транспортують вугілля, максимальна довжина сягатиме 100 м, а продуктивність від 50 до 350 тон за годину (залежно від конструкційного типу). У деяких типорозмірах конвеєрів з високими скребками продуктивність може сягати приблизно 700 т/год.

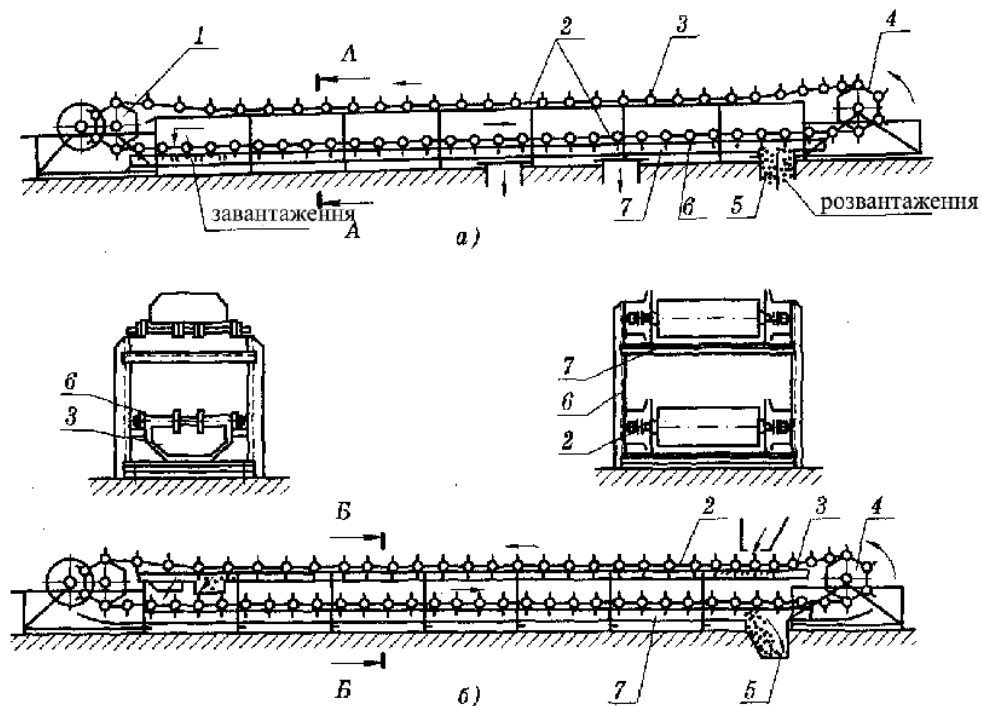


Рисунок 1.2 – Скребковий конвеєр
із суцільними, суцільними скребками:

а - з однією робочою гілкою; б - з двома робочими гілками;

1 - натяжний пристрій; 2 - тяговий ланцюг;

3 - скребок; 4 - привід; 5 - пусковий отвір;

б - рама; 7 – жолоб

Трубчасті скребкові конвеєри мають замкнутий контур ланцюга з прикріпленими до нього круглими скребками. Цей ланцюг зі скребками рухається всередині герметичної труби. Рух ланцюга забезпечується приводом; місця завантаження та розвантаження можуть бути розташовані в будь-якому місці на горизонтальній ділянці конвеєра. На кінцевій точці розвантаження встановлюється вібраційний пристрій для очищення ланцюга та скребків від вантажу. Натяжний пристрій розміщується на одному з нижніх поворотних ділянок труби. Повороти ланцюга зі скребками здійснюються на поворотних блоках, зірочках або криволінійних ділянках труби.

Трубчасті конвеєри можуть мати як плоскі, так і просторові траси і призначені для перевезення легкосипучих пилоподібних, порошкоподібних, зернистих та дрібнокускових вантажів з малою міцністю шматка, що розміром приблизно на 5-10 разів менше за внутрішній діаметр труби, при малій і середній продуктивності. Герметичність трубчастих конвеєрів дозволяє використовувати їх для перевезення отруйних, запахливих та гарячих матеріалів, а також рідких та напіврідких нелипких вантажів по горизонтальних і вертикальних трасах.

Трубчастими конвеєрами неможливо транспортувати липкі та швидко затвердіваючі матеріали, а також матеріали з шматками високої міцності (наприклад, щебінь). Такі шматки можуть застрягати між скребком і трубою та блокувати рух ланцюга, тому в місцях завантаження конвеєра встановлюють решітки, що не допускають потрапляння шматків у трубу.

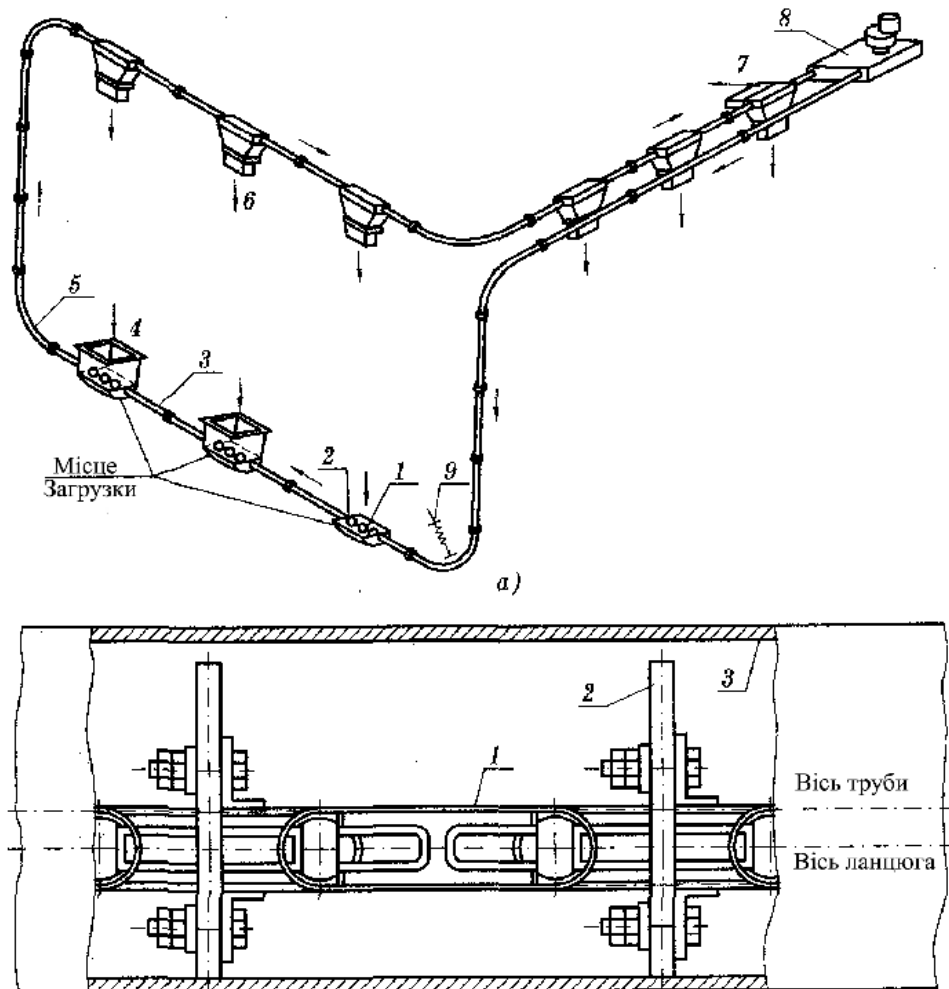


Рисунок 1.3 – Трубчастий скребковий конвеєр:

а - загальний вигляд; б - переріз конвеєра;

1 - ланцюг; 2 - скребок; 3 - труба; 4 - завантаження;

5 - криволінійна ділянка труби; 6 - розвантаження;

7 - пристрій для очищення ланцюга; 8 - привід;

9 - натяжний пристрій

Пластинчасті конвеєри призначені для переміщення важких та крупнокускових вантажів, зокрема абразивних, гострокромкових і гарячих. Схеми трас пластинчастих конвеєрів показані на малюнку 1.1. Їх переваги включають:

- високу продуктивність;
- можливість транспортування великих відстаней без перевантажень;

- здатність транспортувати різноманітний асортимент як насипних, так і штучних вантажів;
- працездатність при різних температурах, включаючи як низькі, так і високі;
- можливість завантаження безпосередньо з бункера.

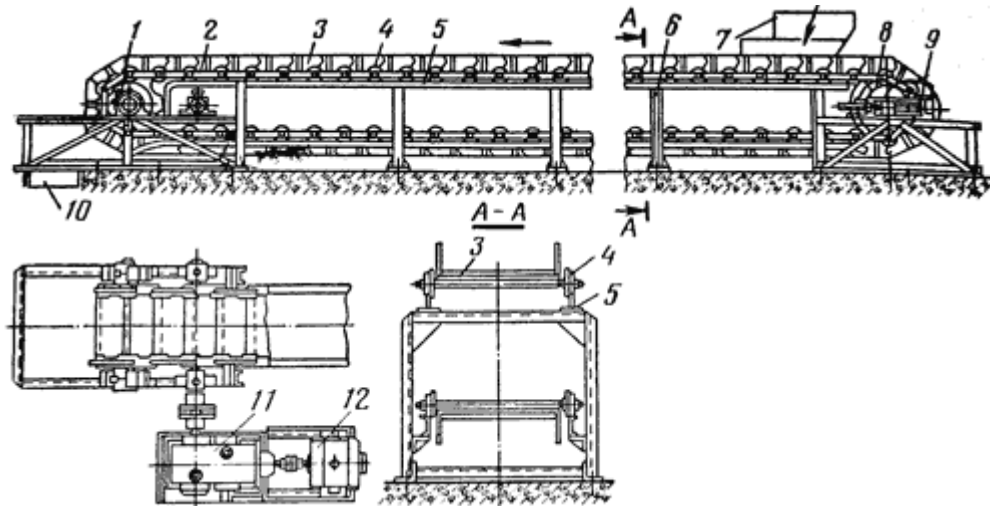


Рисунок 1.4 – Схема пластинчатого конвеєра

1 -приводна зірочка; 2 - ланцюг; 3- пластина; 4 - каток; 5 — направляюча шина; 5- станина; 7 — загрузочний отвір; 8 — натяжна зірочка; 9 - натяжна конструкція; 10 – розвантажувальний отвір; 11 - редуктор; 12 - електродвигун.



Рисунок 1.5 – Приклад пластинчатого конвеєра

Настил є основним вантажонесучим елементом пластинчастих конвеєрів. Залежно від характеристик транспортованого вантажу, у конвеєрах загального призначення застосовують шість типів пластин. Плоскі розчленовані настили (тип ПР) використовуються для штучних вантажів; плоскі з'єднані (тип ПС) і безбортові хвилясті настили (тип В) - для штучних і великих кускових вантажів у випадку, коли встановлені нерухомі борти. Однак, навіть у таких випадках дрібні частинки вантажу можуть просікатися через щілини між нерухомими бортами та застрягати в них. Це також призводить до додаткового опору руху від тертя вантажу про нерухомі борти. Ці недоліки відсутні у конвеєрах з бортовим хвилястим настилом (тип БВ), які використовуються для транспортування як штучних, так і насипних вантажів будь-якого розміру. Бортовий хвилястий настил складається з пластин, що перекривають одна одну як знизу, так і з боків.

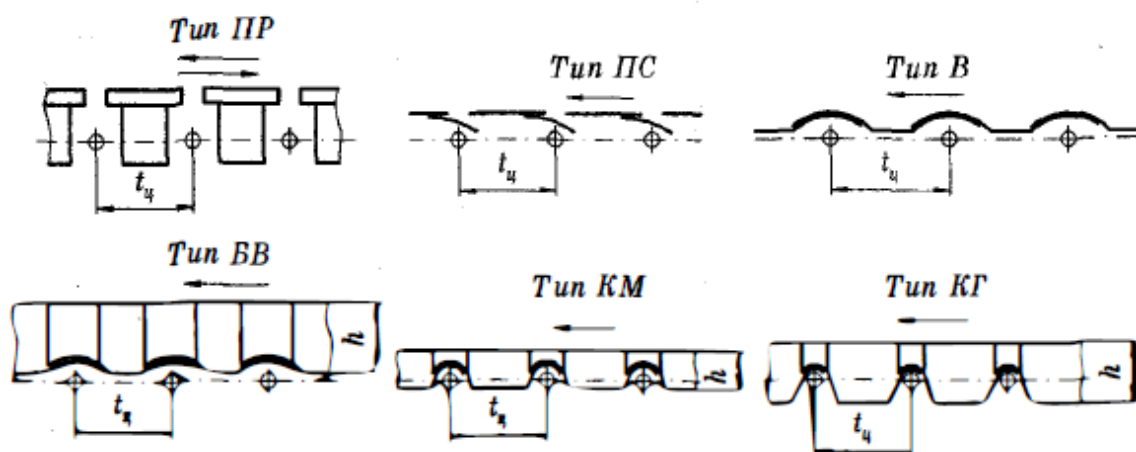


Рисунок 1.6 – Типи настилів : $t_{ц}$ - крок цїпка; h – висота борта

Такий настил має підвищену міцність і жорсткість, що дозволяє уникнути просідання вантажу у бік. Збільшується також зчеплення вантажу з настилом і допустимий кут нахилу конвеєра. Незважаючи на те, що при використанні бортового хвилястого настилу дещо збільшується маса останнього, його застосування є повністю виправданим під час транспортування великих мас важкого вантажу.

1.2. Аналіз режимів роботи технологічної установки, розробка вимог до електроприводу пластинчатого конвеєра

Загальні вимоги до електроприводу пластинчатого конвеєра:

Потужність та тип електродвигуна

Потужність електродвигуна повинна відповідати вимогам навантаження пластинчатого конвеєра.

Використовуються асинхронні трифазні електродвигуни з короткозамкненим ротором для стандартних завдань.

Для важких умов експлуатації можуть застосовуватися електродвигуни з фазним ротором або підвищеним ковзанням.

Енергоефективність

Електропривод має забезпечувати високий коефіцієнт корисної дії (ККД).

Використання частотних перетворювачів для регулювання швидкості дозволяє зменшити енергоспоживання.

Плавний пуск і зупинка

Частотні перетворювачі або варіатори забезпечують плавний пуск і зупинку конвеєра, що знижує механічне навантаження на компоненти конвеєра.

Захист від перевантажень

Електропривод повинен мати системи захисту від КЗ, перевантажень і перегріву.

Використання автоматичних вимикачів і реле захисту.

Надійність та довговічність

Використання якісних і надійних компонентів для забезпечення тривалої безперебійної роботи.

Регулярне технічне обслуговування та моніторинг стану електродвигуна та редуктора.

Вимоги до систем автоматичного керування пластинчатого конвеєра

Програмований логічний контролер (PLC)

PLC має забезпечувати керування всіма процесами конвеєра, включаючи пуск, зупинку, регулювання швидкості та аварійні відключення.

Підтримка різних протоколів зв'язку для інтеграції з іншими системами автоматизації на підприємстві.

Інтерфейси операторів

Зручні інтерфейси для операторів (HMI), що забезпечують відображення поточного стану конвеєра, налаштування параметрів та діагностику.

Забезпечення доступу до даних у реальному часі та можливість віддаленого моніторингу і керування.

Датчики і виконавчі механізми

Використання датчиків для контролю швидкості, натягу ланцюга, завантаження конвеєра, температури та інших параметрів.

Виконавчі механізми (електромагнітні клапани, актуатори) для автоматизації процесів завантаження, розвантаження та очищення.

Системи захисту та безпеки

Встановлення систем аварійного відключення та сигналізації.

Забезпечення безпеки персоналу через встановлення захисних огорожень, аварійних кнопок та інших засобів захисту.

Модульність і масштабованість

Система керування має бути модульною для легкого розширення та модифікації.

Можливість інтеграції з іншими автоматизованими системами підприємства для забезпечення єдиного інформаційного простору.

Вимоги до систем автоматизації пластинчатого конвеєра

Автоматизація процесів

Повна автоматизація процесів завантаження, транспортування та розвантаження матеріалів.

Використання автоматичних систем контролю та управління для підтримки стабільної роботи конвеєра.

Оптимізація роботи

Застосування алгоритмів оптимізації для підтримки максимальної продуктивності та мінімізації енергоспоживання.

Автоматичне регулювання швидкості конвеєра залежно від навантаження та інших умов.

Моніторинг і діагностика

Постійний моніторинг роботи конвеєра з фіксацією основних параметрів (швидкість, температура, навантаження).

Системи діагностики для виявлення і прогнозування можливих несправностей та запобігання аварійним ситуаціям.

Підтримка різних режимів роботи

Система автоматизації має підтримувати різні режими роботи (ручний, автоматичний, напівавтоматичний) для забезпечення гнучкості в управлінні конвеєром.

Основні вимоги до системи електроприводу:

Плавність регулювання

- Електропривод повинен забезпечувати плавне регулювання швидкості конвеєра без ривків або стрибків швидкості.

Плавність пуску та гальмування

- Електропривод повинен забезпечувати плавний розгін та зупинку конвеєра, запобігаючи різким змінам швидкості та навантаження.

Обмеження пускових моментів

- Під час пуску електроприводу потрібно обмежувати пускові моменти для запобігання механічним перевантаженням і зносу компонентів конвеєра.

Обмеження перевантажень

- Електропривод повинен забезпечувати захист від перевантажень, щоб уникнути пошкодження електродвигуна та інших компонентів конвеєра.

Регулювання швидкості залежно від умов технологічного процесу

Швидкість руху конвеєра повинна змінюватися залежно від вимог технологічного процесу, забезпечуючи оптимальну продуктивність та якість.

Аналіз системи електроприводів пластинчатих конвеєрів та визначення раціонального варіанту

Система автоматизації має підтримувати різні режими роботи (ручний, автоматичний, напівавтоматичний) для забезпечення гнучкості в управлінні конвеєром.

Можливість швидкого переключення між режимами для адаптації до змін у виробничому процесі.

Для потужних електроприводів пластинчатих конвеєрів найбільш популярними стали асинхронні двигуни з фазним ротором, що дозволяє забезпечити однакову жорсткість характеристик, що є вкрай важливим для конвеєрних електроприводів.

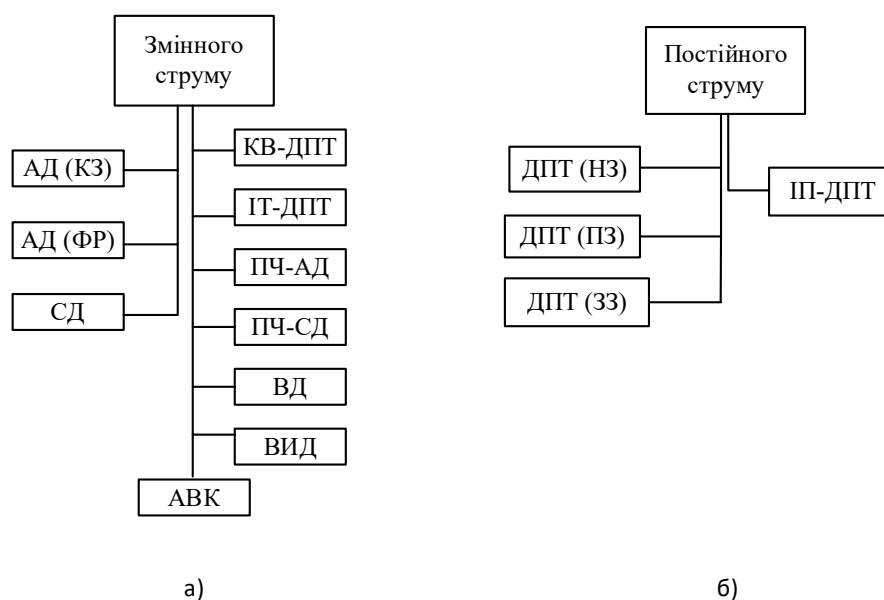


Рисунок 1.7 – Основні варіації для систем електроприводів, котрі живляться від мережі змінного (а) та постійного струму (б): АД (КЗ) – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором; АД (ФР) – асинхронний двигун з фазним ротором; СД – синхронний двигун; КВ – керований випрямляч; ІТ – імпульсно-тиристорний перетворювач; ДПТ – двигун

постійного струму (НЗ – незалежного збудження; ПЗ – послідовного збудження; ЗЗ – змішаного збудження); ПЧ – перетворювач частоти; ВД – вентильний двигун; ВІД – вентильно-індукторний двигун; ІП – імпульсний перетворювач; АВК – автоматизований комплекс

Таблиця 1.1- Порівняльна характеристика електроприводів

Тип електроприводу	Переваги	Недоліки	Застосування
Асинхронний	Простий у конструкції, дешевий, надійний, високий ККД	Низький пусковий момент, низький коефіцієнт потужності	Підйомні механізми, конвеєри, насоси, вентилятори
Синхронний	Високий ККД, високий пусковий момент, можливість роботи з регульованою швидкістю	Складний у конструкції, дорогий	Компресори ліфти, металорізальні верстати
Кроковий	Висока точність позиціонування, низький шум	Низька швидкість, низький ККД	Приводи робототехніки, ЧПУ верстати, принтери
Векторний	Ефективне керування при зміні навантаження	Складність реалізації	Підйомні механізми, конвеєри, транспортні системи
Частотний	Широкий діапазон регулювання швидкості, плавний розгін і гальмування	Більш складний у керуванні ніж інші типи	Підйомні механізми, конвеєри, насоси, вентилятори

З розглянутих загальних систем електроприводів найбільш прийнятний у відповідності до вимог технологічного процесу можуть бути

використані система з регулюванням ковзання електричного асинхронного двигуна за рахунок зміни опору ланцюга ротора.

Проведемо порівняння основних методів керування асинхронним двигуном:

Частотне керування

Частотне керування асинхронного двигуна полягає у зміні частоти живлення двигуна для регулювання його швидкості.

Переваги:

Простота реалізації.

Низька вартість.

Достатньо ефективне для застосувань з постійним навантаженням.

Недоліки:

Обмежена точність регулювання швидкості.

Низька динаміка.

Обмежена ефективність при змінних навантаженнях.

Скалярне керування (V/f Control)

Скалярне керування базується на підтримці постійного співвідношення напруги до частоти (V/f), щоб забезпечити постійний магнітний потік в машині.

Переваги:

Простота та надійність.

Відносно проста реалізація на мікроконтролерах.

Добра робота при сталих та передбачуваних навантаженнях.

Недоліки:

Низька динамічна відповідь.

Обмежена точність у контролі моменту та швидкості.

Вразливість до зміни параметрів двигуна (навантаження, температури).

Векторно керований асинхронний двигун (Field-Oriented Control, FOC)

Векторне керування використовує координатні перетворення (наприклад, перетворення Кларка і Паркера) для незалежного керування магнітним потоком та моментом двигуна.

Переваги:

Висока точність регулювання швидкості та моменту.

Швидка динамічна відповідь.

Ефективне керування при змінних навантаженнях.

Можливість роботи в режимах з високими вимогами до моменту. забезпечення стабільної роботи в галузі малих швидкостей при варіаціях рівня завантаження конвеєрної системи

Недоліки:

Складність реалізації.

Високі вимоги до обчислювальних ресурсів.

Необхідність точної інформації про параметри двигуна.

На основі аналізу важливих систем електроприводів для пластинчатих конвеєрів обираємо як найкращий варіант електро-механічну систему з векторно-керованим електродвигуном.

Висновок до 1 розділу

На основі аналізу науково-технічної літератури сформульовано вимоги до електроприводу з урахуванням особливостей технологічного процесу. Аналіз варіантів систем електроприводів дозволив в якості найкращої обрати систему з векторно-керованим асинхронним електро-двигуном. Отримані результати дають можливість виконати розрахунок і вибір елементів електромеханічної системи.

2 ТЯГОВИЙ РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА.

2.1 Тяговий розрахунок конвеєра

Вхідні параметри до розрахунку.

Розрахункова продуктивність для пластинчатого конвеєра $Q = 300$ т/год; Геометричні параметри траси: $L_1 = 30\text{м}$; $L_2 = 40\text{м}$; $H = 12\text{м}$.

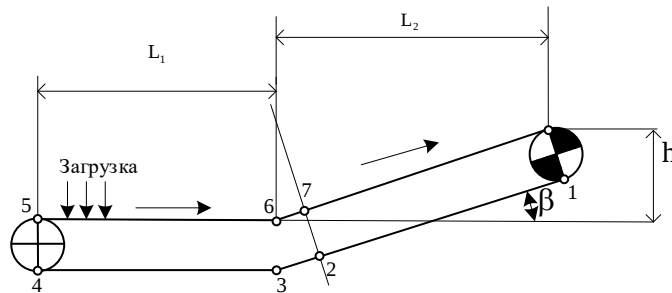


Рисунок 2.1 Схема траси пластинчатого конвеєра: L, H -довжини горизонтальних ділянок та висота підйому вантажу; β - кут нахилу

Типовий розмір вантажу $a' = 160\text{мм}$; насипна щільність вантажу $\rho = 2,4\text{т/м}^3$; кут природного відкосу в спокої $\varphi = 40^\circ$; коефіцієнт тертя вантажу по сталевому настилу $f = 0,5$; кут тертя вантажу об металічний настил $\varphi = \arctg f = \arctg 0,5 = 26,5^\circ$; кут нахилу похилого відрізка траси $\beta = \arctg(H / L_2) = \arctg(12 / 40) = 17^\circ$

Розрахунок виконано відповідно до методики наведеної в [2]

Тип настилу який забезпечує транспортування руди без суттєвого зниження продуктивності

$$\begin{aligned}\beta_{\max} &= \varphi_n - 6^\circ = 26,5 - 5 = 21,5^\circ; \\ \beta_{\max} &= \varphi_d - 7^\circ = 0,7 \cdot 40 - 7 = 21^\circ;\end{aligned}\tag{2.1}$$

За отриманими розрахунками обираємо бортовий коробчастий настил важкого типу з двома катковими пластинчатими ланцюгами на підшипниках ковзання.

За умовою невинесання вантажу висота бортів настилу:

$$h \geq 1.25a' \geq 1,25 \cdot 160 = 200\text{мм} \quad (2.2)$$

Ширина настилу обирається за формулою:

$$\begin{aligned} B_{\text{розр}} &= \sqrt{\frac{Q}{900v_{\text{розр}}\rho k_n} + \left(\frac{2h\psi}{k_n}\right)^2} - \frac{2h\psi}{k_n} = \\ &= \sqrt{\frac{300}{900 \cdot 0,4 \cdot 2,4 \cdot 0,26} + \left(\frac{2 \cdot 0,2 \cdot 0,7}{0,26}\right)^2} - \frac{2 \cdot 0,2 \cdot 0,7}{0,26} = 0,5\text{м} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Де $k_n = k_\beta \cdot \text{tg}(0,4 \cdot 40^\circ) = 0,26$;

$\psi = 0,7$ - коефіцієнт заповнення перерізу настилу за висотою бортів.

Ширина настилу з умови розміщення шматків за формулою:

$$B_{\text{розр}} \geq Xa' + 200 = 1,7 \cdot 160 + 200 = 472\text{мм} \quad (2.4)$$

Розглянувши стандартні ширини настилів обираємо найбільш підходяще значення ширини настилу $B=650\text{мм}$

Суттєве збільшення ширини полотна порівняно з розрахунковим потребує перерахунку швидкості за формулою

$$v = \frac{B_{\text{розр}}}{B} v_{\text{розр}} = \frac{0,5}{0,65} \cdot 0,4 = 0,3\text{м / с.} \quad (2.5)$$

Так як найближче найменше стандартне значення швидкості $v = 0,3\text{м / с}$ дало б зниження продуктивності по зрівнянню з розрахунковим значенням, остаточно обираємо: $B= 650\text{мм}$; $h=200\text{ мм}$; $v = 0,4\text{м / с}$ [2]

Лінійна маса вантажу що транспортується за формулою:

$$q = \frac{Q}{3,6v} = \frac{300}{3,6 \cdot 0,3} = 277 \text{ кг / м} \quad (2.6)$$

Лінійна маса рухомих частин конвеєра – за формулою:

$$q_0 = 60B + A = 60 \cdot 0,65 + 110 = 150 \text{ кг / м} \quad (2.7)$$

Де $A=110$ – коефіцієнт

Так як конструкторське опрацювання ходової частини конвеєра відсутнє, то коефіцієнт супротиву руху каткових ланцюгів з ребордами на підшипниках ковзання для тяжких умов роботи $\omega = 0,13$ приймаємо за таблицею стандартних значень [2], а коефіцієнт супротиву при обгинанні зірок K і відхиляючих шин λ – за таблицею стандартних значень.

Щоб виконати тяговий розрахунок траси конвеєра розділяємо на ділянки, навантаження супротив в яких постійний.

Точку мінімального натягу визначимо з умови:

$$\begin{aligned} q_0 g(L_2 + L_1) \cdot \omega &< q_0 gH \\ 150 \cdot 9,81 \cdot (40 + 30) \cdot 0,13 &< 150 \cdot 9,81 \cdot 10; \\ 133910 &< 14715 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Умова виконується, отже мінімальний натяг тягового елемента знаходиться в точці 2

Виконуємо тяговий розрахунок вздовж замкнутого контуру конвеєра

$$S_2 = S_{\min} = 2000 \text{ Н} \quad (2.9)$$

$$S_3 = \lambda_{2-3} \cdot S_2 = 1,02 \cdot 2000 = 2040 \quad (2.10)$$

$$S_4 = S_3 + q_0 g L_1 \omega = 2040 + 150 \cdot 9,81 \cdot 30 \cdot 0,13 = 7778 \text{ Н} \quad (2.11)$$

$$S_5 = K_{4-5} S_4 = 1,05 \cdot 7778 = 8166 \text{ Н} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} S_6 &= S_5 + (q + q_0) g L_1 \omega = \\ &= 8166 + (277 + 150) \cdot 9,81 \cdot 30 \cdot 0,13 = 24502 \text{ Н} \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$S_7 = \lambda_{6-7} S_6 = 1.02 \cdot 24502 = 24992 \text{ Н} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} S_8 &= S_7 + (q + q_0) g L_2 \omega + (q + q_0) g H = \\ &= 24992 + (277 + 150) \cdot 9,81 \cdot 40 \cdot 0,13 + (277 + 150) \cdot 9,81 \cdot 12 = \\ &= 97040 \text{ Н} \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} S_1 &= S_2 - q_0 g L_2 \omega + q_0 g H = \\ &= 2000 - 150 \cdot 9,81 \cdot 40 \cdot 0,13 + 150 \cdot 9,81 \cdot 12 = 12006 \text{ Н} \end{aligned} \quad (2.16)$$

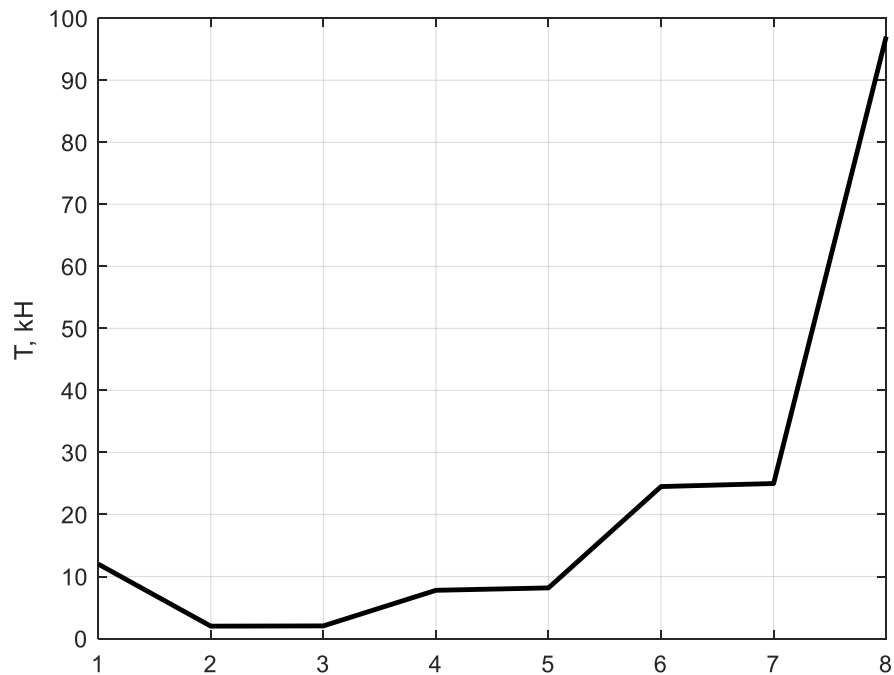


Рисунок 2.2 – Діаграма натягу

Тягове зусилля на привідних зірочках:

$$W_0 = S_8 - S_1 = 97040 - 12006 = 85034 \text{ Н} \quad (2.17)$$

Потужність двигуна:

$$P_{\text{дв}} = \frac{k_3 W_0 v}{1000 \eta_0} = \frac{1,15 \cdot 85034 \cdot 0,3}{1000 \cdot 0,9} = 32,6 \text{ кВт} \quad (2.18)$$

З отриманого значення вибираємо найбільш наближений за потужністю двигун АІР 4А250S8УЗ з потужністю 37кВт та частотою обертання $n_{дв}$ 740 об/хв.

Таблиця 2.1 – Технічні дані двигуна АІР 250 S8УЗ

Параметр	Значення
Потужність	37 кВт
Частота обертання статора	750 об/хв
Частота обертання валу	740 об/хв
Напруга живлення	380/660 В
Номінальний струм	78 А
ККД	0.9
Відношення моментів струму M_p/M_n	1,9
Відношення моменту сили M_{max}/M_n	2,0
Відношення струму I_p/I_n	6,6
Момент інерції	1,2 кг·м ²
Діаметр валу	75 мм

2.2 Розрахунок параметрів номінального режиму та схеми заміщення електродвигуна

Згідно з вхідними даними виконаємо розрахунок для двигуна 4А250S8УЗ, при з'єднанні обмоток статора у зірку. Вихідні дані для розрахунків параметрів асинхронного двигуна надано в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Паспортні дані асинхронного двигуна 4А250S8УЗ

Параметр	Значення
Номінальна потужність	$P_{2n} = 37 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380 \text{ В}$
Число полюсів	$p_n = 8$
Момент інерції	$J_d = 1.2 \text{ кг·м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 90 \%$
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0.79$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 1.6$
Номінальне ковзання	$s_n = 0.016$
Критичне ковзання	$s_k = 0.09$

Параметри для Г-подібної схеми	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\bar{x}'_1 = 0.11$
Опір статора	$\bar{R}'_1 = 0.017$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\bar{x}''_2 = 0.18$
Приведений опір ротора	$\bar{R}''_2 = 0.017$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\bar{x}_\mu = 2.8$

Розрахунок даних для номінального режиму двигуна

Розрахунок виконано у відповідності наданої в [2]

Кутова швидкість ротора асинхронного електродвигуна

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.19)$$

Відповідно ідеальна швидкість холостого ходу:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{8} = 39 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.20)$$

Номінальна швидкість для двигуна становить:

$$\omega_n = \omega_{xx} \cdot (1 - s_n) = 39 \cdot (1 - 0.016) = 38 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.21)$$

Розрахуємо номінальний момент для двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{37 \cdot 10^3}{38} = 973 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.22)$$

Розрахунок критичного моменту двигуна (за перевантажувальною здатністю λ з каталогу):

$$M_k = \lambda M_n = 1.6 \cdot 973 = 1556 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.23)$$

Значення для номінальної фазної напруги і струму статора:

$$U_{\text{н}} = \frac{U_{1\text{н}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}, \quad (2.24)$$

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{2\text{п}}}{3U_{\text{н}}\eta\cos\varphi} = \frac{37 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.9 \cdot 0.79} = 79 \text{ А}. \quad (2.25)$$

Розрахунок значення амплітуди фазної напруги та струму статора:

$$U_{\text{на}} = \sqrt{2}U_{\text{н}} = \sqrt{2} \cdot 220 = 310 \text{ В}, \quad (2.26)$$

$$I_{\text{на}} = \sqrt{2}I_{\text{н}} = \sqrt{2} \cdot 79 = 112 \text{ А}. \quad (2.27)$$

Величина амплітуди потокозчеплення статора для режиму холостого ходу при $R_1 = 0$ Ом становить:

$$\psi_{1\text{ХХ}} = \frac{U_{\text{на}}}{\omega_{0\text{п}}} = \frac{310}{314} = 0.99 \text{ Вб}. \quad (2.28)$$

Розрахунки параметрів для Т-подібної схеми

Математична модель асинхронного двигуна котра отримана, в попередньому розділі, для Т-подібної схеми заміщення, показаної на рисунку.2.3, тоді коли каталожні параметри відповідають Г-подібній схемі заміщення, рис.2.4. Щоб перерахувати параметри з Г-подібної схеми в Т-подібну використовують наступні методи.

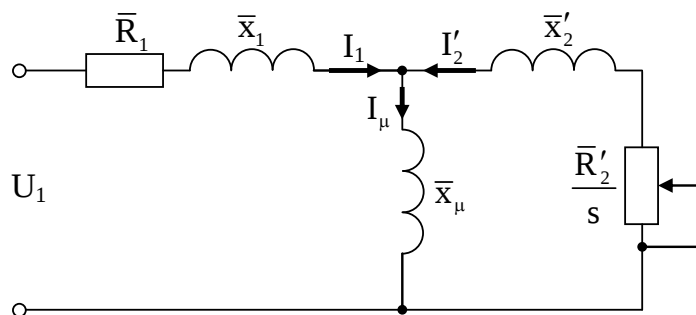


Рисунок 2.3 – Т-подібна схема для заміщення асинхронного двигуна

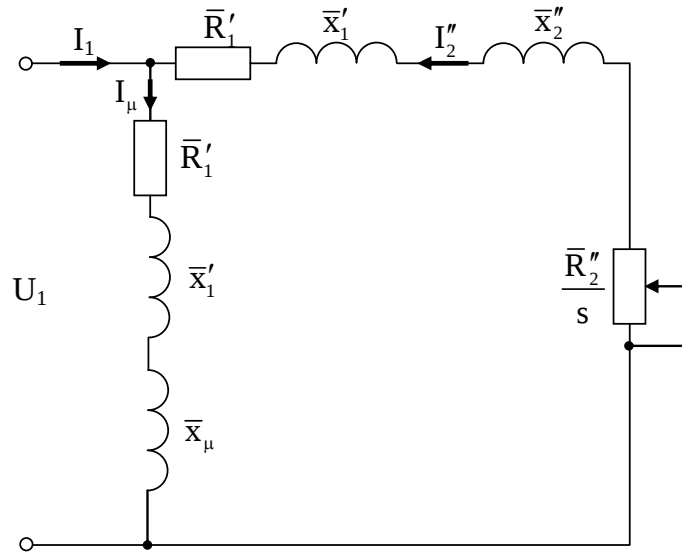


Рисунок 2.4 – Г-подібна схема для заміщення асинхронного двигуна

Коефіцієнти для перерахунків між Т та Г-подібною схемою заміщення

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}_1'\bar{x}_\mu}}{2\bar{x}_\mu} = \frac{2.8 + \sqrt{2.8^2 + 4 \cdot 0.11 \cdot 2.8}}{2 \cdot 2.8} = 1.04. \quad (2.29)$$

Розрахунок параметрів для Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях

$$\bar{x}_1 = \frac{\bar{x}_1'}{c_1} = \frac{0.11}{1.04} = 0.106, \quad (2.30)$$

$$\bar{x}_2' = \frac{\bar{x}_2''}{c_1^2} = \frac{0.18}{1.04^2} = 0.17, \quad (2.31)$$

$$\bar{R}_1 = \frac{\bar{R}_1'}{c_1} = \frac{0.017}{1.04} = 0.016, \quad (2.32)$$

$$\bar{R}_2' = \frac{\bar{R}_2''}{c_1^2} = \frac{0.017}{1.04^2} = 0.016. \quad (2.33)$$

Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях

$$x_1 = \bar{x}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.106 \cdot \frac{220}{79} = 0.3 \text{ Ом}, \quad (2.34)$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.016 \cdot \frac{220}{79} = 0.04 \text{ Ом}, \quad (2.35)$$

$$x_2 = \bar{x}_2' \frac{U_n}{I_n} = 0.17 \cdot \frac{220}{79} = 0.47 \text{ Ом}, \quad (2.36)$$

$$R_2 = \bar{R}_2' \frac{U_n}{I_n} = 0.015 \cdot \frac{220}{79} = 0.04 \text{ Ом}, \quad (2.37)$$

$$x_\mu = \bar{x}_\mu \frac{U_n}{I_n} = 2.8 \cdot \frac{220}{79} = 7.8 \text{ Ом}. \quad (2.38)$$

Знаходження індуктивності розсіювання в статорі і роторі:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{0.3}{314} = 0.93 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, \quad (2.39)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2'}{\omega_0} = \frac{0.47}{314} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (2.40)$$

Індуктивність для намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{7.8}{314} = 0.024 \text{ Гн}. \quad (2.41)$$

Індуктивності для статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.024 + 0.95 \cdot 10^{-3} = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}, \quad (2.42)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.024 + 1.4 \cdot 10^{-3} = 2.6 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}. \quad (2.43)$$

На основі отриманих розрахунків обчислюються значення параметри:

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.04}{0.025} = 1.6 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}, \quad (2.44)$$

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.04}{0.026} = 1.7 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}, \quad (2.45)$$

$$\sigma = L_1 \cdot \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} \right) = 0.024 \cdot \left(1 - \frac{0.024^2}{0.025 \cdot 0.026} \right) = 0.0023 \text{ Гн}, \quad (2.46)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.024}{0.026 \cdot 0.0023} = 405.2 \frac{1}{\text{Гн}}, \quad (2.47)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0.04}{0.0023} + 1.7 \cdot 0.024 \cdot 405.2 = 36.2 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}, \quad (2.48)$$

$$\mu_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot p_n = \frac{3}{2} \cdot \frac{0.024}{0.026} \cdot 8 = 4.7. \quad (2.49)$$

Розраховані параметри двигуна 4A250S8УЗ занесені до табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри двигуна 4A250S8УЗ

Параметр	Значення	Параметр	Значення
P_{2n}	37 кВт	R_1	0.4 Ом
ω_{XX}	39 рад/с	R_2	0.4 Ом
ω_H	38 рад/с	L_1	0.025 Гн
M_H	973 Н·м	L_2	0.026 Гн
M_k	1556 Н·м	L_m	0.024 Гн
λ	1.6	α_1	1.6 Ом/Гн
I_{Ha}, A	112	α	1.7 Ом/Гн
$\psi_{1XX}, \text{Вб}$	0.99	σ	0.0023 Гн
η	90 %	β	68.7 1/Гн
$\cos\varphi$	0.79	γ	405.2 Ом/Гн
J_d	1.2 кг·м ²	μ_1	4.7

Висновок до 2 розділу

На основі виконаного тягового розрахунку було побудовано діаграму натягу, та обрано асинхронний двигун для пластинчатого конвеєра. Виконано розрахунок параметрів двигуна відповідно до схеми заміщення.

Отримані результати дозволяють розробити математичну модель електромеханічної системи.

3 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ.

3.1 Розрахунок та вибір редуктора

Для підбору редуктора необхідно здійснити такі розрахунки:

$$\text{Кутова швидкість двигуна } \omega_{\text{дв}} = \frac{\pi n_{\text{дв}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 740}{30} = 77,5$$

$$\text{Номінальний момент } T_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega_{\text{дв}}} = \frac{37 \cdot 10^3}{77,5} = 477 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\text{Пусковий момент } T_{\text{дв.п.}} = T_{\text{дв}} \phi = 477 \cdot 1,2 = 572 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\text{Момент інерції ротора: } J_p = 1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Для з'єднання двигуна з редуктором обираємо МУВП-9 D-300 з максимальним моментом 1000 Н·м

Для настилу шириною 650 мм приймаємо крок пластинчатого ланцюга

$t_{\text{л}}=400\text{м}$ розрахунковий діаметр приводної зірочки з числом зубів $z=9$

Отримаємо:

$$D_0 = \frac{t_{\text{л}} z}{\pi} = \frac{0,4 \cdot 9}{3,14} = 1,15 \text{ м.} \quad (3.1)$$

Частота обертання валу приводних зірочок обирається за наступною формулою:

$$n_{\text{зірочки}} = \frac{60v}{zt_{\text{л}}} = \frac{60 \cdot 0,3}{9 \cdot 0,4} = 5 \quad (3.2)$$

Передавальне число між валом двигуна та валом приводних зірочок визначається за наступною формулою:

$$u_0 = \frac{n_{дв}}{n_{зир}} = \frac{740}{5} = 148 \quad (3.3)$$

Для отримання наближеного до потрібного нам передаточного числа обираємо 2 редуктора YILMAZ ET125 з передаточним числом 10 та 14.5 $u_\phi = 145$

Для наближення до дійсної швидкості руху настилу, в результаті отриманого передаточного числа приводу за формулою:

$$v_\phi = v \frac{u_0}{u_\phi} = 0.3 \cdot \frac{148}{145} = 0.306 \text{ м / с} \quad (3.4)$$

Далі знаходимо фактичну продуктивність:

$$Q_\phi = 900 B v_\phi \rho (B k_n + 4 h \psi) = 900 \cdot 0.65 \cdot 0.306 \cdot 2.4 \cdot (0.65 \cdot 0.26 + 4 \cdot 0.2 \cdot 0.7) = 313 \text{ т / год} \quad (3.5)$$

Для знаходження динамічного зусилля приведенного на ланцюг обираємо: $k_u = 1.5$; коефіцієнт участі в коливальному процесі переміщуваного вантажу при $\beta > 20^\circ, k' = 0.8$; коефіцієнт участі в коливальному процесі маси ходової частини конвеєра при $L_{ц} = 2(30 + 40) = 140 \text{ м}, k'' = 0.75$; Маса вантажу на конвеєрі $m_r = qL = 19390$, маса ходової частини конвеєра $m_k = 150 \cdot 140 = 21000 \text{ кг}$, коефіцієнт динамічності $k_d = 2.5$.

$$S_{дин} = k_u (k' m_r + k'' m_k) \cdot \frac{2\pi^2 v_\phi^2}{z^2 \cdot t_{ц}} \cdot k_d \quad (3.6)$$

$$1.5(0.8 \cdot 19390 + 0.75 \cdot 21000) \frac{2 \cdot 3.14^2 \cdot 0.308^2}{9^2 \cdot 0.4} \cdot 2.5 = 6768 \text{ Н}$$

Розрахункове навантаження на один ланцюг:

$$S_{\text{розр}} = \frac{(S_{\text{max}} + S_{\text{дин}})k_n}{z} = \frac{(97040 + 6768)1.2}{2} = 62284 \text{ Н} \quad (3.7)$$

Руйнівне навантаження ланцюга:

$$S_p = S_{\text{розр}} \cdot C_n = 62284 \cdot 9 = 560556 \quad (3.8)$$

Обираємо ланцюг М630 з руйнівним навантаженням 630 кН

Час пуску двигуна визначимо за формулою:

$$t_n = \frac{J_0 \omega_{\text{дв}}}{T_{\text{дв.п}} - T_{\text{ст.п}}} \quad (3.9)$$

Прикладений момент інерції поступально обертальних мас конвеєра,
вантажу та приводу :

$$J_0 = \frac{(q + 2q_0)LD_0^2}{4u_0^2\eta_0} + (1 + \psi)(J_p + J_m) = \quad (3.10)$$

$$J_0 = \frac{(277 + 2 \cdot 150)70 \cdot 1.15}{4 \cdot 148^2 \cdot 0.9} + (1 + 0.7)(1.2 + 0.6) = 3.6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Довжина конвеєра:

$$L = L_1 + \frac{L_2}{\cos \beta} = 30 + \frac{40}{0.93} = 73 \text{ м} \quad (3.11)$$

Статичний пусковий момент конвеєра:

$$T_{\text{ст.н}} = \frac{W_{\text{ст.н}} D_0}{2u_0 \eta_0} = \frac{155173 \cdot 1.15}{2 \cdot 148 \cdot 0.9} = 669 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.12)$$

$$W_{\text{ст.н}} = qgH + k_{\text{н.с}}(W_0 - qgH) = \quad (3.13)$$

$$= 277 \cdot 9.81 \cdot 12 + 1.5(85034 - 277 \cdot 12) = 155173 \text{ Н}$$

Гальмівний момент на валу двигуна:

$$T_m = [qgH - c_0(W_0 - qgH)] \frac{D_0 \eta_0}{2u_0} = [277 \cdot 9.81 \cdot 12 - 0.6 \cdot (85034 - 277 \cdot 9.81 \cdot 12)] \cdot \frac{1.15 \cdot 0.8}{2 \cdot 148} = 3.5 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (3.14)$$

3.2 Вибір перетворювача частоти та автоматичного вимикача

Частотний перетворювач – це електронний пристрій, котрий перетворює змінний струм з однієї частоти в змінний струм іншої частоти. Він використовується для управління швидкістю і крутним моментом асинхронних і синхронних електродвигунів, при зміні частоти та амплітуду напруги, котра подається на двигун. Отже, плавне регулювання частоти та амплітуди напруги, яка подається на статорні обмотки електродвигуна, дозволяє забезпечити плавне регулювання швидкості обертання валу.

.Перетворювач частоти обирається за характеристиками двигуна, а саме за струмом та потужністю:

Під наш двигун підійде частотний перетворювач фірми Schneider ATV212HD45N4

Таблиця 3.1– Параметри ПЧ ATV212HD45N4:

Номінальний струм	$I_n = 94 \text{ A}$
Номінальна потужність	$P_n = 45 \text{ кВт}$
Номінальна напруга	$U_n = 380 \text{ В}$
Метод керування	векторне

Перетворювач частоти (ПЧ) Schneider Electric ATV212HD45N4 — це потужний і надійний пристрій, призначений для керування трифазними

асинхронними двигунами. Основні характеристики цього перетворювача частоти включають:

Потужність: Підходить для двигунів потужністю до 45 кВт.

Номінальна напруга: Працює в діапазоні напруг 380-480 В.

Частотний діапазон: Може регулювати частоту в межах від 0,5 до 200 Гц, що забезпечує широкий діапазон швидкостей для двигуна.

Тип управління: Використовує векторне управління з відкритим контуром, що дозволяє точніше контролювати швидкість і момент двигуна.

Застосування: Ідеально підходить для застосувань в системах HVAC, насосних та компресорних установках, конвеєрах, а також для загальних промислових завдань.

Інтерфейси: Має різноманітні інтерфейси для підключення та комунікації, включаючи Modbus і BACnet, що дозволяє легко інтегрувати його в існуючі системи управління.

Захист і надійність: Обладнаний функціями захисту від перевантаження, короткого замикання, перегріву і перенапруги, що забезпечує надійну роботу в різних умовах.

Габарити та монтаж: Компактні розміри і можливість настінного монтажу роблять його зручним для використання в обмежених просторах.

Перетворювач частоти ATV212HD45N4 забезпечує високу ефективність та гнучкість в управлінні двигунами, що дозволяє знижувати енергоспоживання та оптимізувати роботу різних промислових систем.

Вибір автоматичного вимикача

Автоматичний вимикач має бути розрахований на струм, трохи більший ніж 94 А, щоб врахувати можливі короткочасні перевантаження і забезпечити безперебійну роботу системи. Автоматичний вимикач Schneider Electric ComPacT NSX160N повністю задовольнятиме потреби

Характеристики:

1. **Вимикальна здатність:** 50 кА при 415 В AC

2. **Кількість полюсів:** 3 (трифазний)
3. **Номінальний струм:** 100 А
4. **Тип розчеплювача:** МА (магнітний розчеплювач)
5. **Максимальна робоча напруга:** 415 В АС

Висновок до 3 розділу

Згідно з розрахунками обрано редуктор, отримано фактичну продуктивність конвеєра, та обрано відповідний частотний перетворювач і автоматичний вимикач для системи. Отримані результати дозволяють сформулювати математичну модель електромеханічної системи конвеєра.

4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ

4.1. Синтез регулятора швидкості

У даному розділі розглядаються методи математичного моделювання, синтезу та дослідження системи "частотний перетворювач – асинхронний двигун" (ПЧ-АД). Основна мета-розробити ефективний регулятор швидкості для забезпечення стабільної та надійної роботи електроприводу, з урахуванням всіх основних динамічних та статичних характеристик системи.

Процес моделювання починається зі створення математичної моделі асинхронного двигуна у просторі станів. Ця модель описує поведінку двигуна під впливом змінних напруги та частоти, що генеруються частотним перетворювачем.

Якщо магнітний ланцюг двигуна ненасичений, наприклад фазна симетричність тощо, найчастіше використовується еквівалентна двофазна модель двигуна за векторною формою. Але, найбільш спрощена модель може бути отримана, за лінеаризацією робочої ділянки механічних властивостей. У цьому випадку передавальна функція регульованого двигуна може бути надана аперіодичною ланкою:

$$W(p) = \frac{M_D}{\omega_0 - \omega} = \frac{\beta}{T_E \cdot p + 1}, \text{ де}$$

β - модуль жорсткості;

T_E - електромагнітна стала часу двигуна.

В даному випадку початковими координатами є моменти на валу двигуна, тобто двигун вважається джерелом моменту. Момент інерції двигуна варто віднести до передавального пристрою електроприводу, що дозволить зручне узгодження математичної моделі двигуна з технологічним об'єктом, насамперед для багатомасових електро-механічних систем.

При доповненні передаточної функції двигуна ланкою, котра пов'язує керуючий вплив (частоту) з різницею, і передаточною функцією механічної частини у вигляді одномасової схеми, тоді отримаємо структурну схему асинхронного двигуна. Додавши до цієї схеми передаточну функцію перетворювача частоти, яку можна надати у вигляді:

$$W_{пч}(p) = \frac{K_{пч}}{T_{\mu} \cdot p + 1}$$

То матимемо структурну схему об'єкта регулювання контуру швидкості, а саме (Рисунок 4.1)

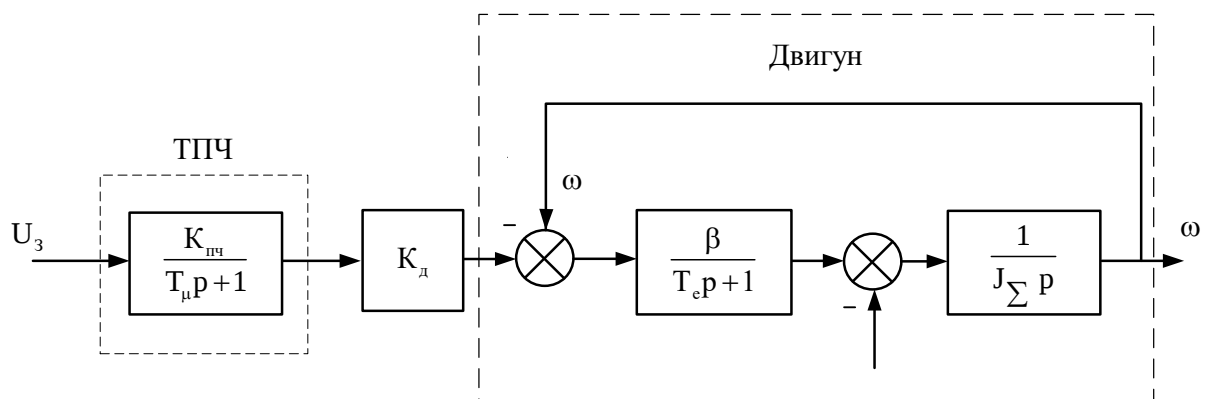


Рисунок 4.1 Структурна схема об'єкта регулювання

Розрахунок параметрів передатних функцій для структурної схеми.

Передатна функція перетворювача частоти:

$$W_{пч}(p) = \frac{K_{пч}}{T_{\mu} \cdot p + 1} = \frac{5}{0,01 \cdot p + 1}, \text{де}$$

$$K_{пч} = \frac{f_H}{U_3} = \frac{50}{10} = 5 - \text{коефіцієнт підсилення перетворювача частоти}$$

$$T_{\mu} = 0,01 - \text{постійна часу перетворювача частоти.}$$

Інші параметри схеми:

ω_0 - номінальна швидкість ідеального холостого ходу;

p – Кількість пар полюсів обмотки статора;

T_e -електромагнітна стала часу двигуна;

ω_H -номінальна швидкість двигуна;

M_H - номінальний момент двигуна;

β - модуль статичної жорсткості;

J_M - момент інерції механізму;

J_Σ -сумарний момент інерції;

T_M - Електромеханічна постійна двигуна;

M_c - Момент навантаження;

K_D - Коефіцієнт передачі двигуна.

Ці параметри можуть бути визначені наступними співвідношеннями, параметри ω_0 , ω_H та M_H розраховано в попередньому пункті :

Так як кількість обертів двигуна $n=750$ то к-ть пар полюсів буде $p=4$

$$T_e = \frac{1}{\omega_{0n} \cdot S_K} = \frac{1}{314 \cdot 0.09} = 0.035; \quad (4.1)$$

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_c - \omega_H} = \frac{973}{39 - 38} = 973 \text{ Нм} \cdot \text{с}; \quad (4.2)$$

$$T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta} = \frac{3.6}{973} = 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (4.3)$$

$$K_D = \frac{2 \cdot \pi}{p} = \frac{2 \cdot 3.14}{4} = 1.57 \quad (4.4)$$

Контур управління зі зворотним зв'язком за швидкістю використовуємо для отримання необхідних динамічних характеристик системи. Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю:

$$K_\omega = \frac{U_3}{1.3 \cdot \omega_H} = \frac{10}{1.3 \cdot 38} = 0.2 \text{ В} \cdot \text{с} \quad (4.5)$$

Отже, загальна структурна схема частотного регулювання (Рисунок 4.2) матиме такий вигляд:

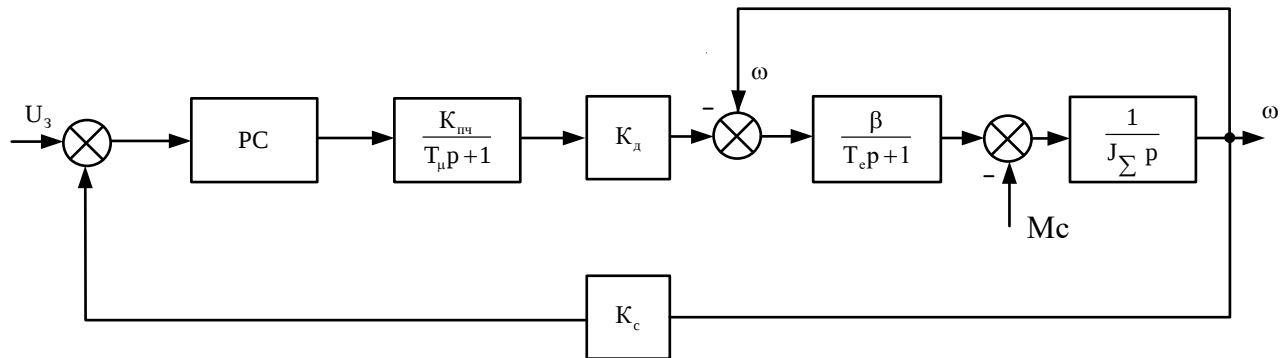


Рисунок 4.2 – Структурна схема частотного регулювання

Передавальна функція двигуна матиме вигляд :

$$\begin{aligned}
 W_D(p) &= \frac{\frac{\beta \cdot K_D}{J_\Sigma \cdot p \cdot (T_E \cdot p + 1)}}{1 + \frac{\beta}{J_\Sigma \cdot p \cdot (T_E \cdot p + 1)}} = \\
 &= \frac{\beta \cdot K_D}{J_\Sigma \cdot T_E \cdot p^2 + J_\Sigma \cdot p + \beta} = \\
 &= \frac{K_D}{T_M \cdot T_E \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1} = \\
 &= \frac{1.57}{0.0036 \cdot 0.035 \cdot p^2 + 0.0036 \cdot p + 1} = \\
 &= \frac{1.57}{0.126 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 3.6 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}.
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Структурна схема регулювання контуру швидкості (Рисунок 4.3) виглядає наступним чином :

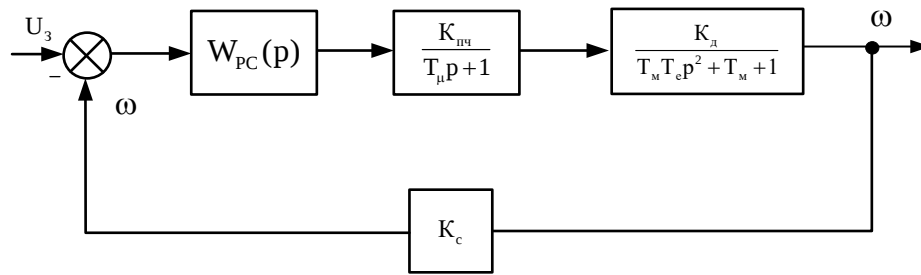


Рисунок 4.3- Структурна схема регулювання контуру швидкості

Розрахунок передавальної функції об'єкта регулювання за швидкістю матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
 W_{ОПШ}(p) &= \frac{K_{ПЧ} \cdot K_{Д}}{(T_{\mu} \cdot p + 1) \cdot (T_{М} \cdot T_{Е} \cdot p^2 + T_{М} \cdot p + 1)} = \\
 &= \frac{5 \cdot 1.57}{(0.01 \cdot p + 1) \cdot (3.6 \cdot 10^{-3} \cdot 0.035 \cdot p^2 + 3.6 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1)} = \quad (4.7) \\
 &= \frac{7.85}{(0.01 \cdot p + 1) \cdot (0.126 \cdot 10^{-3} p^2 + 3.6 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1)}.
 \end{aligned}$$

Регулятор швидкості будемо обираємо наступним методом. нехай передатна функція об'єкту регулювання буде представлена як:

$$W_{ОПШ}(p) = \frac{K_1 \cdot K_2 \dots K_n}{\prod_{i=1}^m (T_i \cdot p + 1)} \quad (4.8)$$

,де

T_i - буде постійною часу об'єкту регулювання.

Використаємо співвідношення:

$$X_i \cdot W_i \cdot \frac{1}{W_i} = X_i, \text{ де } i - \text{ передатна функція } i \text{ змінна } i\text{-тої ланки;}$$

Для компенсації постійної часу, виключаємо їх з розімкненого контуру регулювання. Таким чином можна прибрати з розімкненого контуру регулювання всі коефіцієнти $K_1 \cdot K_2 \dots K_n$, а для усунення статичної помилки введемо в нього інтегральний елемент з постійною часу.

Таким чином, вихідний розімкнений контур регулювання можна змінити бажаним контуром, котрі матимуть загальний коефіцієнт підсилення, що дорівнюватиме одиниці (зворотний зв'язок представляється одиничним). Однак він має первинний астатизм і забезпечує досить високу працездатність протягом невеликого періоду часу, який не компенсується.

$$W_{PA3C}(p) = W_{OPC}(p) \cdot W_{PC}(p) = \frac{1}{T_O p \cdot \prod_{i=1}^m (T_i p + 1)} \quad (4.9)$$

де i – буде числом постійних, скомпенсованих регулятором. Регулятор визначається за допомогою передавальної функції:

$$\begin{aligned} W_{PC}(p) &= \frac{W_{PA3C}(p)}{W_{OPC}(p)} = \frac{T_M \cdot T_E \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1}{T_U \cdot p} = \\ &= \frac{0.126 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 3.6 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}{0.01 \cdot p} \end{aligned} \quad (4.10)$$

де:

$$T_U = a_C \cdot K_\omega \cdot K_{ПЧ} \cdot K_D \cdot T_M = 2 \cdot 0.2 \cdot 5 \cdot 1.57 \cdot 3.6 \cdot 10^{-3} = 0.01 \text{ с} \quad (4.11)$$

a - коефіцієнт демпфування, дане значення відповідає оптимальному за швидкодією перехідному процесу.

Підставивши значення, отримаємо:

$$W_{PC}(p) = 0,0012 \cdot p + 0,036 + \frac{1}{0.01p}. \quad (4.12)$$

4.2 Математична модель асинхронного електродвигуна в двофазній системі координат a і b

Для моделювання систем керування АД використана математична модель, котра записана через вектори струму статора та потокозчеплення ротора в стаціонарній системі координат (a-b)

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta} &= \omega; \\
 M &= \mu_1 (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}), \\
 \dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - M_c) - v\omega, \\
 \dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta p_n \psi_{2b} \omega + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \\
 \dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta p_n \psi_{2a} \omega + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \\
 \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha \psi_{2a} - p_n \psi_{2b} \omega + \alpha L_m i_{1a}, \\
 \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha \psi_{2b} + p_n \psi_{2a} \omega + \alpha L_m i_{1b}.
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

де ω – кутова швидкість, J – момент інерції двигуна, M – момент двигуна, M_c – момент навантаження на валу двигуна, θ – кут повороту валу двигуна, v – коефіцієнт в'язкого тертя, ψ_{2a} , ψ_{2b} – компоненти вектора потокозчеплення ротора, i_{1a} , i_{1b} – компоненти вектора струму статора. Коефіцієнти, які враховують параметри двигуна, розраховуються наступним чином:

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \tag{4.14}$$

$$\beta = \frac{L_m^2}{L_2 \sigma}, \tag{4.15}$$

$$\mu_1 = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2}, \tag{4.16}$$

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2}, \tag{4.17}$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta, \quad (4.18)$$

Алгоритми векторного керування АД, як правило, проектуються та записуються в синхронній системі координат (d-q), котра обертається відносно стаціонарної системи координат з швидкістю ω_0 , що показано на рис.4.

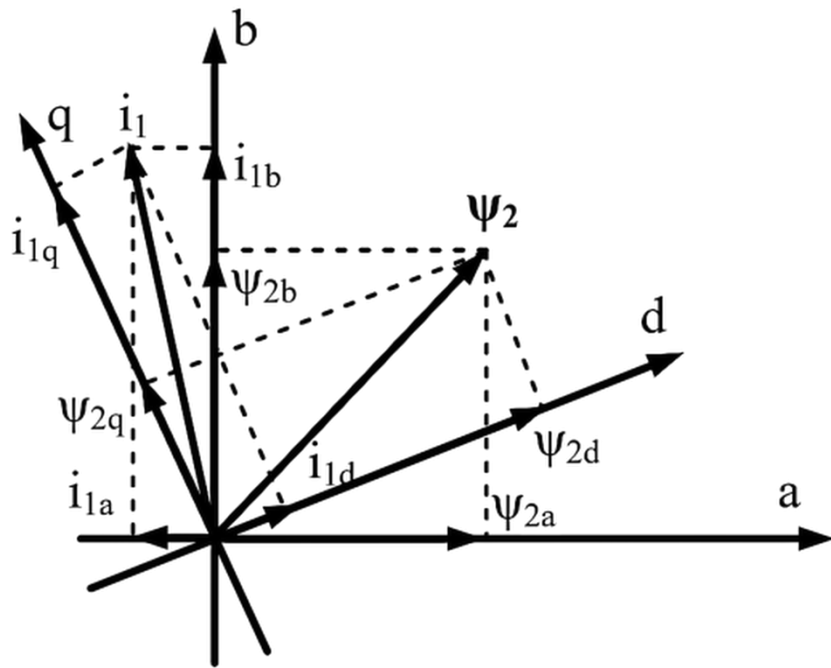


Рисунок 4.4 – Розташування векторів АД

Перетворення координат виконується наступним чином:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{dq} &= e^{-j\varepsilon_0} \mathbf{x}_{ab}, \\ \mathbf{x}_{ab} &= e^{j\varepsilon_0} \mathbf{x}_{dq}, \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$e^{-j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}; e^{j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}; \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

де $\mathbf{x}_{dq}$ та $\mathbf{x}_{ab}$ позначають двовимірний вектор напруги, потоку і струму статора, ε_0 – кутове положення системи координат (d-q) відносно стаціонарної (a-b), оператори $e^{-j\varepsilon_0}$ та $e^{j\varepsilon_0}$ забезпечують координатні перетворення векторів з системи координат, що обертається в стаціонарну.

Завдання обчислення кутової швидкості і заданої траєкторії з'єднання потоку будується наступним чином: Нехай для моделі АД заданої рівняннями (4.13), виконується наступне:

А.1. Струми статора та кутова швидкість ротора будуть доступними для вимірювання.

А.2. Параметри будуть АД відомими та постійними.

А.3. Момент навантаження M_C невідомий, постійний та обмежений.

А.4. Задані траєкторії кутової швидкості ω^* і потокозчеплення $\psi^* > 0$ є обмеженими функціями з обмеженими першою та другою похідними по часу.

В умовах цих припущень відбувається проектування алгоритмів прямого та непрямого векторного керування, які забезпечують наступні умови:

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

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0. \quad (4.20)$$

2) При умові обмеженості всіх внутрішніх змінних:

$\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ – похибка відпрацювання кутового положення,

$\tilde{\psi} = \psi - \psi^*$ – похибка відпрацювання потокозчеплення.

3) Асимптотичне орієнтування по вектору потокозчеплення ротора:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_d = 0. \quad (4.21)$$

4) Асимптотичну лінеаризацію підсистеми швидкості до лінійної повністю керованої форми.

5) Асимптотичну розв'язку процесів керування електромеханічними та електромагнітними координатами АД.

Синтез алгоритмів векторного керування виконується в два етапи: спершу синтезується підсистема керування потокозчепленням, а потім

підсистема керування швидкістю. Обидві підсистеми синтезуються з використанням зворотної покрокової процедури проектування.

4.3 Алгоритм прямого векторного керування

Повний алгоритм прямого векторного керування швидкістю АД з використанням замкненого спостерігача магнітного потоку пониженого порядку, структурна схема якого показана наведена у Додатку А, містить наступне:

1. Спостерігач магнітного потоку АД

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\psi}}_2 &= -\alpha |\hat{\psi}_2| + \alpha L_m i_d; \\ \dot{\hat{\omega}}_0 &= \omega_0 = \omega + \alpha L_m \frac{i_q}{|\hat{\psi}_2|}, \end{aligned} \quad (4.22)$$

де $|\hat{\psi}_2|$ – оцінене значення потокозчеплення ротора, ω_0 – синхронна швидкість поля.

2. Регулятор потоку

$$\begin{aligned} i_d^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_\psi \tilde{\psi} - x_\psi), \\ \dot{x}_\psi &= k_\psi \tilde{\psi}, \end{aligned} \quad (4.23)$$

де $\tilde{\psi} = |\hat{\psi}_2| - \psi^*$ – похибка відпрацювання оціненого значення потокозчеплення.

3. Регулятор струму по осі d

$$\begin{aligned} u_d &= \sigma (\gamma i_d^* - \omega_0 i_q - \alpha \beta |\hat{\psi}_2| + \dot{i}_d^* - k_i \tilde{i}_d - x_d), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_d, \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\dot{i}_d^* = \frac{1}{\alpha L_m} \left\{ \alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* - k_\psi \left[-(\alpha + k_\psi) \tilde{\psi} + \alpha L_m \tilde{i}_d - x_\psi \right] - \dot{x}_\psi \right\}, \quad (4.25)$$

де $\tilde{i}_d = i_d - i_d^*$ – похибка відпрацювання струму по осі d.

4. Регулятор швидкості

$$\begin{aligned} i_q^* &= \frac{1}{\mu\psi^*} \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + v\omega^* + \dot{\omega}^* \right), \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}. \end{aligned} \quad (4.26)$$

5. Модифікований регулятор струму по осі q

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma \left[\gamma i_q^* + \omega_0 i_d + \beta \omega \psi^* + \dot{i}_{q1}^* - k_{iq} \tilde{i}_q - \frac{1}{\psi^*} (\dot{\psi} \tilde{i}_q + \zeta) \right], \\ \dot{\zeta} &= k_{\eta i} (\psi^* \tilde{i}_q), \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$i_{q1}^* = \frac{1}{\mu\psi^*} \left[-k_\omega \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \mu\psi^* \tilde{i}_q \right) + \dot{\hat{M}}_c + v\dot{\omega}^* + \ddot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_q^*, \quad (4.28)$$

де $\tilde{i}_q = i_q - i_q^*$ – похибка відпрацювання струму по осі q.

Реальні напруги, що прикладають до обмоток статора, становлять:

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix}. \quad (4.29)$$

Структурна схема алгоритму системи прямого векторного керування приведена на рисунку 4.5

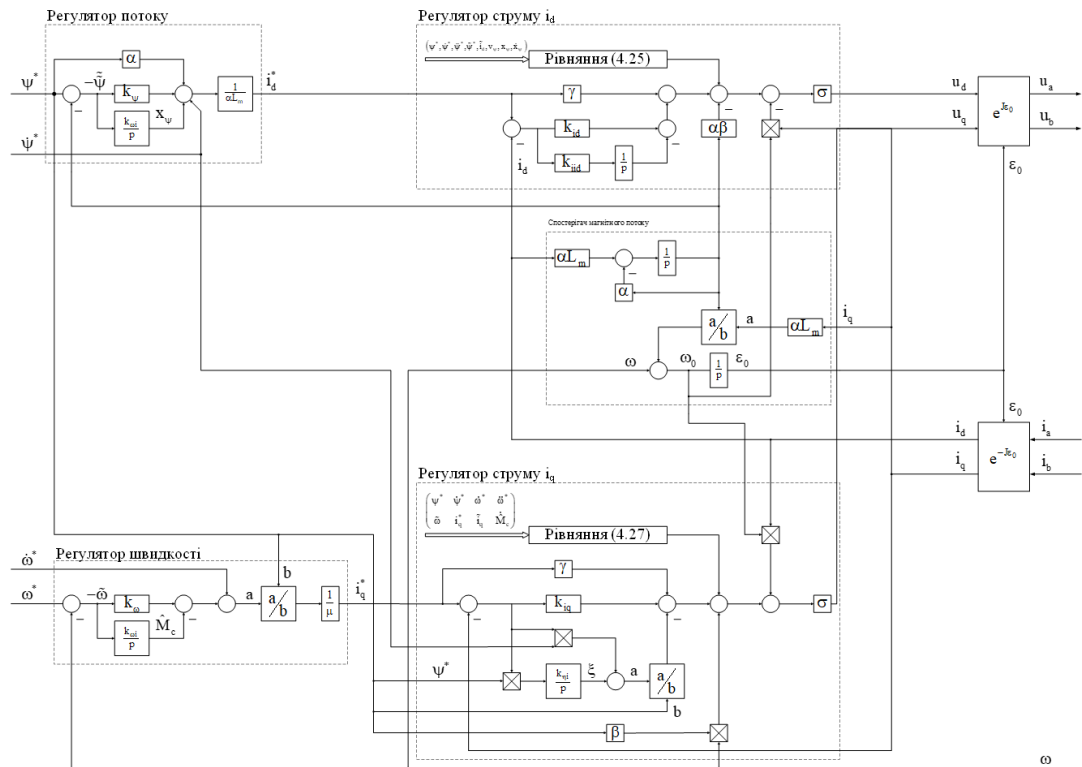


Рисунок 4.5 – структурна схема алгоритму системи прямого векторного керування

Висновок до 4 розділу

У даному розділі отримано математичну модель асинхронного електродвигуна в двофазній системі координат, алгоритм векторного керування, виконано синтез регулятора швидкості.

Отримані результати дозволяють розробити модель для дослідження динамічних та статичних характеристик системи з використанням пакету прикладних програм «Matlab Simulink».

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ТА СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КОНВЕЄРУ

5.1 Розробка моделі для дослідження перехідних процесів в межах пакету прикладних програм «Matlab Simulink»

Для підвищення ефективності та надійності конвеєрних систем було створено модель векторного прямого керування електроприводом (Direct Field-Oriented Control, DFOC) у середовищі MATLAB/Simulink. Ця модель дозволяє детально дослідити роботу системи керування, проаналізувати її динамічні характеристики та оптимізувати параметри для досягнення найкращої продуктивності.

Опис моделі

Модель векторного прямого керування електроприводом була створена з використанням блоків Simulink, що дозволяють імітувати роботу електродвигуна та системи керування в реальних умовах. Основні блоки моделі включають:

Блок вимірювання струмів статора:

Цей блок забезпечує вимірювання трифазних струмів статора електродвигуна. Дані струми є основою для подальших перетворень і обчислень у системі керування.

Перетворення Кларка і Паркера:

Перетворення Кларка: Виконує перетворення трифазних струмів (I_a , I_b , I_c) у двофазну систему (I_d , I_q).

Перетворення Паркера: Перетворює двофазні струми (I_a , I_b) у систему координат (I_d , I_q), орієнтовану відносно магнітного поля ротора.

Регулятори PI:

Використовуються для підтримання заданих значень струмів I_d і I_q , що відповідають за магнітне поле та момент двигуна відповідно. Ці регулятори дозволяють точно керувати динамікою електропривода.

Зворотне перетворення Паркера і Кларка:

Зворотне перетворення Паркера: Перетворює керуючі дії з d-q координат у α - β координати.

Зворотне перетворення Кларка: Перетворює результуючі дії з α - β координат назад у трифазну систему для подачі на двигун.

Інвертор:

Модель інвертора забезпечує перетворення постійного струму в змінний трифазний струм для живлення електродвигуна.

Модель двигуна:

Використовується для моделювання динаміки асинхронного або синхронного двигуна, враховуючи електричні та механічні характеристики.

Блок зворотного зв'язку:

Здійснює зворотний зв'язок по положенню ротора, швидкості та струмах, що дозволяє точно контролювати роботу системи.

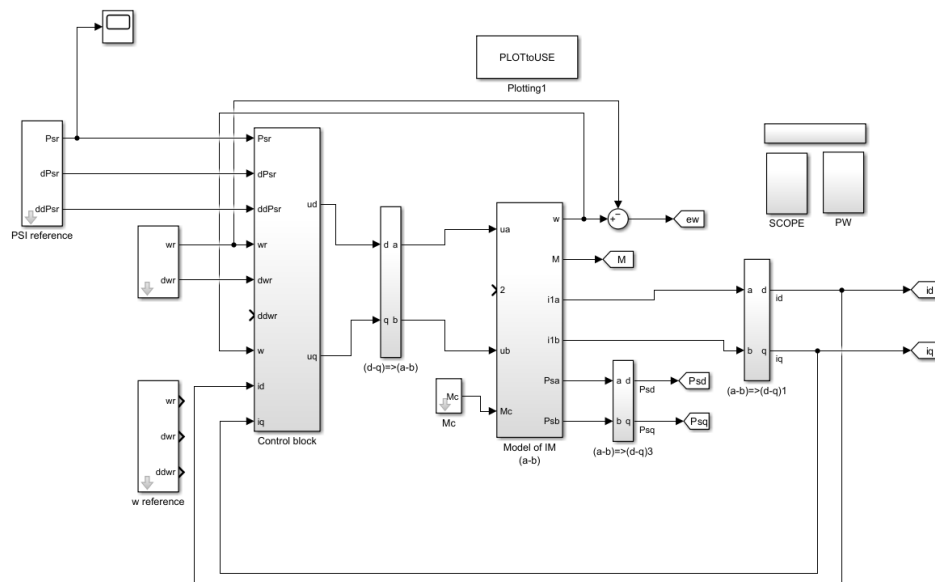


Рисунок 5.1 – модель прямого векторного керування в середовищі Simulink

Розроблена модель дозволяє виконувати детальний аналіз різних режимів роботи електропривода, включаючи:

Пускові режими.

Перехідні процеси при зміні навантаження.

Вплив параметрів регуляторів на стабільність і точність керування.

Модель також дає змогу оптимізувати параметри системи керування для досягнення найкращих експлуатаційних характеристик, таких як мінімізація втрат енергії та підвищення динамічної точності.

5.2 Опис моделі, окремих елементів

Блок керування є центральним компонентом системи векторного прямого керування (DFOC), який відповідає за обробку сигналів зворотного зв'язку та формування керуючих дій для електропривода. У цьому розділі ми розглянемо основні функції та підблоки, що складають блок керування.

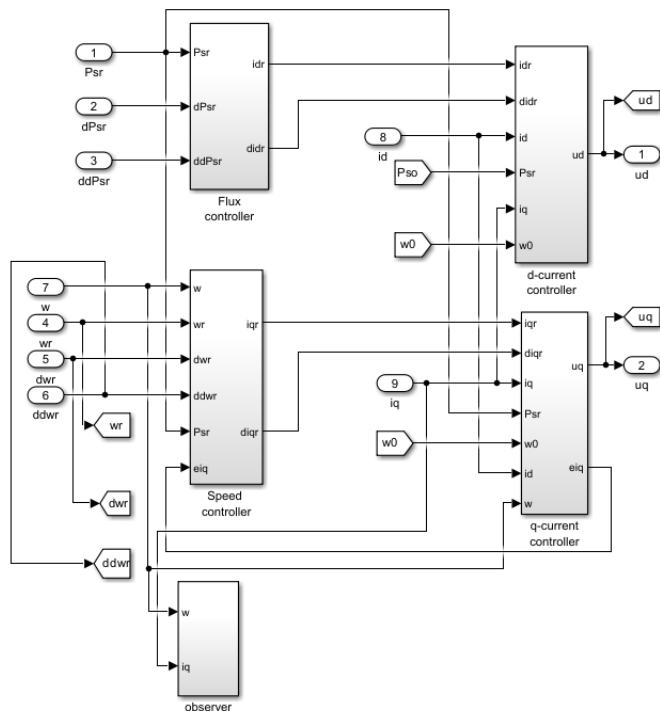


Рисунок 5.2 – Елементи блоку керування

Система включає чотири основні блоки: Flux Controller, d-current Controller, Speed Controller, q-current Controller та Observer. Нижче наведено детальний опис кожного з цих блоків.

1. Flux Controller (Контролер потокозчеплення)

- Вхідні сигнали: P_{sr} , dP_{sr} , ddP_{sr}

- **Вихідні сигнали:** $idr, didr, ddr$
- **Функції:**
 - Регулює потокозчеплення ротора.
 - Використовує вхідні сигнали $P_{sr}, dP_{sr}, ddP_{sr}$ для оцінки і корекції потокозчеплення.
 - Генерує сигнали $idr, didr, ddr$ для подальшого використання в інших контролерах.

2. d-Current Controller (Контролер d-струму)

- **Вхідні сигнали:** $idr, didr, ddr, id, P_{sr}, iq, \omega_0$
- **Вихідні сигнали:** ud
- **Функції:**
 - Регулює компонент струму id
 - Використовує вхідні сигнали для формування керуючого сигналу ud
 - Здійснює корекцію струму в осі d для забезпечення необхідного магнітного потоку.

3. Speed Controller (Контролер швидкості)

- **Вхідні сигнали:** $\omega, \omega_r, d\omega_r, dd\omega_r, P_{sr}, eiq$
- **Вихідні сигнали:** $iqr, diqr$
- **Функції:**
 - Регулює швидкість обертання ротора.
 - Використовує вхідні сигнали для оцінки поточної швидкості та її похідних.
 - Формує сигнали керування iqr та dqr для подальшого використання в контролері q-струму.

4. q-Current Controller (Контролер q-струму)

- **Вхідні сигнали:** i_{qr} , di_{qr} , i_q , P_{sr} , ω_0 , i_d , ω , e_{iq}
- **Вихідні сигнали:** u_q
- **Функції:**
 - Регулює компонент струму I_q , який відповідає за створення моменту двигуна.
 - Використовує вхідні сигнали для формування керуючого сигналу u_q
 - Забезпечує корекцію струму в осі q для точного контролю моменту двигуна.

5. Observer (Спостерігач)

- **Вхідні сигнали:** ω , i_q
- **Вихідні сигнали:** ω_r , $d\omega_r$, $dd\omega_r$
- **Функції:**
 - Оцінює параметри, які не можуть бути виміряні безпосередньо, такі як швидкість ротора ω та компонент струму i_q .
 - Використовує вхідні сигнали для формування оцінок швидкості ротора ω_r , його похідних $d\omega_r$ та $dd\omega_r$.

Взаємодія блоків

1. Flux Controller:

- Приймає сигнали P_{sr} , dP_{sr} та ddP_{sr} для регулювання потокозчеплення.
- Вихідні сигнали передаються до d-Current Controller для подальшої обробки.

2. d-Current Controller:

- Використовує вихідні сигнали з Flux Controller та інші вхідні сигнали для регулювання компонента струму
- Формує керуючий сигнал ud , який використовується для регулювання струму.

3. Speed Controller:

- Приймає сигнали ω , ω_r , $d\omega_r$, $dd\omega_r$ від Observer та сигнали P_{sr} та eiq для регулювання швидкості.
- Вихідні сигнали iqr та $diqr$ передаються до q-Current Controller.

4. q-Current Controller:

- Використовує вхідні сигнали для регулювання компонента струму I_q .
- Формує керуючий сигнал uq , який використовується для регулювання моменту двигуна.

5. Observer:

- Оцінює швидкість ротора та компонент струму на основі вхідних сигналів.
- Формує оцінки ω_r , $d\omega_r$, $dd\omega_r$ для використання в Speed Controller.

Ця структура дозволяє забезпечити високоточне керування електроприводом, що важливо для стабільної та ефективної роботи конвеєрних систем.

Блок "Model of IM" представляє математичну модель асинхронного двигуна (IM - Induction Motor). Ця модель використовується для симуляції поведінки двигуна в різних режимах роботи та включає в себе рівняння, що описують електричні і механічні процеси в двигуні. Опис цього блоку включає його структуру, вхідні та вихідні сигнали, а також основні функції та рівняння

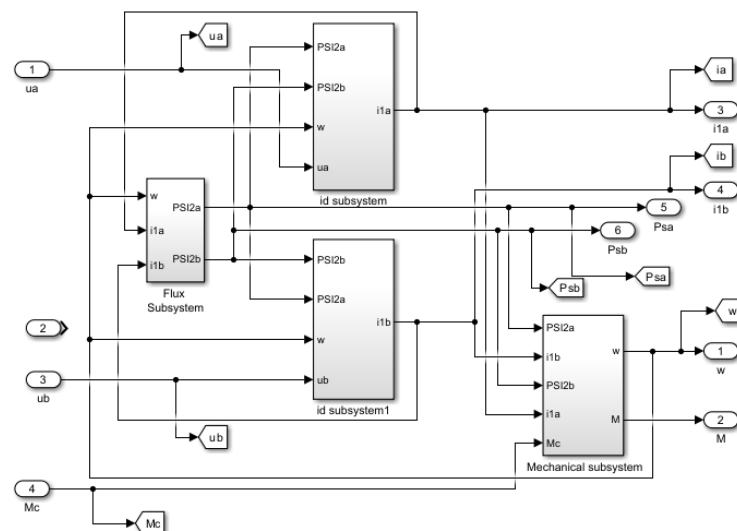


Рисунок 5.3 – Елементи блоку асинхронного двигуна

На зображенні представлена схема моделі асинхронного двигуна, яка включає три основні підсистеми: Flux Subsystem, id subsystem та Mechanical subsystem. Нижче наведено детальний опис кожної з цих підсистем і їхніх функцій.

1. Flux Subsystem (Підсистема потокозчеплення)

- **Вхідні сигнали:**

- ω : Швидкість обертання ротора.
- i_{1a}, i_{1b} : Струми фази а та b.
- : Напруги фази а та b.
- **Вихідні сигнали:**
 - ψ_{2a}, ψ_{2b} : Потокозчеплення на фазах а та b.
- **Функції:**
 - Обчислення потокозчеплення ротора на основі вхідних струмів та напруг.
 - Формування сигналів потокозчеплення для подальшої обробки в інших підсистемах.

2. id subsystem (Підсистема струмів d-компоненти)

- **Вхідні сигнали:**
 - u_a, u_b : Напруги фази а та b.
 - ω : Швидкість обертання ротора.
 - ψ_{2a}, ψ_{2b} : Потокозчеплення на фазах а та b.
- **Вихідні сигнали:**
 - i_{1a}, i_{1b} : Струми фази а та b.
 - i_a, i_b : Струми статора на фазах а та b.
- **Функції:**
 - Обчислення струмів статора на основі вхідних напруг та потокозчеплення.
 - Формування сигналів струмів для подальшої обробки.

3. Mechanical subsystem (Механічна підсистема)

- **Вхідні сигнали:**
 - ω : Швидкість обертання ротора.
 - i_{1a}, i_{1b} : Струми фази а та b.
 - ψ_{2a}, ψ_{2b} : Потокозчеплення на фазах а та b.

- M_c : Навантажувальний момент.
- **Вихідні сигнали:**
 - ω : Швидкість обертання ротора.
 - M_c Електромагнітний момент.
- **Функції:**
 - Обчислення електромагнітного моменту на основі вхідних струмів та потокозчеплення.
 - Моделювання динаміки ротора під впливом навантажувального моменту.
 - Формування вихідних сигналів швидкості та моменту для зворотного зв'язку.

Взаємодія між підсистемами

1. Flux Subsystem:

- Приймає вхідні сигнали швидкості та струмів фази, а також напруги фази.
- Обчислює потокозчеплення та передає його в підсистеми *id subsystem* та *Mechanical subsystem*.

2. id subsystem:

- Використовує напруги фази, швидкість обертання та потокозчеплення для обчислення струмів статора.
- Формує вихідні сигнали струмів, які можуть бути використані для зворотного зв'язку або контролю.

3. Mechanical subsystem:

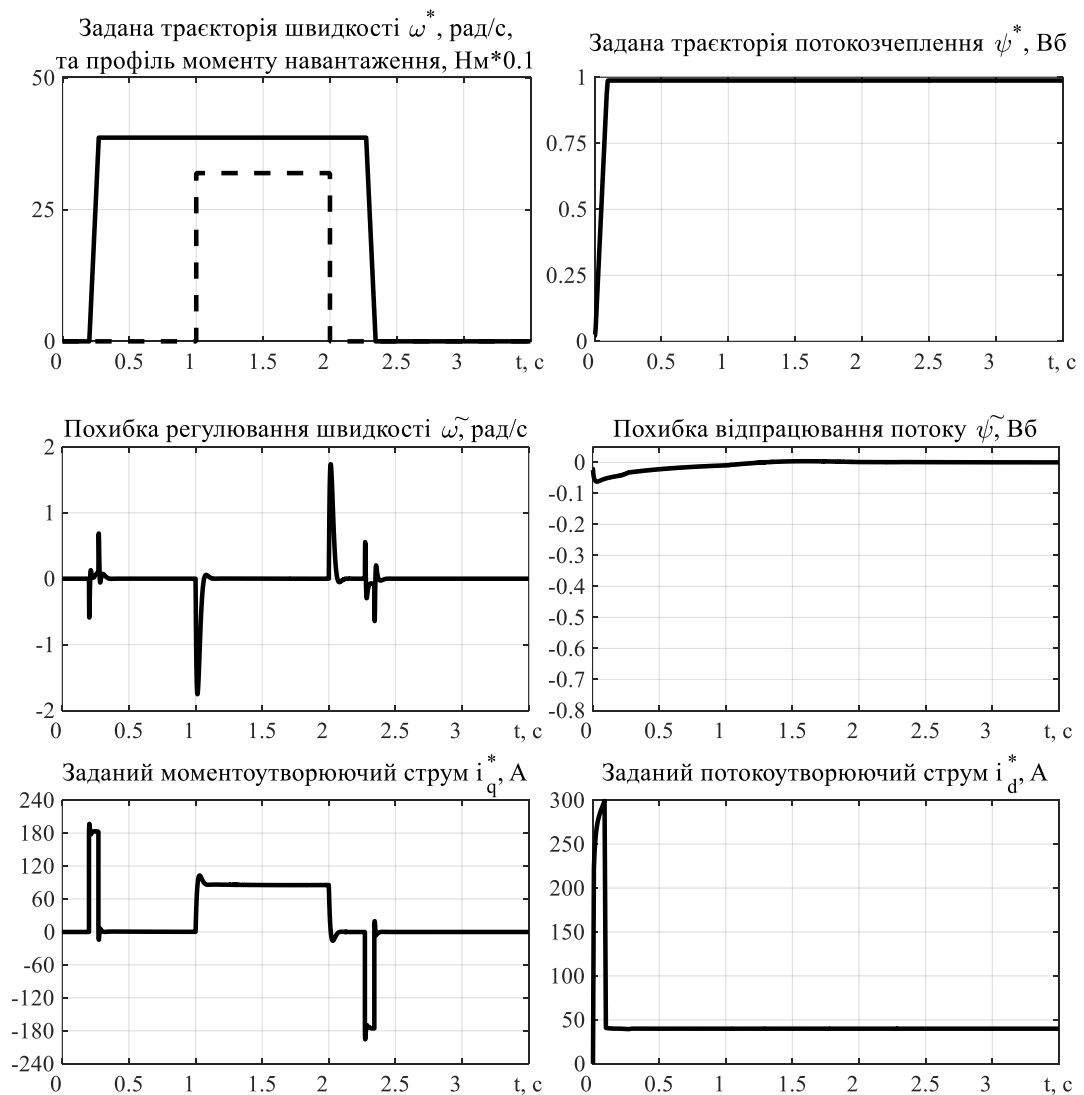
- Використовує струми фази, потокозчеплення та навантажувальний момент для обчислення електромагнітного моменту.
- Моделює механічну поведінку ротора та формує вихідні сигнали швидкості та моменту.

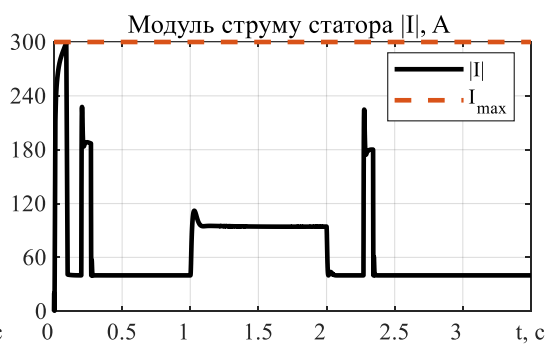
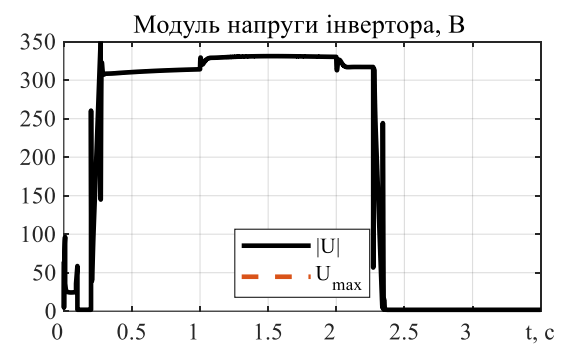
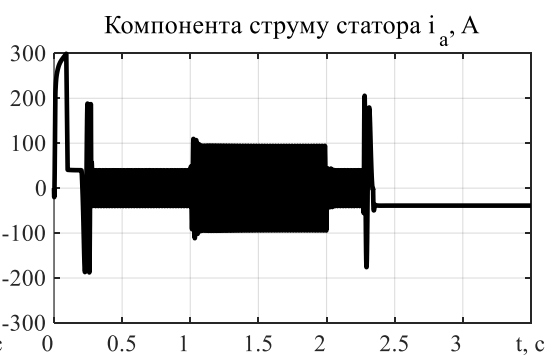
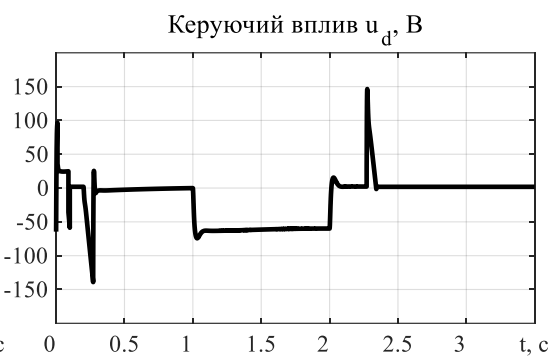
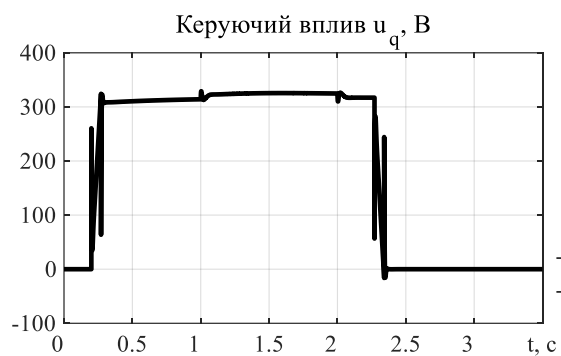
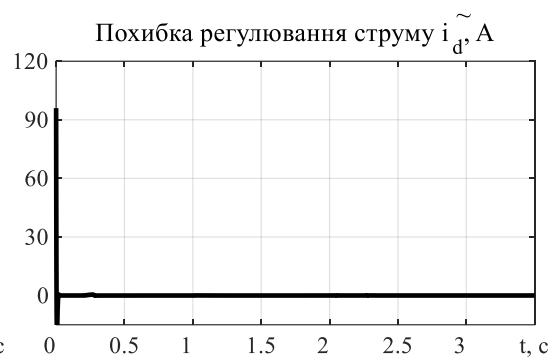
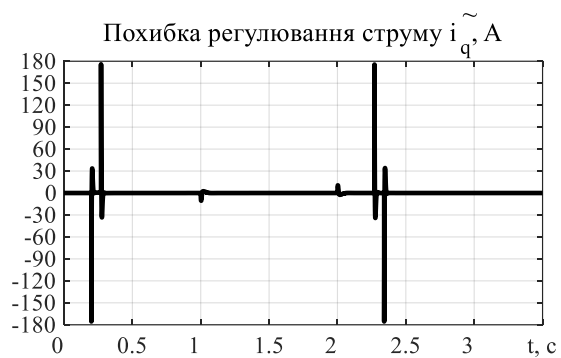
Ця модель дозволяє детально симулювати роботу асинхронного двигуна, включаючи електричні та механічні аспекти, що є важливим для розробки і налаштування системи керування.

5.3 Методика проведення досліджень перехідних процесів.

Проводиться дослідження для величин статичного моменту $M_{\text{стат}} = M_{\text{стат.ном.}}$, $M_{\text{стат}} = 0.6M_{\text{стат.ном.}}$, $M_{\text{стат.}} = 0.3M_{\text{стат.ном.}}$, при варіаціях швидкості руху $\omega = \omega_{\text{ном.}}$, $\omega = 0.8$, $\omega = 0.5$, $\omega = 0.3$. Виконується аналіз характеру розподілу активної потужності « P_a », реактивної потужності « P_r », механічної потужності « P_m » втрат активної потужності « ΔP », та характер зміни струму I .

Результати досліджень наведені на рисунках 5.6-5.19 і таблиці 5.11





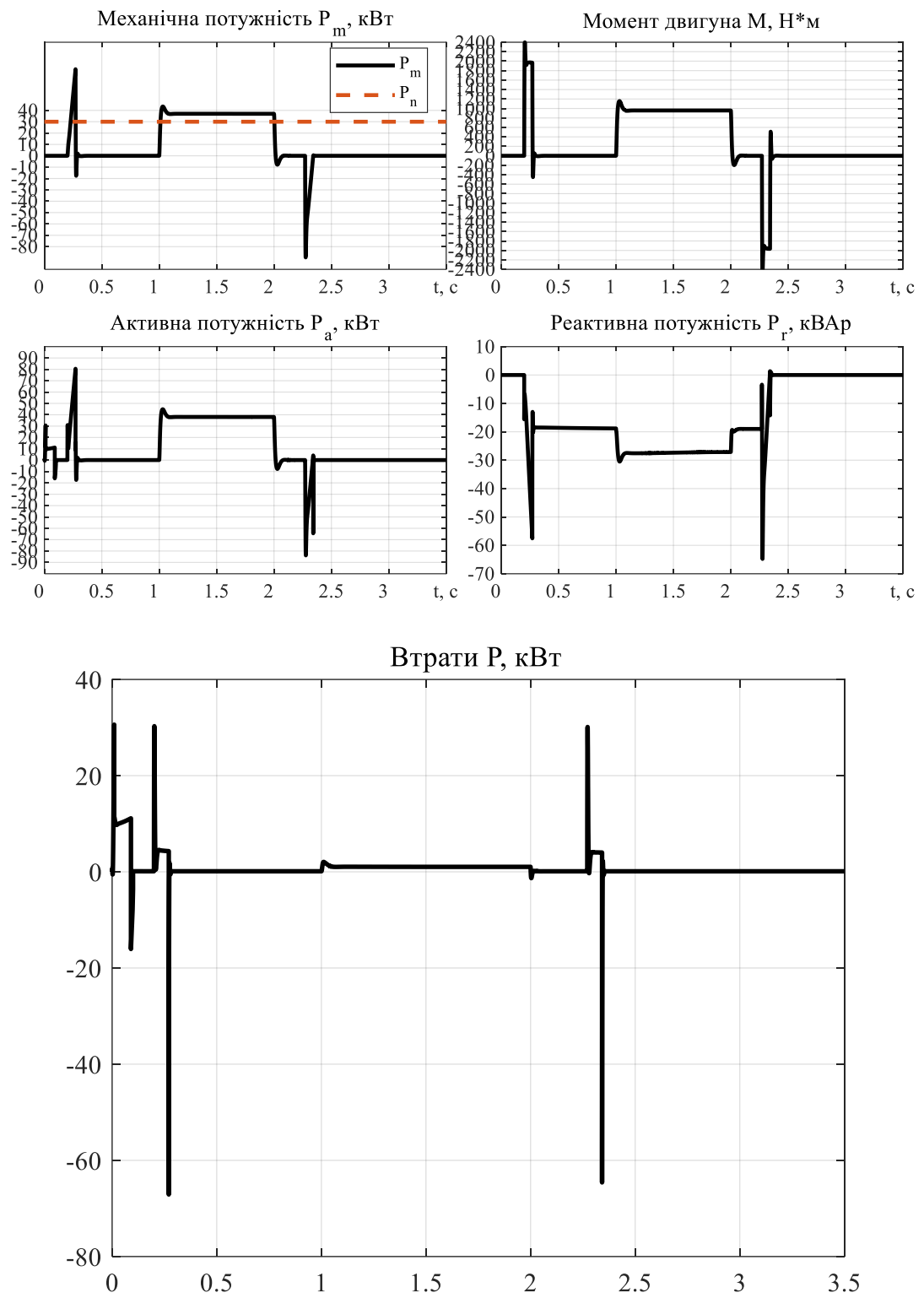
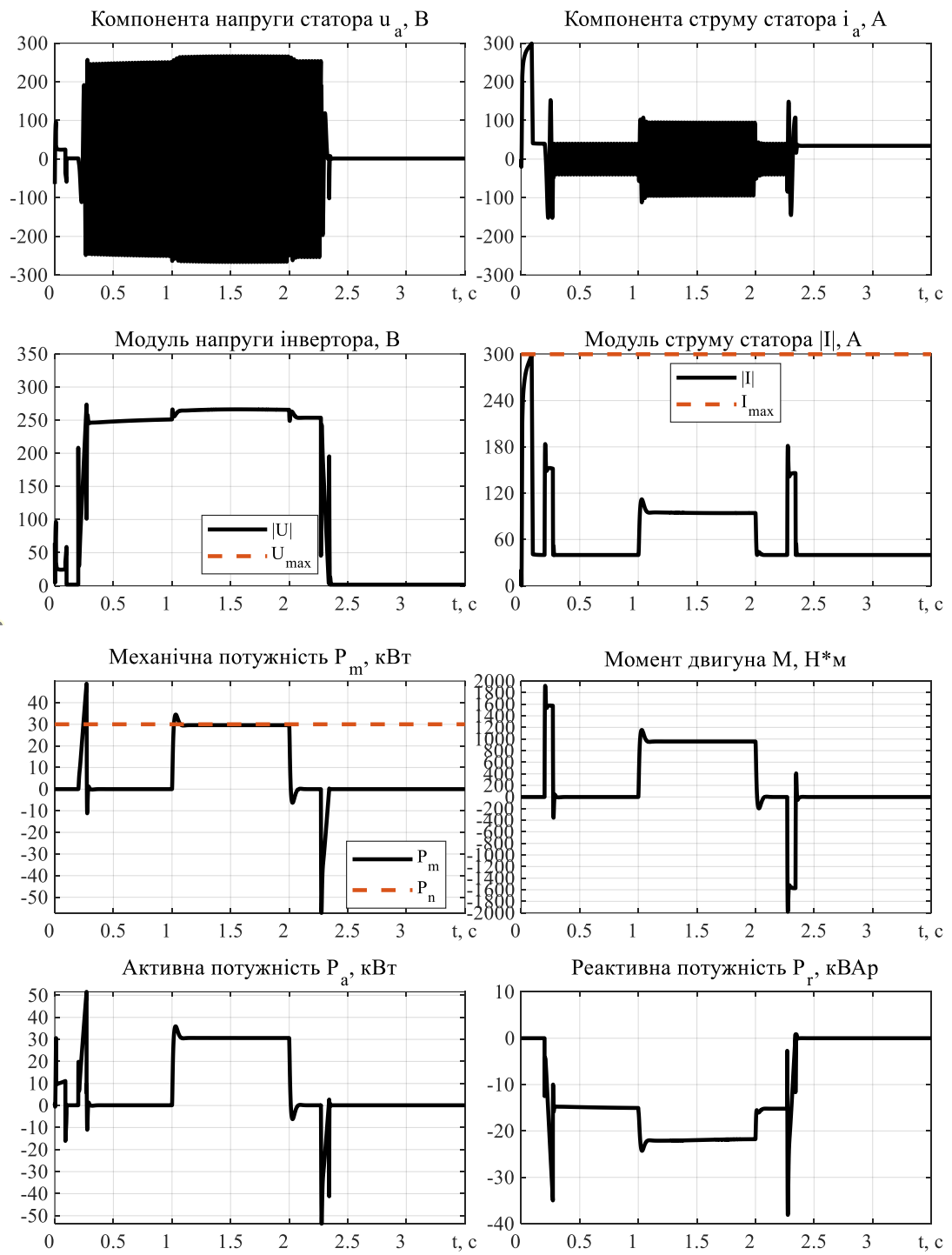


Рисунок 5.6 – Графіки перехідних характеристик при значенні
 $M_{\text{статична}}, \omega_{\text{статична}}$

Надалі надаються перехідні процеси для характеристик P_m , P_a , P_r , ΔP , ω , M , I , повні перехідні процеси надано в додатку.



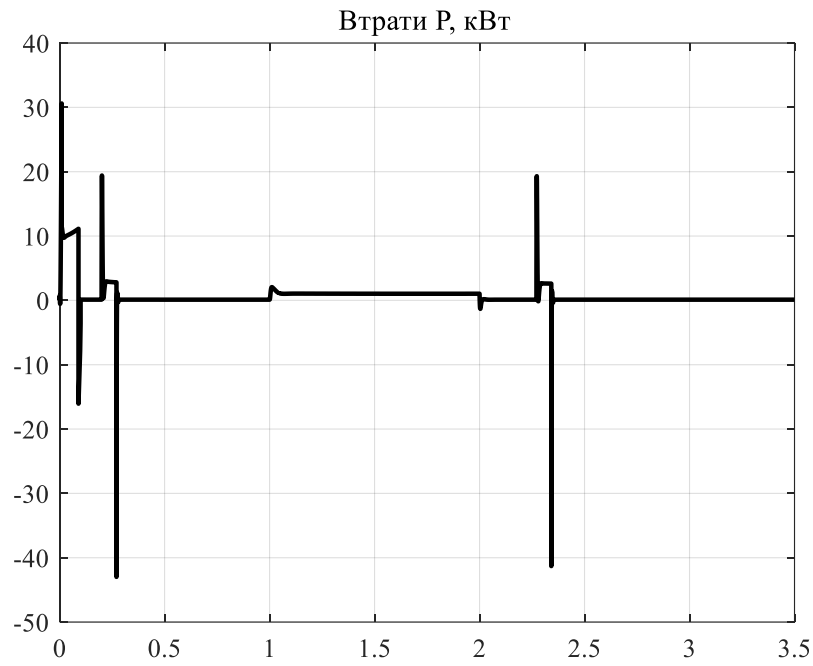
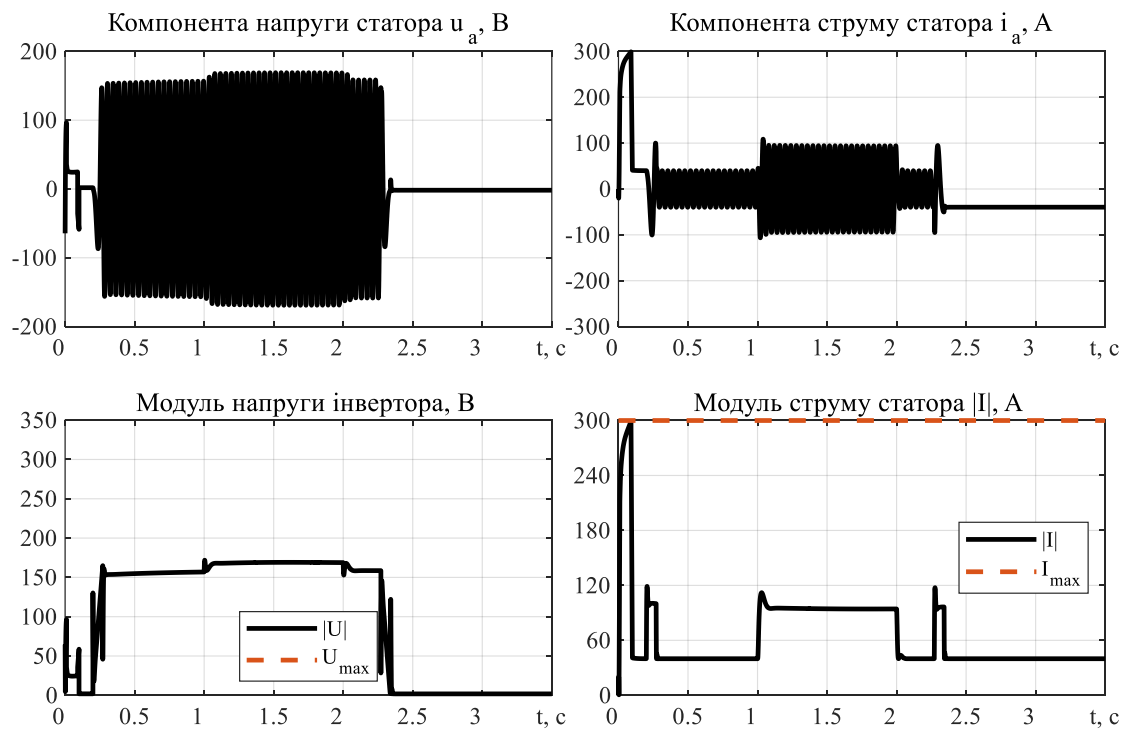


Рисунок 5.7 – Графіки перехідних характеристик при значенні
 $M_{\text{статична}}, \omega = 0.8$



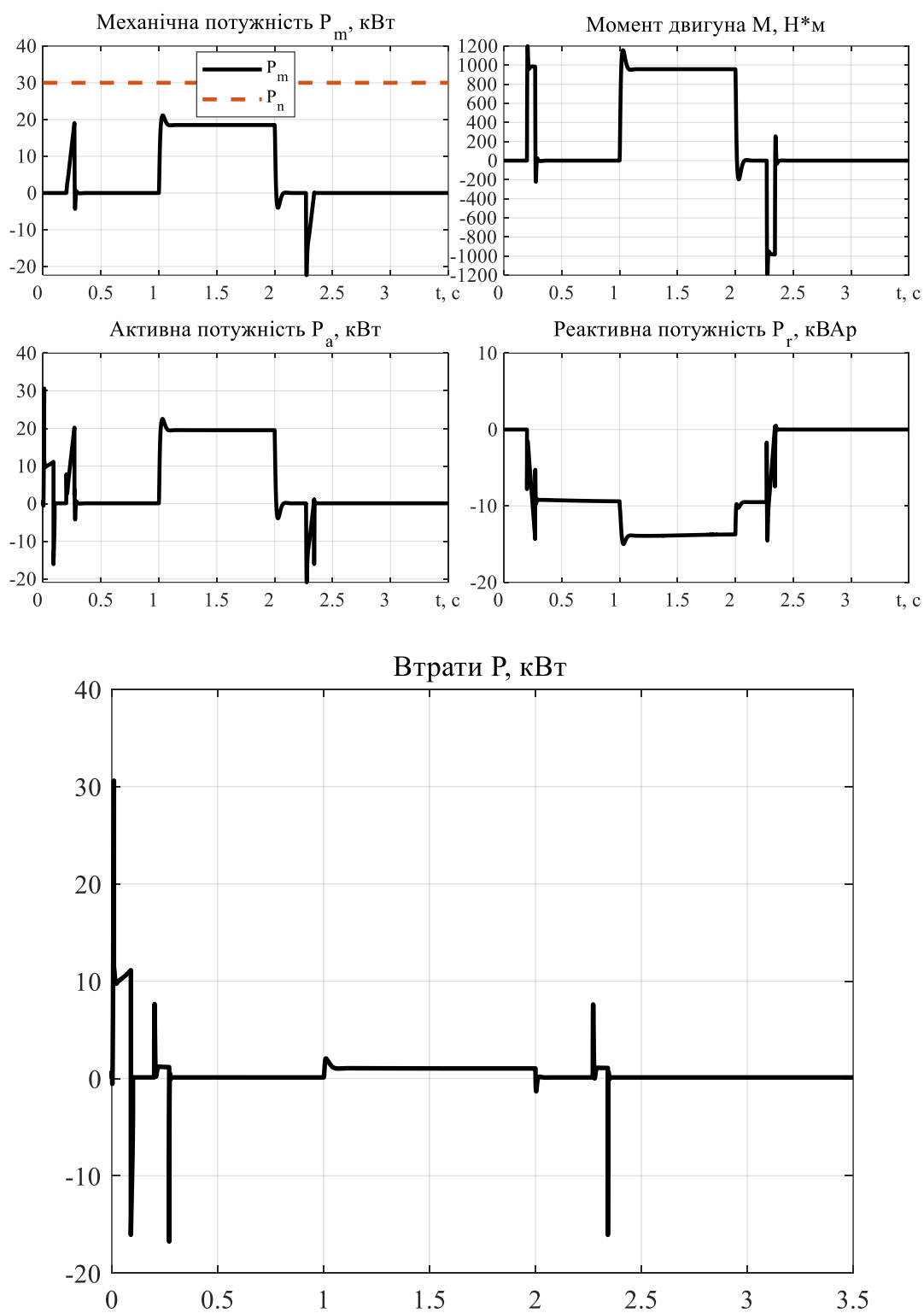
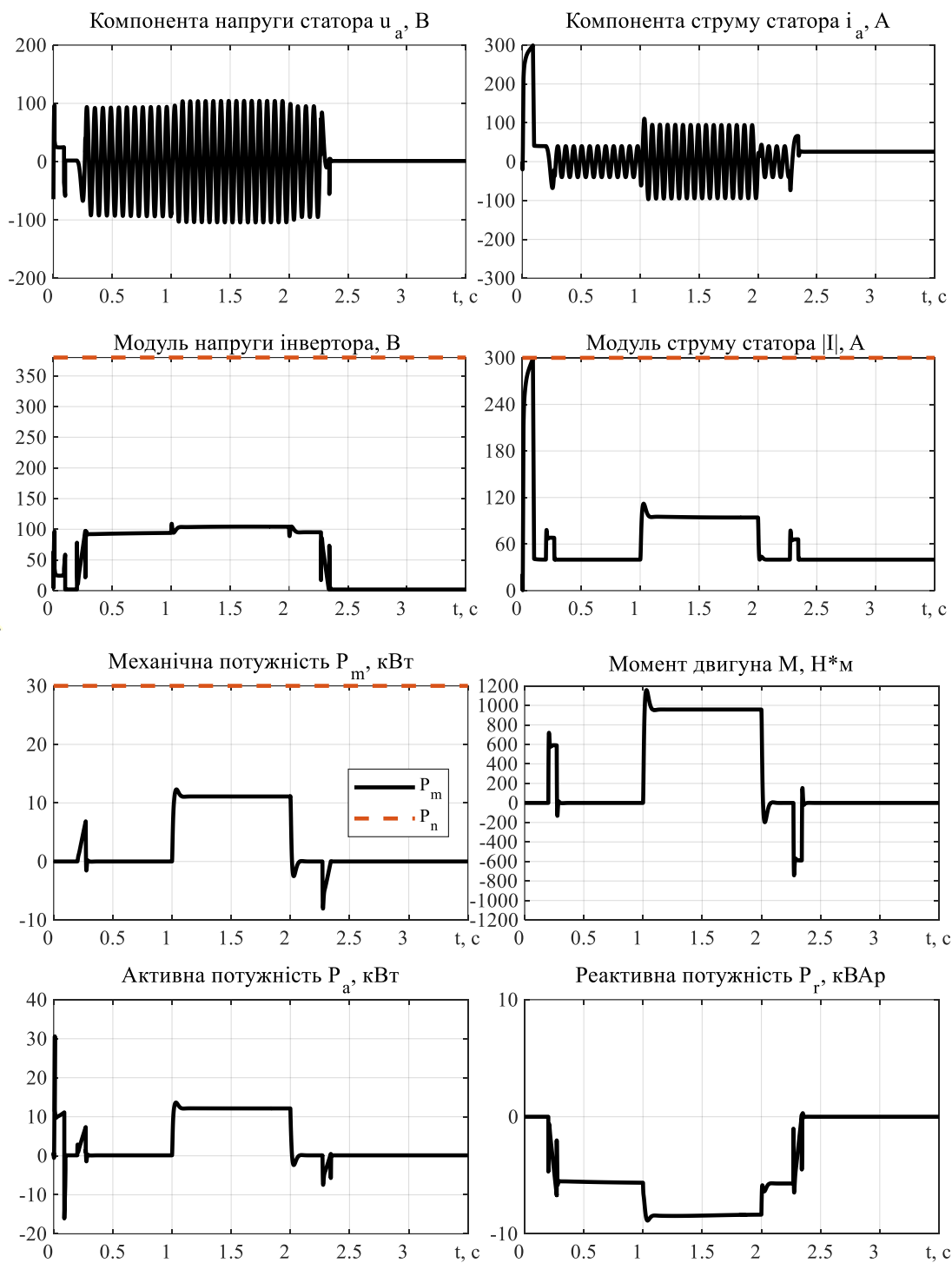


Рисунок 5.8 – Графіки перехідних характеристик при значенні
 $M_{\text{статична}}, \omega = 0.5$



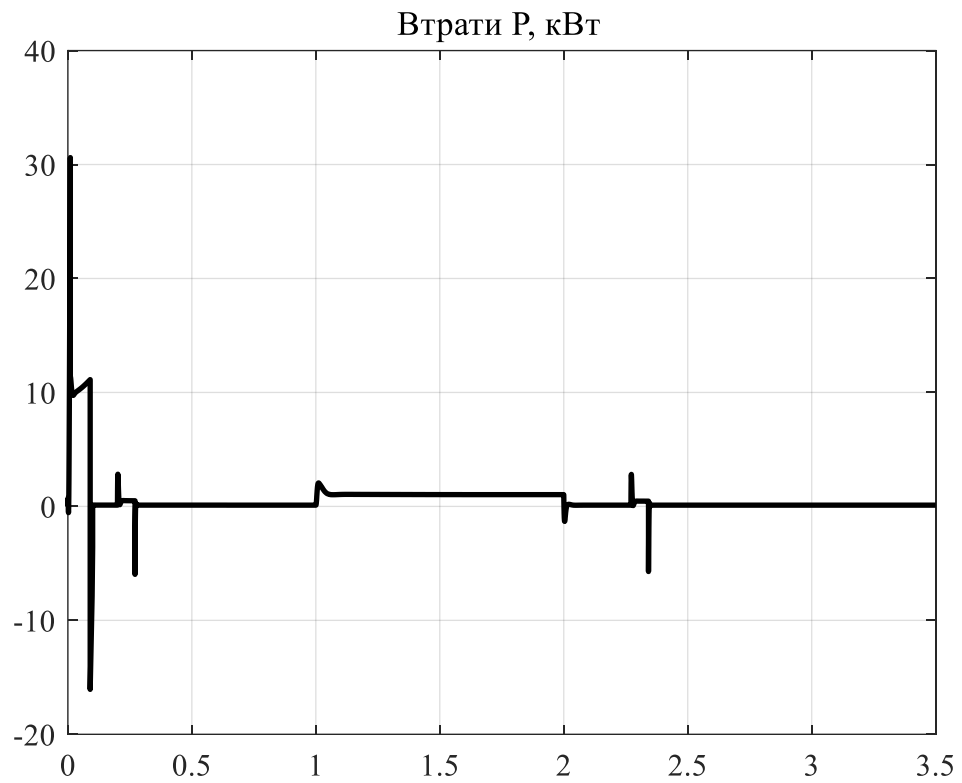
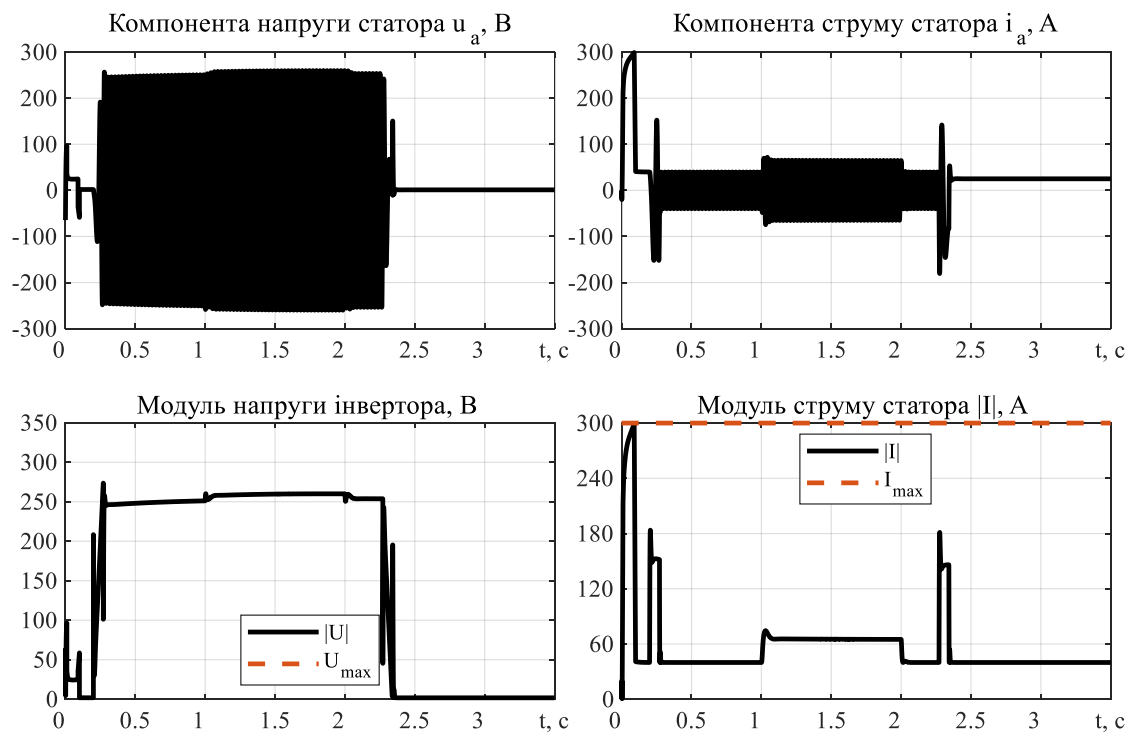


Рисунок 5.9 – Графіки перехідних характеристик при значенні
 $M_{\text{статична}}, \omega = 0.3$



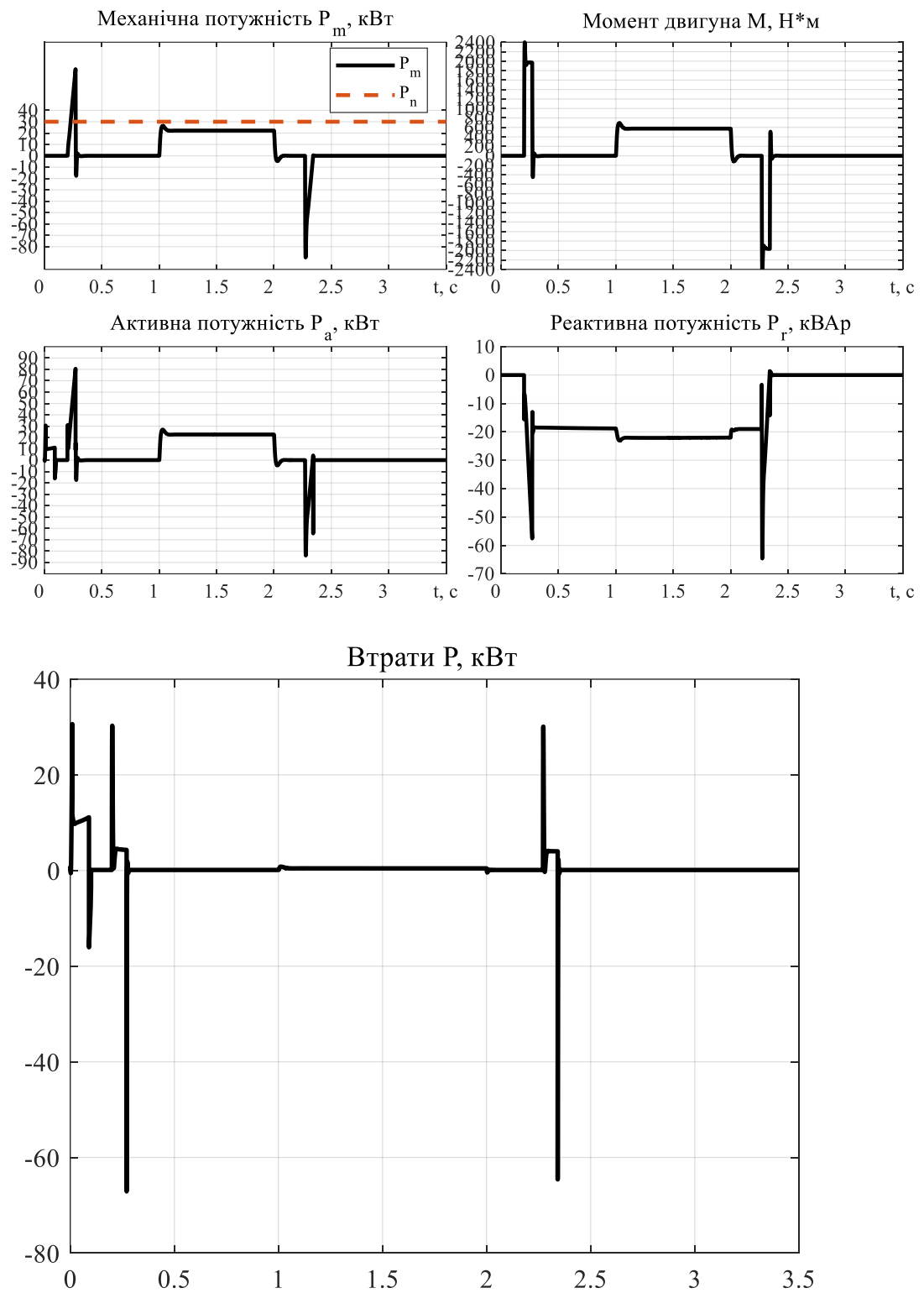
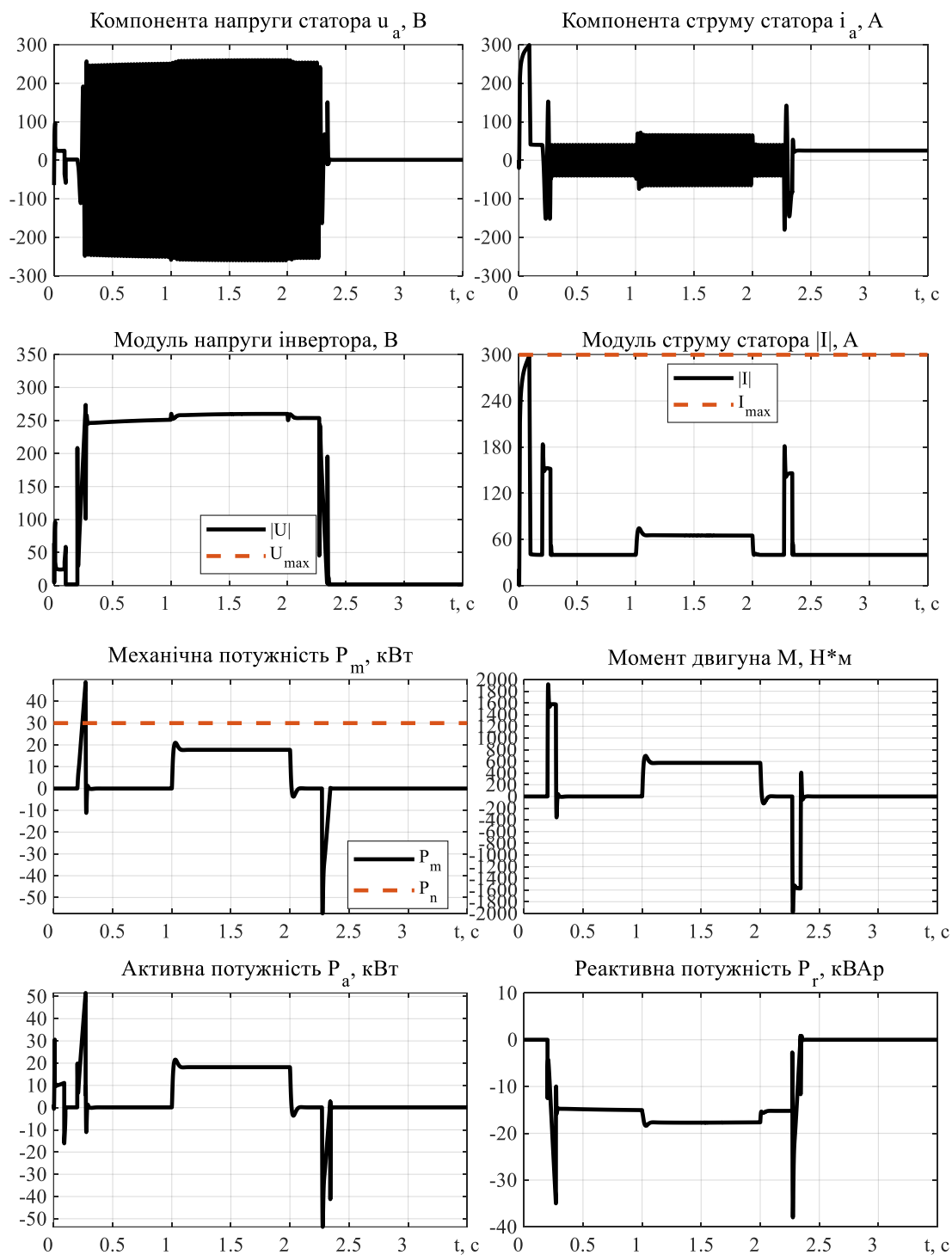


Рисунок 5.10 – Графіки перехідних характеристик при значенні

$$M_{\text{статична}} = 0.6, \omega = 1$$



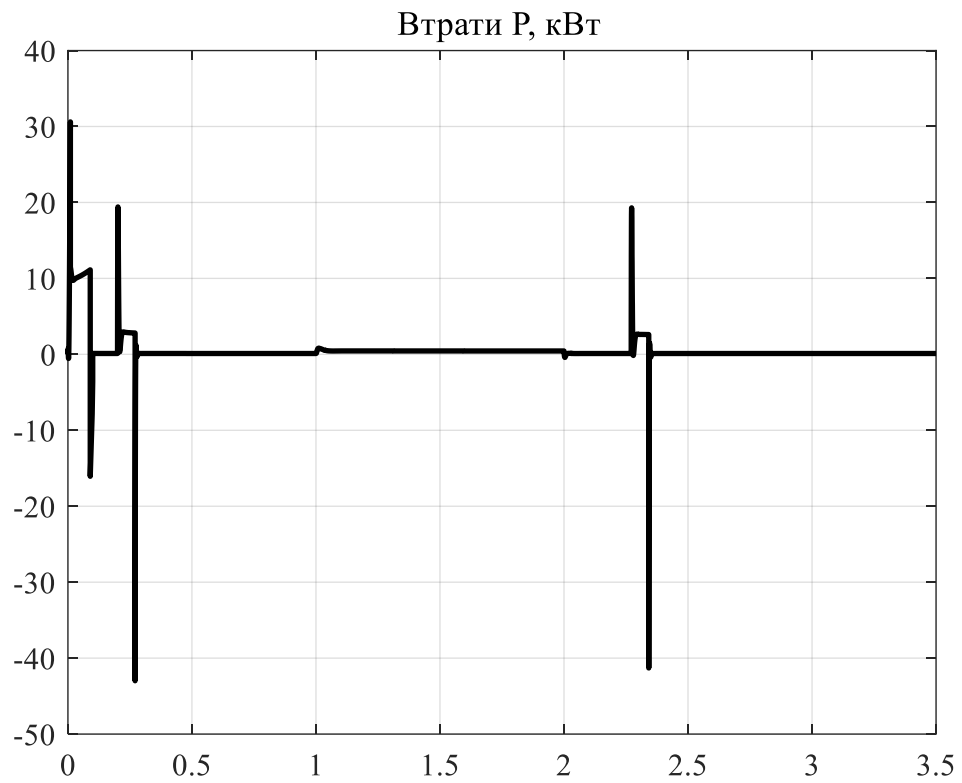
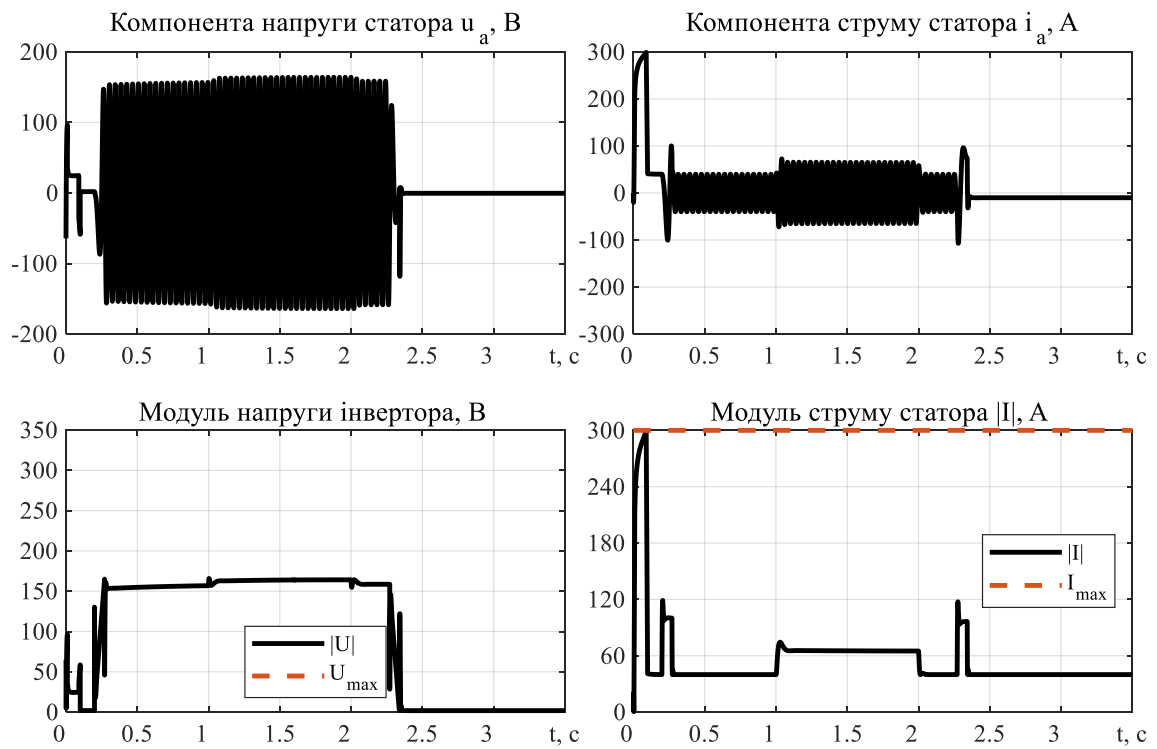


Рисунок 5.11 – Графіки перехідних характеристик при значенні
 $M_{\text{статична}} = 0.6, \omega = 0.8$



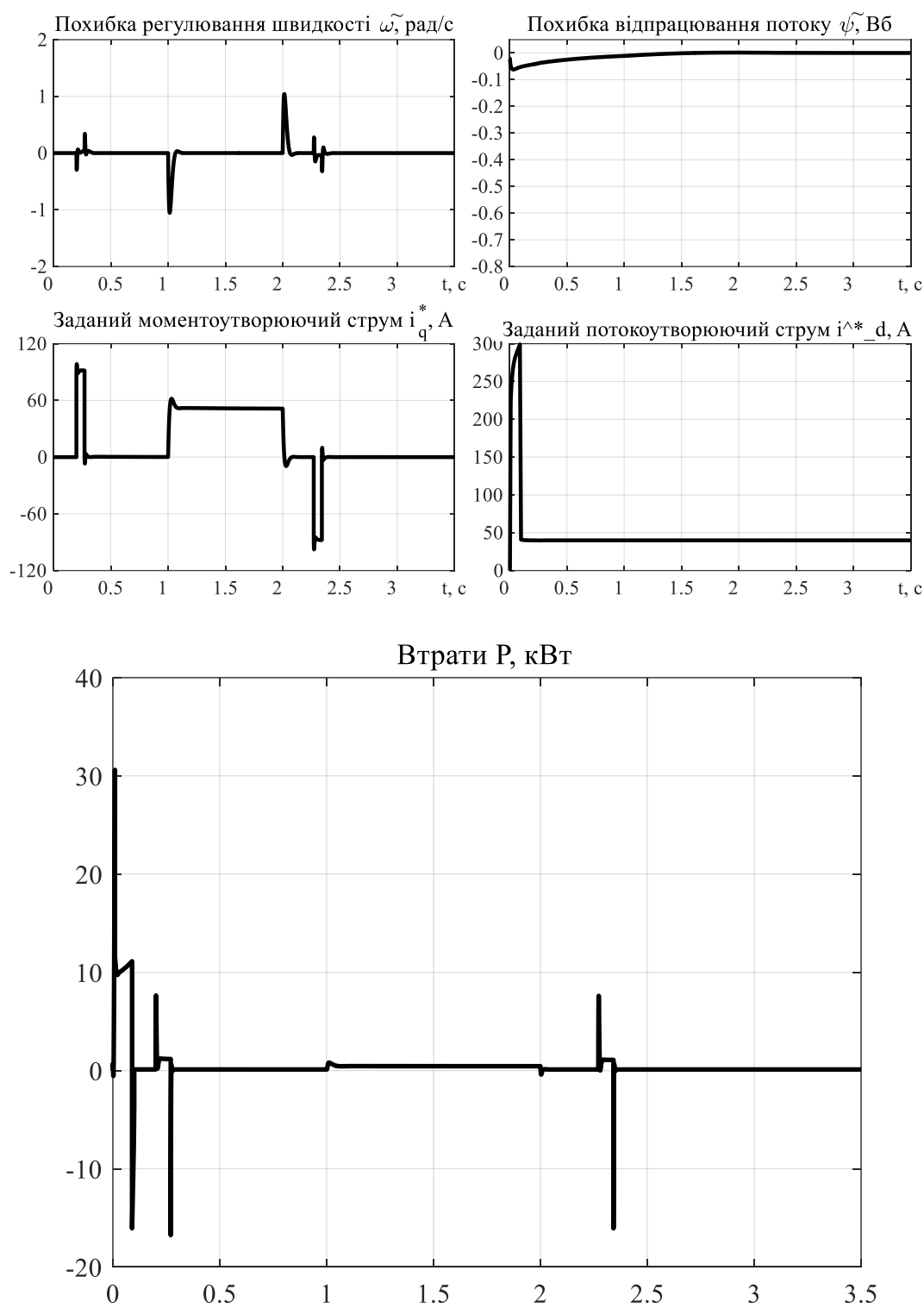
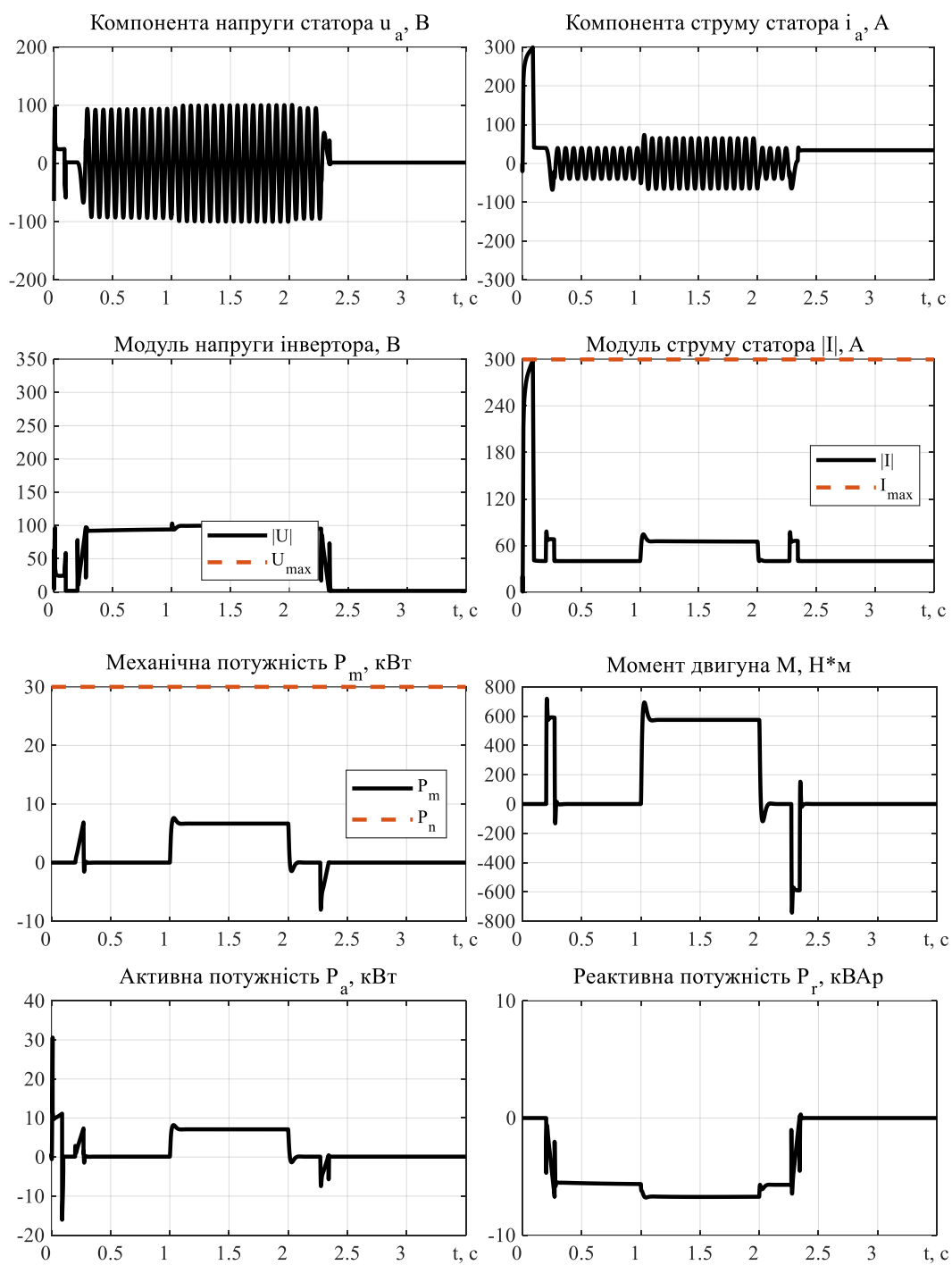


Рисунок 5.12 – Графіки перехідних характеристик при значенні

$$M_{\text{статична}} = 0.6, \omega = 0.5$$



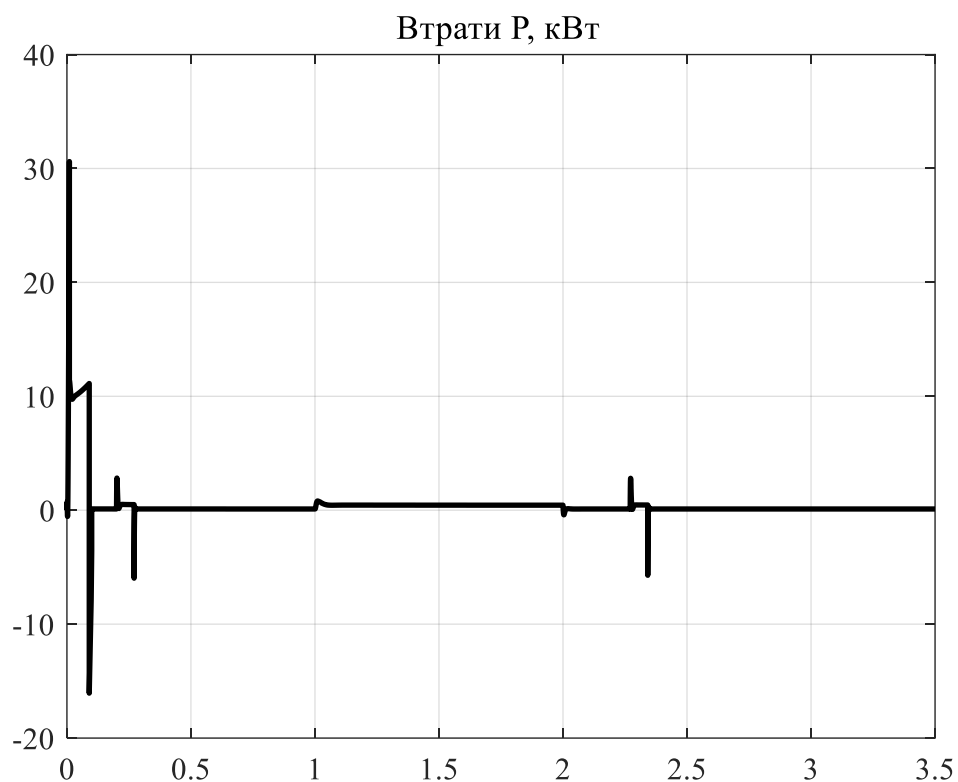
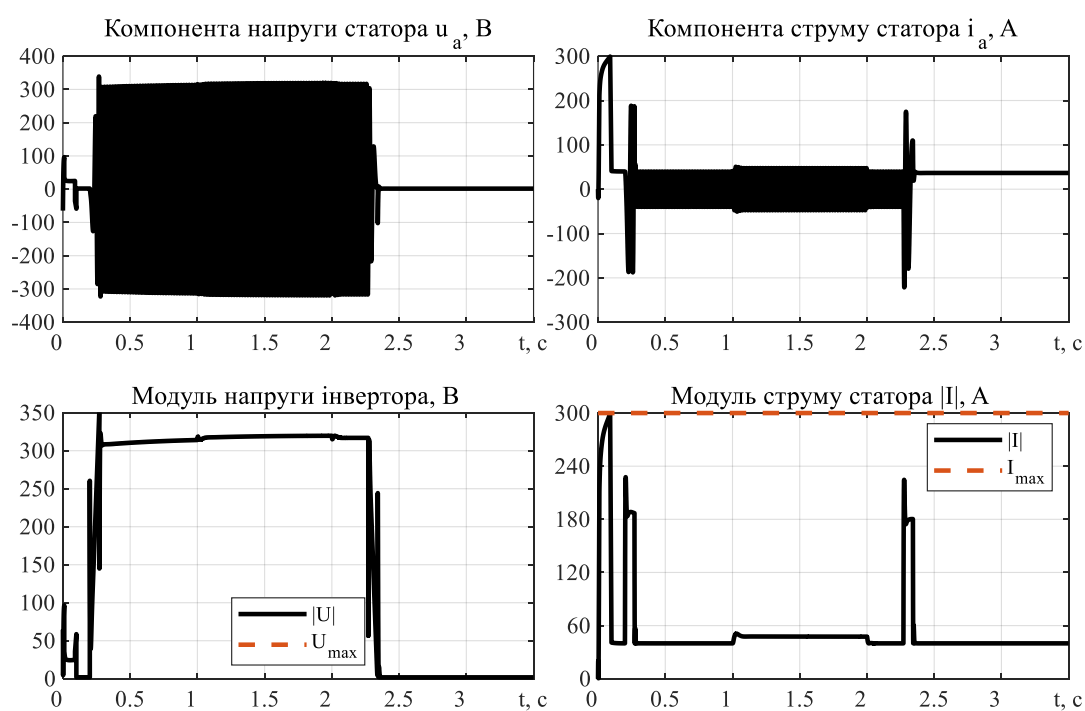


Рисунок 5.13 – Графіки перехідних характеристик при значенні
 $M_{\text{статична}} = 0.6, \omega = 0.3$



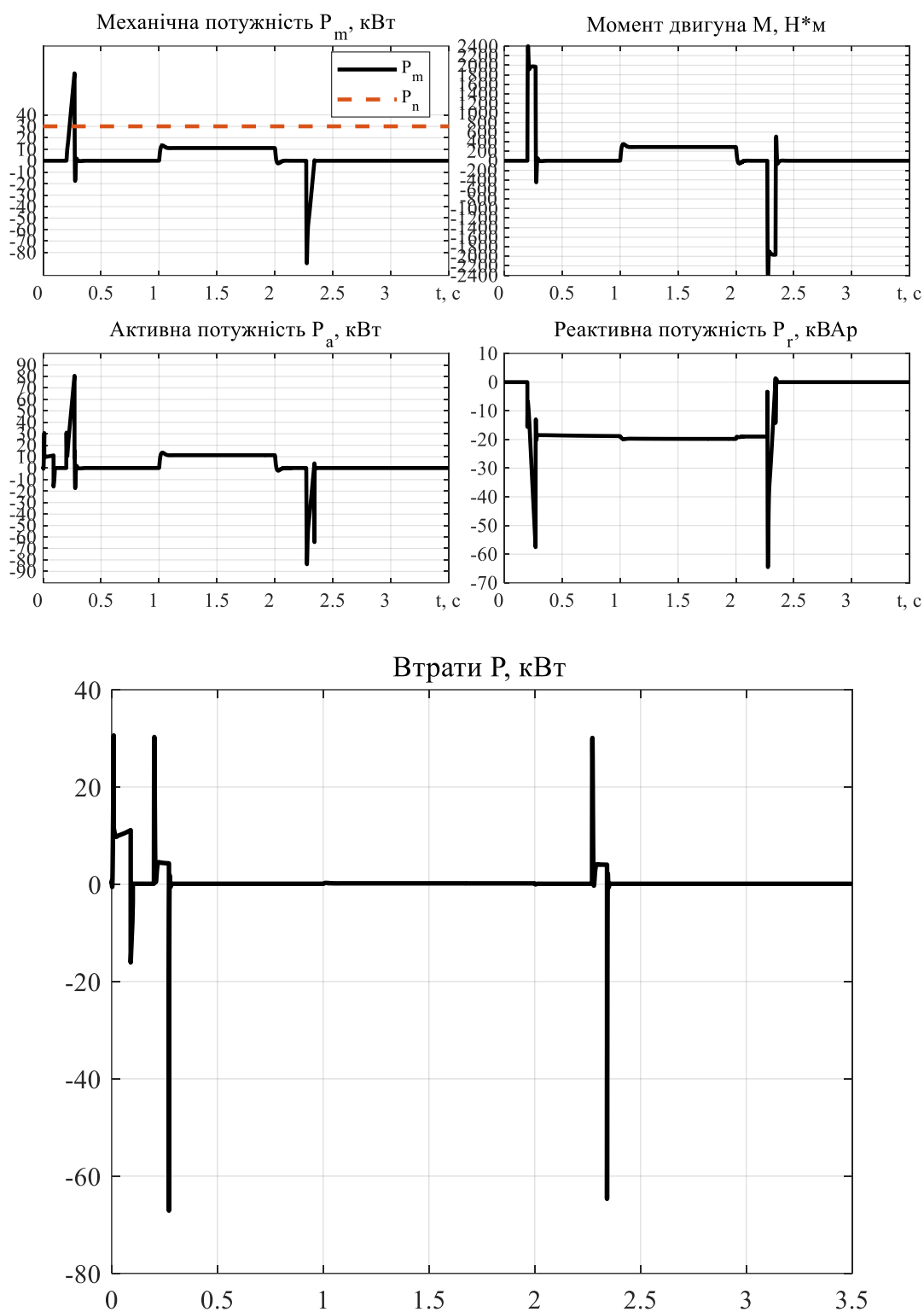
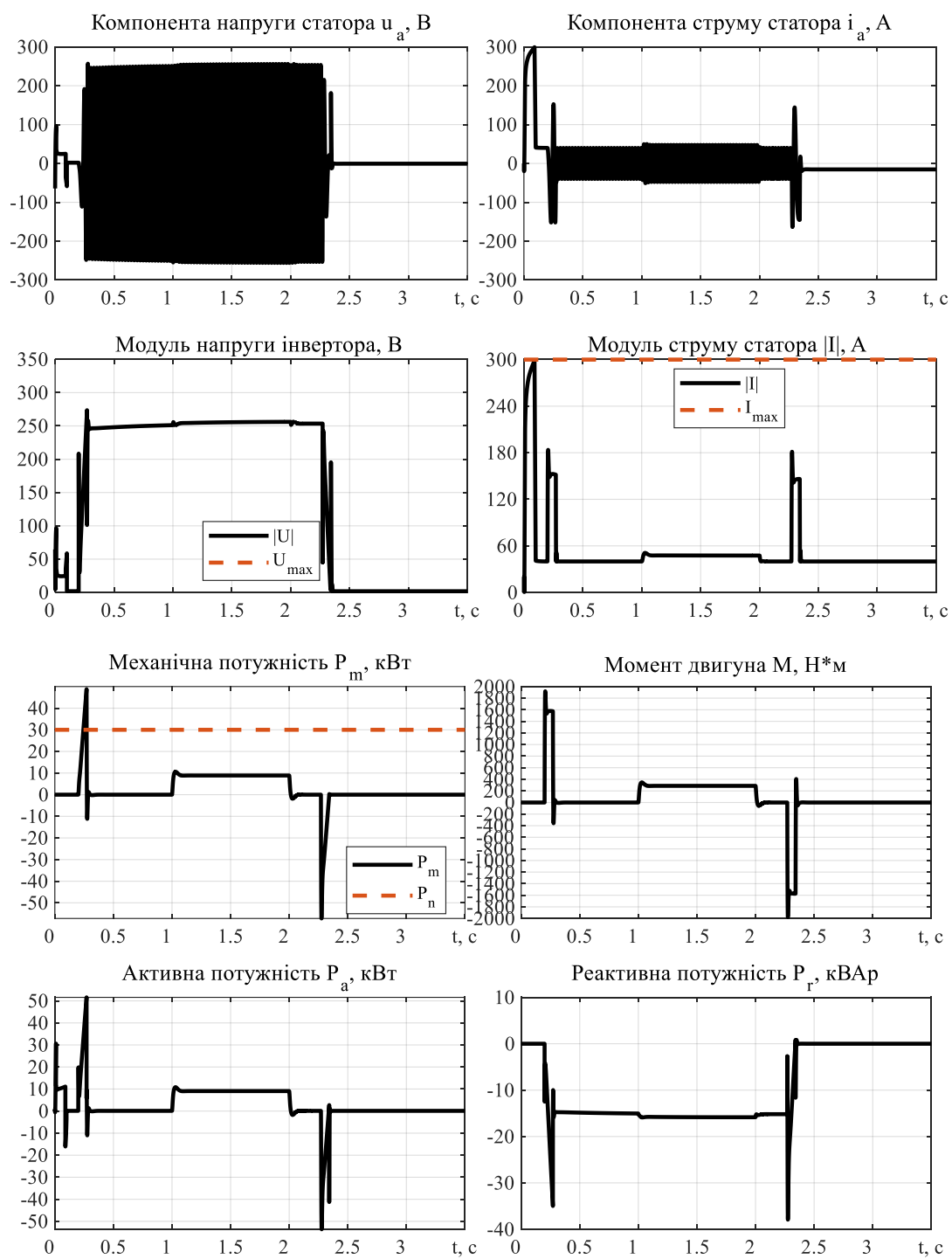


Рисунок 5.14 – Графіки перехідних характеристик при значенні

$$M_{\text{статична}} = 0.3, \omega = 1$$



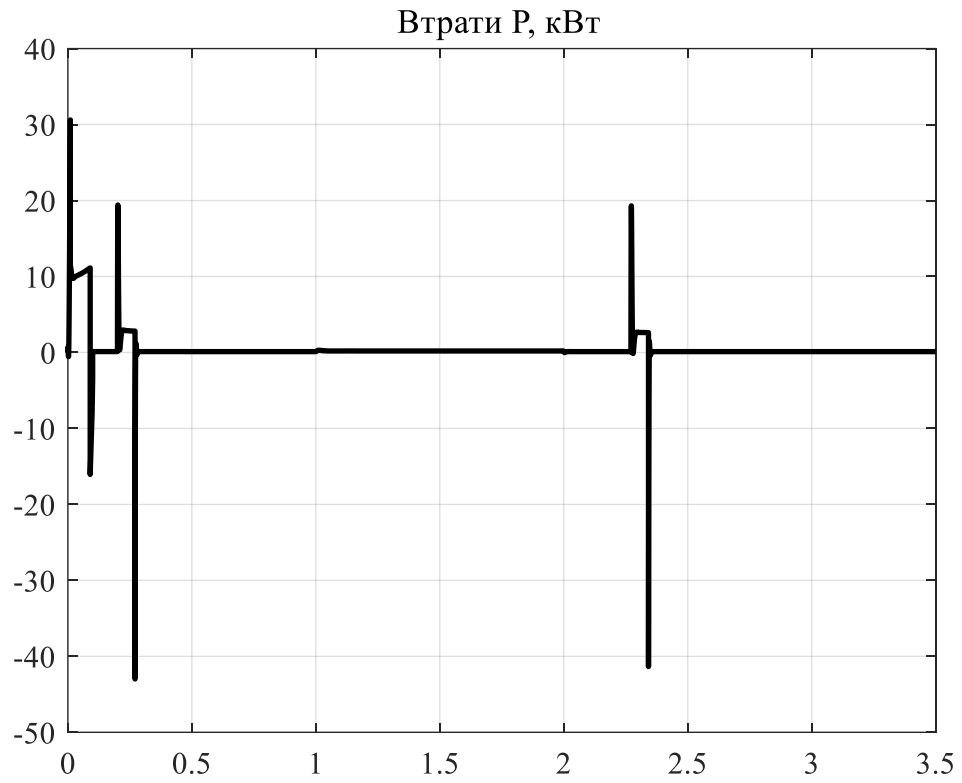
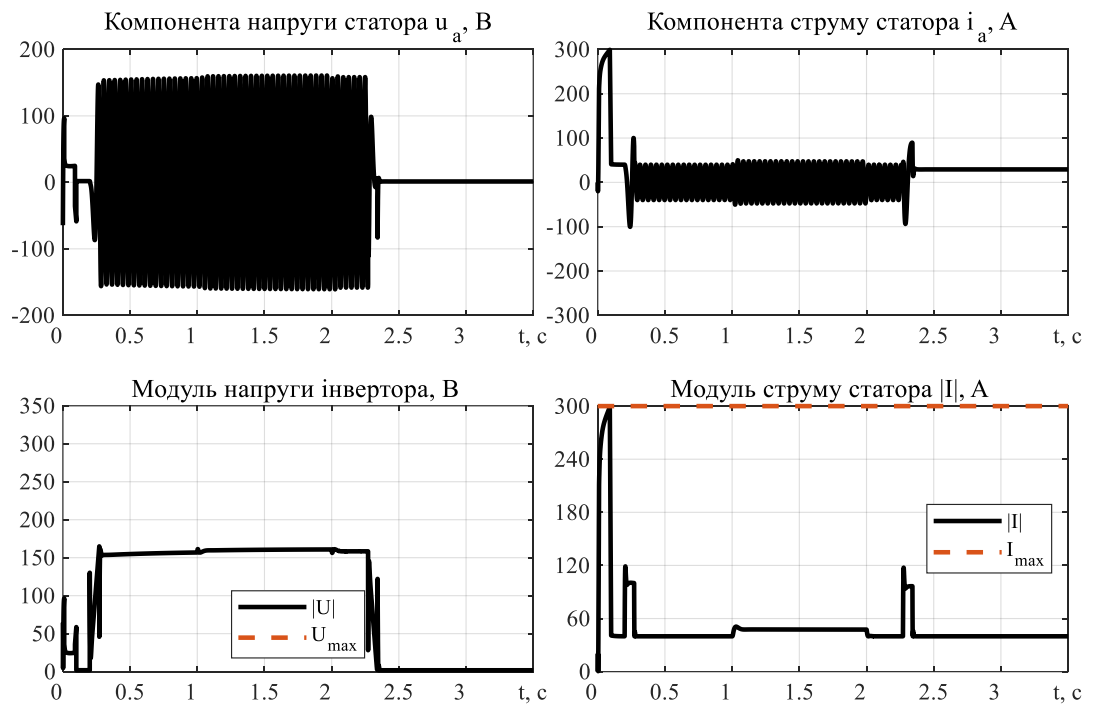


Рисунок 5.15 – Графіки перехідних характеристик при значенні

$$M_{\text{статична}} = 0.3, \omega = 0.8$$



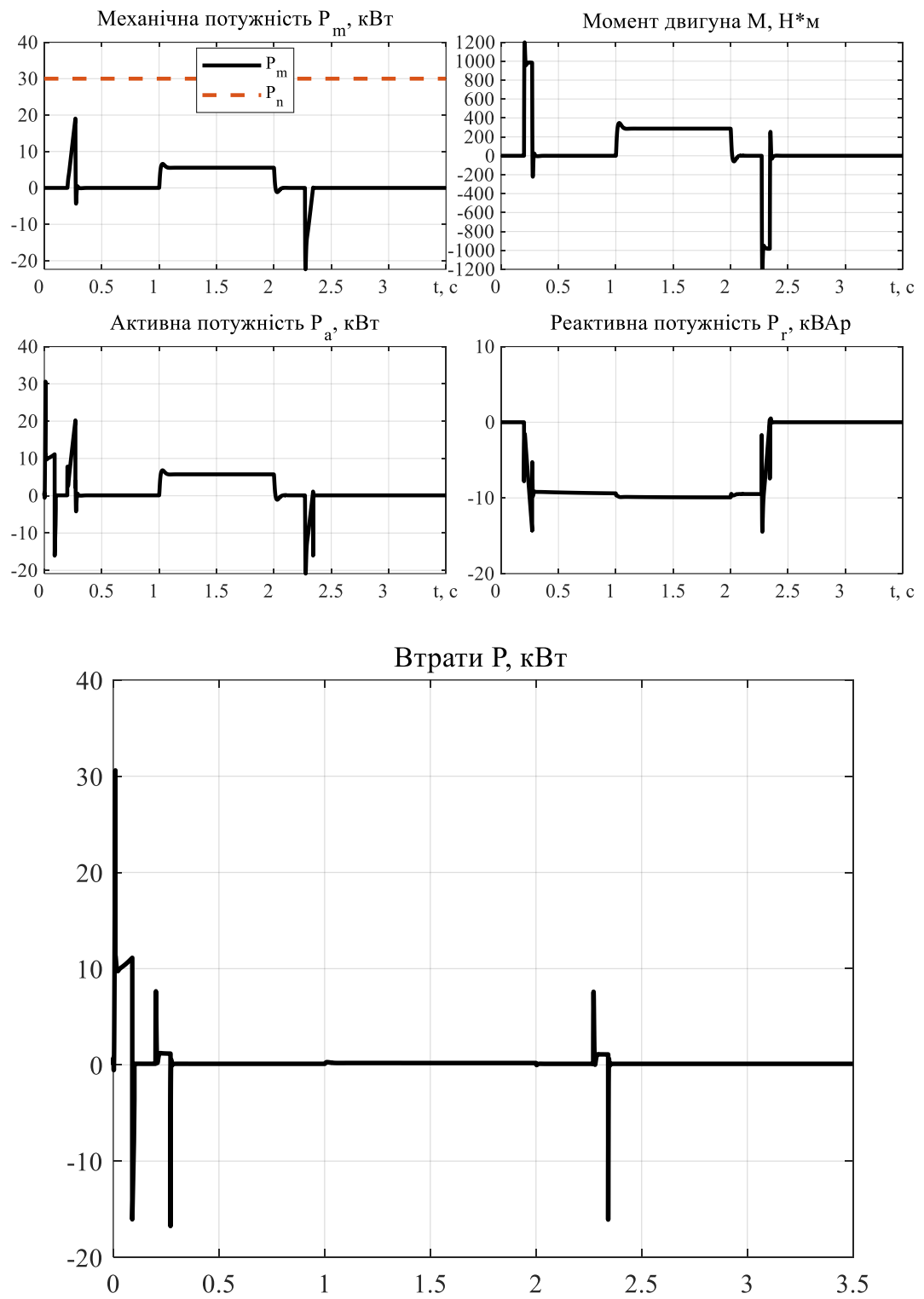
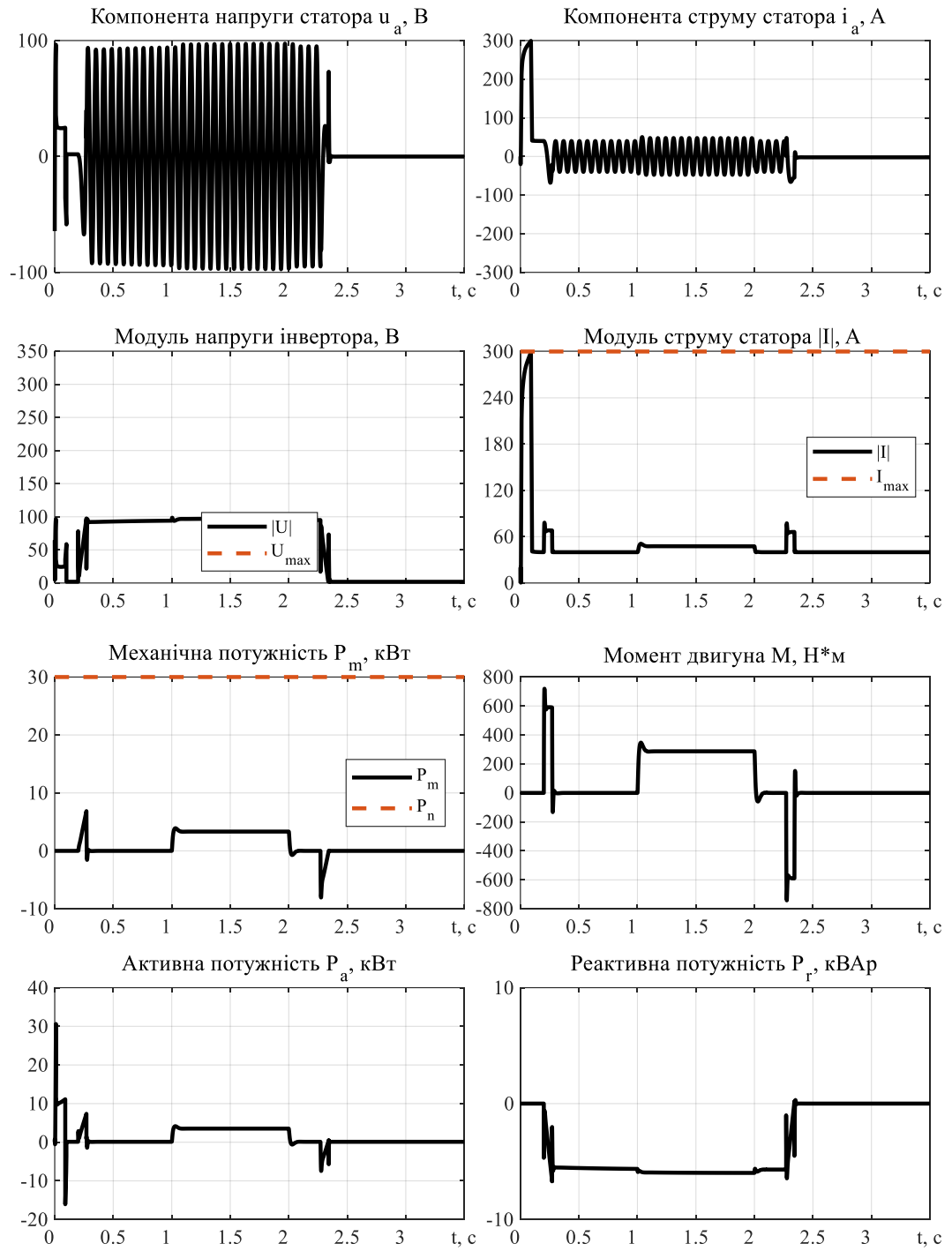


Рисунок 5.16 – Графіки перехідних характеристик при значенні

$$M_{\text{статична}} = 0.3, \omega = 0.5$$



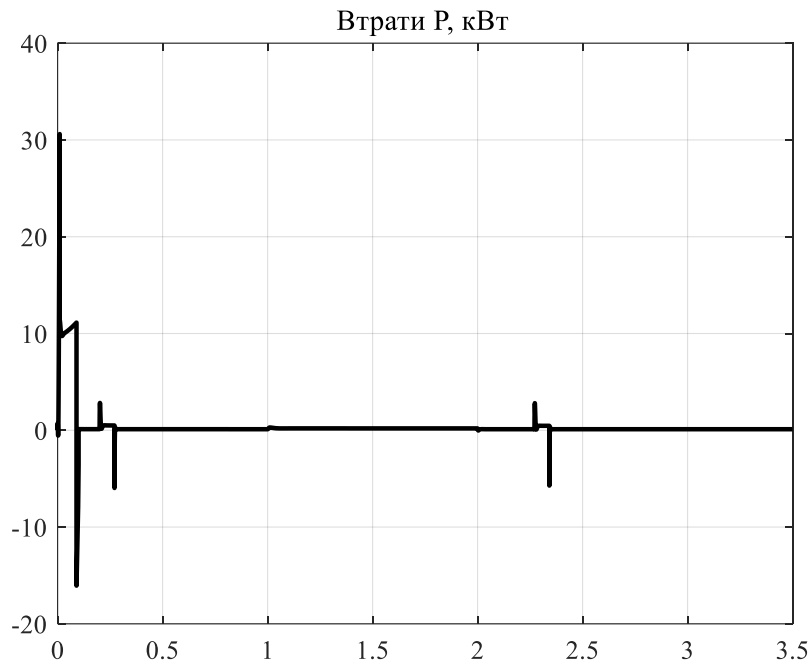


Рисунок 5.17 – Графіки переходних характеристик при значенні
 $M_{\text{статична}} = 0.3, \omega = 0.3$

Таблиця 5.1 – Порівняння переходних характеристик

Виконання досліджу	ω	M	P_m	P_a	P_r	ΔP
$M_{\text{стат}} = M_{\text{стат.ном.}}, \omega = \omega_{\text{ном.}}$	38.64	957.5	37	38.03	-27.38	1.037
$M_{\text{стат}} = M_{\text{стат.ном.}}, \omega = 0.8$	30.9	957.5	30	30.63	-21.97	1.033
$M_{\text{стат}} = M_{\text{стат.ном.}}, \omega = 0.5$	19.32	957.5	18.5	19.5	-13.86	1.034
$M_{\text{стат}} = M_{\text{стат.ном.}}, \omega = 0.3$	11.59	957.5	11.1	12.13	-8.44	1.034
$M_{\text{стат}} = 0.6, \omega = 1$	38.64	574.5	22.2	22.6	-22.1	0.44
$M_{\text{стат}} = 0.6, \omega = 0.8$	30.9	574.5	17.76	18.2	-17.7	0.44
$M_{\text{стат}} = 0.6, \omega = 0.5$	19.32	574.5	11.1	11.54	-11.1	0.44
$M_{\text{стат}} = 0.6, \omega = 0.3$	11.59	574.5	6.66	7.1	-6.73	0.44
$M_{\text{стат}} = 0.3, \omega$	38.64	287.25	11.1	11.29	-19.78	0.19
$M_{\text{стат}} = 0.3, \omega = 0.8$	30.9	287.25	8.8	9.07	-15.8	0.19
$M_{\text{стат}} = 0.3, \omega_{\text{стат}} = 0.5$	19.32	287.25	5.5	5.7	-9.91	0.19
$M_{\text{стат}} = 0.3, \omega_{\text{стат}} = 0.3$	11.59	287.25	3.3	3.52	-5.97	0.19

Таблиця 5.1 надає порівняння переходних характеристик електромеханічної системи при різних значеннях статичного моменту $M_{\text{стат}}$ та швидкості ω .

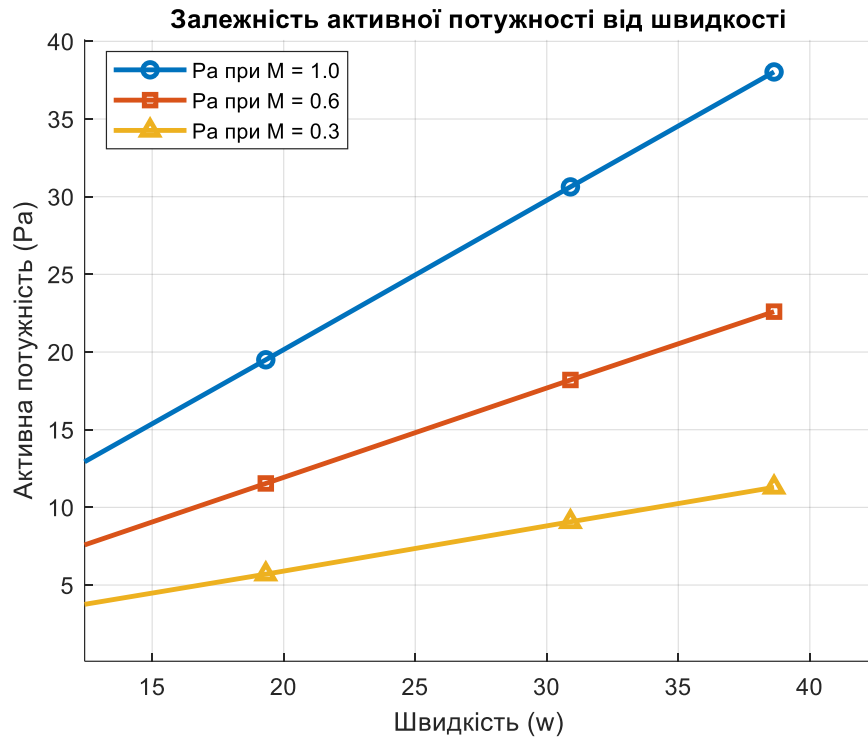


Рисунок 5.18 – графік залежності P_a від ω при

$$M_{\text{стат}} = M_{\text{стат.ном.}}; M_{\text{стат}} = 0.6; M_{\text{стат}} = 0.3;$$

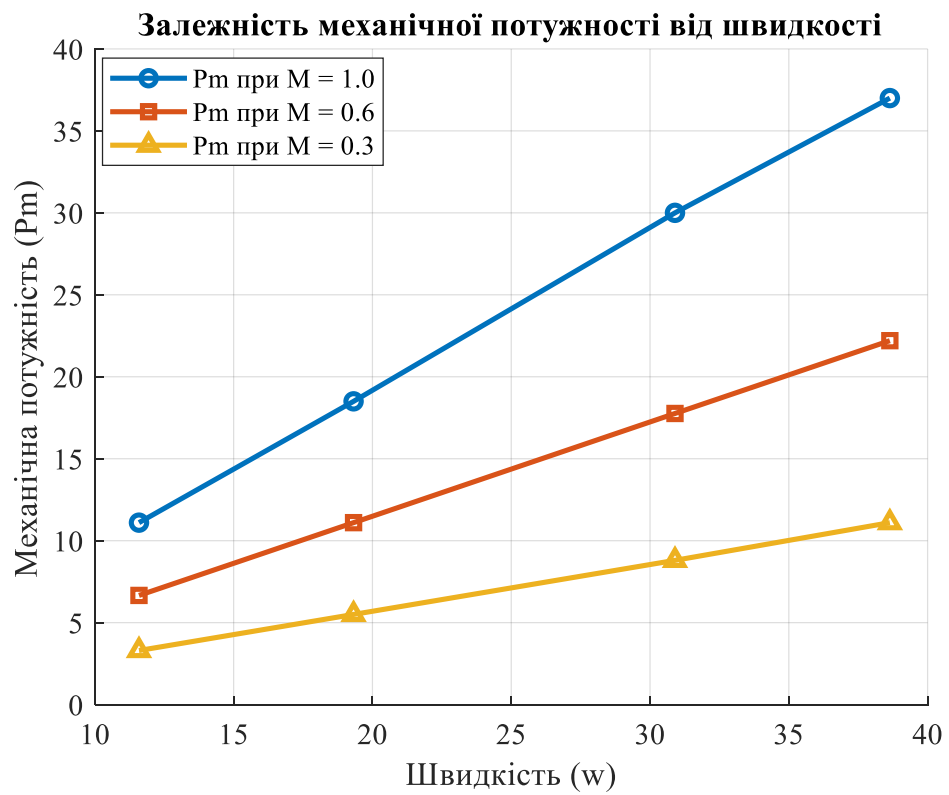


Рисунок 5.19 – графік залежності P_m від ω при

$$M_{\text{стат}} = M_{\text{стат.ном.}}; M_{\text{стат}} = 0.6; M_{\text{стат}} = 0.3;$$

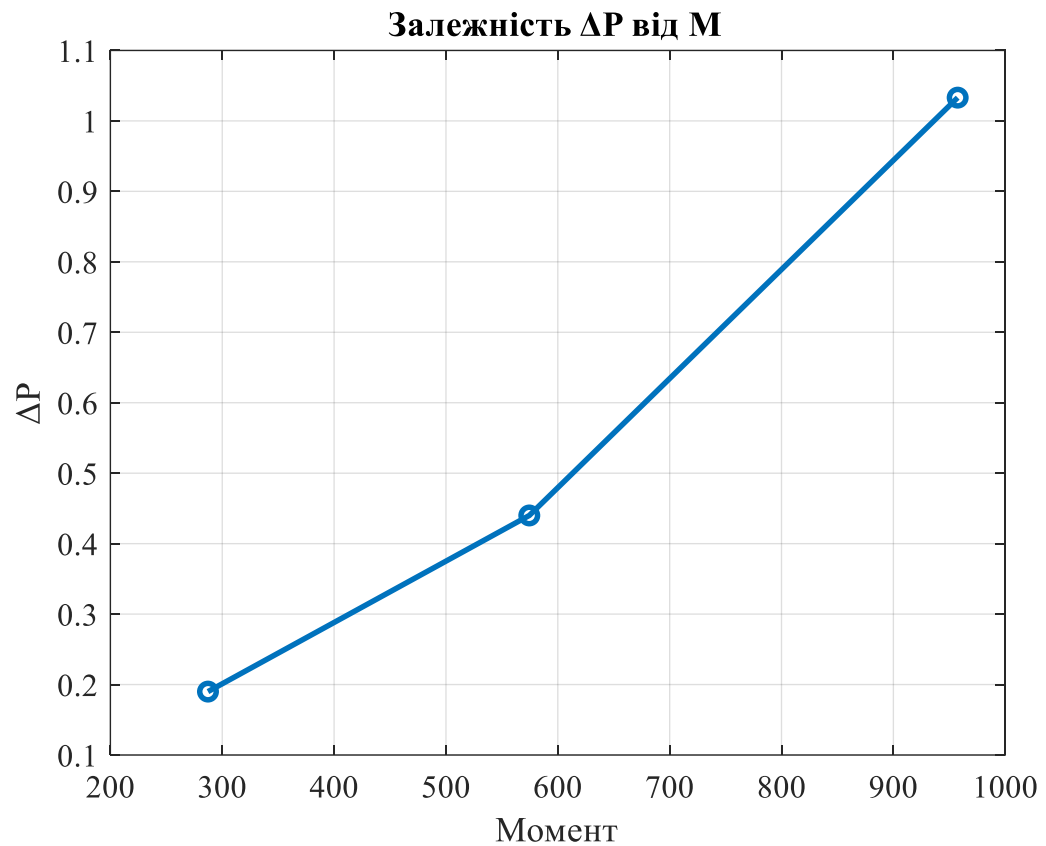


Рисунок 5.20 –Залежність ΔP від M

Результати показаних досліджень показують що в діапазоні зміни навантаження від $M_{\text{стат}} = M_{\text{стат.ном.}}$ до $M_{\text{стат}} = 0.3$ втрати активної потужності коливаються в межах від 0.3 до $M_{\text{стат.ном.}}$ від 0.19 до 1.037 при цьому, при механічній потужності змінюється в межах від 37кВт до 3.3 кВт, при цьому відносні втрати змінюються від 3% до 6%. Величина P_a змінюється від 3.5 до 38.03, та швидкості $\omega, \omega = 0.3$ коливається в межах від 38.64 до 11.59 рад/с при чому механічна потужність відповідно змінюється в межах від 37 до 3.3 кВт. Аналіз роботи електромеханічної системи показує що при використанні системи векторного керування стабільність роботи конвеєра при малих швидкостях на всьому діапазоні коливання навантаження механізму.

Висновок до розділу 5

Результати досліджень показують що втрати потужності коливаються від 3% до 6% що є досить прийнятним за умовами технологічного процесу при коливанні навантаження в діапазоні малих швидкостей електромеханічна система забезпечує стабільність швидкості руху конвеєра а тому продуктивність механізму безперервного транспорту в межах стабільної швидкості залишається незмінною у відповідності до умов технологічного процесу.

Висновок по роботі

Завдання і програма роботи виконана в повному обсязі.

На основі аналізу науково-технічної літератури було сформульовано вимоги до електроприводу з урахуванням потреб технологічного процесу. Виконано порівнювальний аналіз електроприводів, обрано як найкраще система з векторно-керованим асинхронним електродвигуном.

На основі тягового розрахунку обрано електродвигун потужністю 37 кВт та обрано елементи електромеханічної системи редуктор «Yilmaz reduktor ET125» та перетворювач частоти ATV212.

Отримано математичну модель електромеханічної системи конвеєра на основі якої розроблено модель для дослідження статичних та динамічних режимів роботи конвеєра.

Результати показаних досліджень показують що в діапазоні зміни навантаження від $M_{\text{стат}} = M_{\text{стат.ном.}}$ до $M_{\text{стат}} = 0.3$ втрати активної потужності коливаються в межах від 0.3 до $M_{\text{стат.ном.}}$ від 0.19 до 1.037 при цьому, при механічній потужності змінюється в межах від 37кВт до 3.3 кВт, при цьому відносні втрати змінюються від 3% до 6%. Величина P_a змінюється від 3.5 до 38.03, та швидкості $\omega, \omega = 0.3$ коливається в межах від 38.64 до 11.59 рад/с при чому механічна потужність відповідно змінюється в межах від 37 до 3.3 кВт. Аналіз роботи електромеханічної системи показує що при використанні системи векторного керування стабільність роботи конвеєра при малих швидкостях на всьому діапазоні коливання навантаження механізму.

Використання системи векторного керування забезпечує високий рівень стабільності роботи електромеханічної системи у всьому діапазоні зміни навантаження і швидкості руху тягового елемента останнє дозволяє зробити висновок що використання цієї системи електроприводу є досить перспективною і може використовуватись при модернізації і реконструкції електроприводів транспортних систем з ланцюговими тяговими елементами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.М.Пересада, В.І.Теряєв. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,5 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 48 с.
2. Ромакін Н.Е.Конструкція і розрахунок конвеєрів: довідник / Н.Е. Ромакін. – Старий Оскіл: ТНТ, 2011-504с.
3. Кравчік, О. К., Шлаф, М. М., Афонін, В. І., Соболенська, О. О.. Асинхронні двигуни серії 4А: Довідник. М.: Енерговидав. 1982.
4. Пересада С. М., Ніконенко Є. О. Курсовий проект з керування електроприводами [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.М. Пересада, Є.О. Ніконенко – Електронні текстові дані (2,6 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 58 с.
5. С. М. Пересада, Є. О. Ніконенко, “Керування електроприводами – посібник”, КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, 2022, – 396 с.
6. Теорія мехатронних систем – 1: Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. –К.: НТУУ “КПІ”, 2011 р. – 96 с.
7. Павленко Т. П., Донець О. В., Петренко О. М.. Конспект лекцій: Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 133 с.
8. Сайт фірми-дистриб’ютора ТОВ «Системи якості ЛТД» , електродвигун 37кВт 750об/хв АИР 250 URL: aip.com.ua
9. Сайт фірми-дистриб’ютора ПБКП «Огрант»; редуктор з передаточними числами 10 і 14.5 Yilmaz reduktor ET125 URL: ogrant.com.ua
10. Сайт фірми-дистриб’ютора «On-Off.com.ua», перетворювач частоти ATV212 45кВт URL: on-off.com.ua

11. Сайт виробника «Schneider Electric», автоматичний вимикач ComPact NSX160N URL:se.com

12. Машини безперервного транспорту в технологіях не-органічних речовин : навч. посіб. / Кобзєв О. В., Пана-сенко В. О., Авіна С. І., Дейнека Д. М. — Харків: НТУ«ХПІ». Видавець О. А. Мірошніченко, 2019. — 136 с.Табл. 56. Іл. 22. Бібліогр. 16

13. Методичний посібник: О.О. Дереза Машини безперервного транспорту. – Мелітополь: Таврійський державний агротехнологічний університет, 2016. – 108 с