

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

“ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний 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: Дослідження режимів роботи електроприводу магістрального  
стрічкового конвеєру

Виконав студент 4 курсу, групи ЕП-62  
(шифр групи)

Зозуля Яків Олександрович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Керівник к.т.н., проф. 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., доц. 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 \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2020 р.



**Пояснювальна записка  
до дипломного проекту**

на тему: Дослідження режимів роботи електроприводу магістрального  
стрічкового конвеєру

Київ – 2020р.

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва)

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проект студенту**

Зозуля Яків Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту “Дослідження режимів роботи електроприводу магістрального стрічкового конвеєру” \_\_\_\_\_,

керівник проекту \_\_\_\_\_,

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

затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом проекту: 5 червня 2020. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту: Розрахункова продуктивність конвеєра Q = 700 т /

ГОД;

Розміри ділянок траси:  $L_1 = 190$  м;  $L_2 = 150$  м;  $L_3 = 14$  м;  $L_4 = 146$  м;  $L_5 = 180$  м;  $L_6 = 20$  м;  $H = 20$  м;  $H_1 = 0,8$  м;  $h_T = 1,65$  м, Розмір типового шматка вантажу  $a' = 160$  мм; Кут природного нахилу в спокої  $\varphi = 37^\circ$

4. Зміст пояснювальної записки: 1) Аналітичний огляд науково-технічної літератури в галузі систем безперервного транспорту з гнучким тяговим елементом. 2) Тяговий розрахунок конвеєра визначення потужності та вибір електродвигуна. 3) Розробка системи керування, розрахунок і вибір її елементів. 4) Математична модель електромеханічної системи. 5) Дослідження динамічних режимів електромеханічної системи стрічкового конвеєра.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

#### 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.

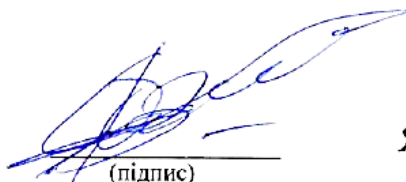
7. Дата видачі завдання: 1 квітня \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1.	Аналітичний огляд науково-технічної літератури в галузі систем безперервного транспорту з гнучким тяговим елементом.	5.04	
2.	Тяговий розрахунок конвеєра визначення потужності та вибір електродвигуна.	13.04	
3.	Розробка системи керування, розрахунок і вибір її елементів.	16.04	
4.	Математична модель електромеханічної системи.	20.04	

5.	Розробка моделі для дослідження режимів роботи конвеєра з використанням пакета прикладних програм «MATLAB».	27.04	
6.	Дослідження режимів роботи стрічкового конвеєра, аналіз отриманих результатів.	11.05	
7.	Дослідження характеристик електромеханічної системи конвеєра при зміні швидкості тягового елемента.	20.05	
8.	Аналіз результатів досліджень	22.05	
9.	Оформлення дипломної роботи	1.06	?
10.	Підготовка презентації до захисту	5.06	

Студент



(підпис)

Яків ЗОЗУЛЯ

Керівник проекту

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Микола ПЕЧЕНИК

## РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: сторінок – 116, рисунків – 37, таблиць – 11, також графічну частину на 3 листах формату А1.

У наведеній дипломній роботі виконано розрахунок та вибір асинхронного двигуна, а також дослідження векторного керування моментом АД для стрічкового конвейера. Розрахунок АД включає в себе: розрахунок номінального та максимального моментів навантаження, вибір силової частини, розрахунок та вибір редуктора. Обраний алгоритм забезпечує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту та потокозчеплення.

За допомогою пакету прикладних програм MATLAB було побудовано графіки перехідних процесів двигуна при відпрацюванні заданої траєкторії моменту та заданої швидкості, що відповідає режимам роботи під час промислового використання стрічкового конвеєра.

КОНВЕЄР, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, ВЕКТОРНЕ, СИНТЕЗ,  
ХАРАКТЕРИСТИКИ, ДОСЛІДЖЕННЯ, КОНВЕЄР, СТРІЧКОВИЙ КОНВЕЄР,  
MATLAB, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН

					141.62107.006.БР			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Зозуля Я.О. Печеник М.В.			Електропривод і автоматизація стрічкового конвеєра	Літ.	Арк.	Аркушів
Реценз.							7	115
Н. Контр.		Теряєв.В.І				<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП, гр ЕП-62</i>		
Затверд.								

## SUMMARY

The diploma project comprises: 116 pages, 37 figures, 11 tables and the graphical part on 3 pages A1.

In this thesis project selection and calculation of the induction motor and vector control research point for belt conveyor. Calculation of AD includes: calculation of nominal load and maximum load, the choice calculation of power part and reducer. Selected refinement algorithm ensures asymptotic trajectories given moment and flux.

The method of mathematical modeling could graphics engine transients when developing the trajectory point corresponding to the urban cycle of the vehicle and its movements downhill.

INDUCTION MOTOR, , CONVEYOR, FIELD ORIENTED CONTROL, SYNTETHIS, MATLAB, CHARACTERISTICS, RESEARCH, CONVEYOR BELT, CONVEYOR.

					141.62107.006.БР			
	Letter	№ of doc.	Sign.	Date	Electric drive and automation of the conveyor belt	L.	Page	Pages
Devel.	Y. Zozulia						8	115
Checked	M. Pechenic					NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», FEA, gr. EP-62		
N. Contr.	V.Teryaev							
Approved.								

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ В ГАЛУЗІ СИСТЕМ БЕЗПЕРЕРВНОГО ТРАНСПОРТУ З ГНУЧКИМ ТЯГОВИМ ЕЛЕМЕНТОМ.....	12
1.1 Аналіз конструктивних рішень, технологічних режимів роботи стрічкових конвеєрів.....	12
1.2 Огляд наукових досліджень в галузі стрічкових конвеєрів.....	29
Стрічкові конвеєри уникаючі розсіпання[4].....	32
1.3 Основні вимоги до електроприводів стрічкових конвеєрів, обґрунтування та вибір системи електроприводу.....	33
Висновки до розділу.....	42
2 ТЯГОВИЙ РОЗРАХУНОК КОНВЕЄРА, ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА.....	43
2.1 Схема та параметри конвеєра.....	43
2.2 Тяговий розрахунок конвеєра.....	44
Натяги стрічки у характерних точках траси:.....	46
2.3 Вибір двигуна.....	51
Висновки до розділу.....	55
3 ВИЗНАЧЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ.....	56
3.1 Функціональна схема керування електроприводом конвеєра.....	56
3.2 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна.....	61
3.3 Розрахунок та вибір перетворювача частоти.....	68
3.4 Синтез регулятора швидкості.....	73
Висновки до розділу.....	79
4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ.....	80
4.1 Алгоритм непрямого векторного керування асинхронним електродвигуном.....	80
4.2 Побудова структурної схеми системи векторного керування асинхронним електродвигуном.....	85
Висновки до розділу.....	87
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА.....	88

5.1	Модель для дослідження динамічних режимів в межах пакету програм «MATLAB».	88
5.2	Дослідження динамічних режимів роботи конвеєра при різних значеннях статичного моменту.	89
5.2	Дослідження характеристик електромеханічної системи конвеєра при зміні швидкості тягового елемента.	107
	Висновки до розділу	113
	Висновки до роботи	114
	Перелік використаної літератури	115

## ВСТУП

Стрічковими конвеєрами називають машини безперервного транспорту, що несе і тяговим елементом яких є гнучка стріка. Їх застосовують для переміщення сипких і штучних вантажів на короткі, середні та дальні відстані у всіх областях промислового і сільськогосподарського виробництва, при видобутку корисних копалин, в металургії, на складах і в портах, використовують в якості елементів навантажувальних і перевантажувальних пристроїв, а також машин, що виконують технологічні функції.

Істотною перевагою стрічкових конвеєрів є значна продуктивність, яка при великих швидкостях руху (6-8 м/с) і ширині стрічки може бути доведена до 20 тис. т/год, що у багато разів перевищує продуктивність інших типів конвеєрів.

Стрічкові конвеєри можуть мати складні траси з горизонтальними і похилими ділянками, а також з вигинами в горизонтальній площині. Довжина горизонтальних конвеєрів може становити 3-5 км в одному ставі, в окремих випадках досягає 14 км. Завдяки простоті конструкції і експлуатації, зручності контролю роботи і автоматизації управління стрічкові конвеєри мають високу надійність навіть при роботі у важких умовах.

Не менше 70% всіх стрічкових конвеєрів є установки з приводом потужністю до 400 кВт і довжиною до 500 м. У конвеєрів більшої довжини і високої продуктивності загальна потужність приводних двигунів досягає 10 тис. кВт.

До недоліків стрічкових конвеєрів відноситься висока вартість стрічки і роликів, складова відповідно близько 50 і 30% від загальної вартості конвеєра, наявність просипи вантажу і ту обставину, що використання цих конвеєрів утруднено при транспортуванні пилоподібних, гарячих і важких штучних вантажів, а також при кутах нахилу траси, що перевищують 18-20 °.

# **1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ В ГАЛУЗІ СИСТЕМ БЕЗПЕРЕРВНОГО ТРАНСПОРТУ З ГНУЧКИМ ТЯГОВИМ ЕЛЕМЕНТОМ**

## **1.1 Аналіз конструктивних рішень, технологічних режимів роботи стрічкових конвеєрів**

В останні роки на металургійних заводах для перевезення масових вантажів сировини і палива все більше застосування знаходить конвеєрний транспорт. Цей вид транспорту застосовують не тільки на знову споруджуваних і проєктованих підприємствах, а й на діючих - при реконструкції основних агрегатів. Конвеєрами перевозять сировину від вагоноперекидачів, сортувальних станцій або від причалу заводського порту на склад, зі складу на агломерационную фабрику, в доменний і коксохімічний цехи. Конвеєрний транспорт застосовують також для подачі твердого палива на ТЕЦ; вапняку, руди та інших матеріалів - в сталеплавильні цехи.

З конвеєрів всіх типів найбільше поширення на металургійних заводах отримали стрічкові, частка яких становить 95 - 97%. Широке застосування конвеєрного транспорту пояснюється його перевагами перед транспортом інших видів при переміщенні значних обсягів вантажів на невеликі відстані. До таких переваг належать: простота конструкції, надійність в роботі, висока продуктивність і невеликі експлуатаційні витрати. Крім того, застосування конвеєрного транспорту дозволяє підвищити продуктивність праці і ступінь автоматизації виробництва, скоротити на 10 - 15% площа заводу, зменшити відстань між цехами, спростити транспортні комунікації, винести загальнозаводське залізничну станцію прибуття за межі заводу. Впровадження конвеєрного транспорту дає можливість підвищити ступінь безпеки на транспорті.

Стрічковий конвеєр — пристрій безперервної дії з об'єднаним вантажонесучим та тяговим органом у вигляді замкнутої стрічки. Стрічка приводиться у рух силою тертя між нею та приводним барабаном, опирається по всій довжині на стаціонарні роликові опори .

Стрічковий транспорт безперервного руху є найбільш популярним типом транспортуючих систем безперервної дії у багатьох вітках промисловості. Із усієї кількості конвеєрних установок, що використовуються на території нашої країни, 90% займають стрічкові конвеєри.

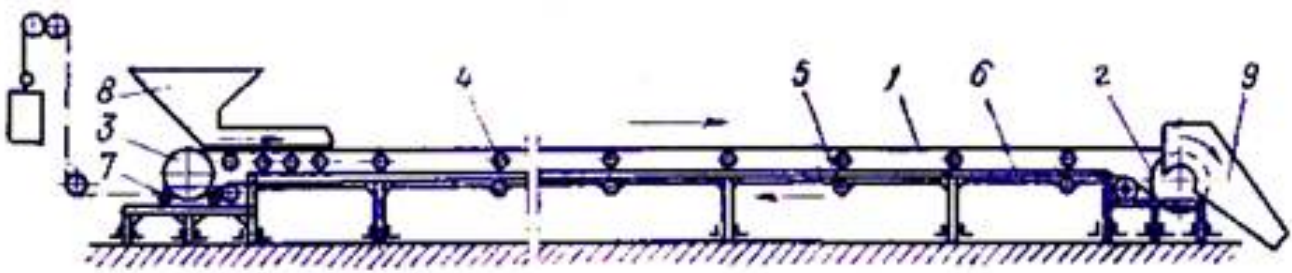


Рисунок 1.1 – Схема стрічкового конвеєра

Стрічковий конвеєр, що зображений на рисунку 1, складається з нескінченної стрічки різних типів 1, що обтікає крайні барабани – передній барабан приводу - 2 і задній, натяжний - 3, і яка підтримується на всій довжині опорними роликами (роликоопорами) 4 і 5. Роликові опори кріпляться до металевої або дерев'яної опорної рами 6 конвеєра. Стрічка рухається за рахунок приводного барабану від електроприводу.

Щоб забезпечити відповідне значення між ободом барабану та стрічкою, а також для підтримки вантажу на стрічці між роликами за допомогою натяжного пристосування 7 створюється постійне натягнення стрічки.

Стрічкові конвеєри бувають стаціонарні, пересувні і переносні. Промисловість випускає стаціонарні стрічкові конвеєри (з шириною стрічки 400...2000 мм), що складаються із стандартних вузлів і елементів.

Стрічкові конвеєри застосовують для переміщення матеріалу по горизонталі, під ухилом і по комбінованій трасі, що складається з горизонтальних і похилих ділянок з увігнутими або опуклими перегинами.

Максимально допустимий кут конвеєрної установки, що має гладку поверхню, залежить від роду вантажу.

Для злічуваних вантажів, наприклад балансів, кіп целюлози, мішків і тому подібне, використовуються системи із плоскою стрічкою. Для вантажів типу пісок, щебінь, вугілля широке використання має стрічка типу жолоб.

За галуззю застосування, конструкцією і параметрами підземні стрічкові конвеєри поділяють на п'ять груп:

- Перша — стрічкові конвеєри для примикаючих до лав трансп. виробок з кутами нахилу 3-6°.
- Друга — для горизонтальних і слабопохилих виробок.
- Третя — для похилів з кутом до 18°.
- Четверта — для бремсбергів з кутом до 16°.
- П'ята — для похилих стовбурів і гол. схилів з кутом 3-18°.

Граничний кут нахилу стрічкових конвеєрів для рядового вугілля 20°, для дроблених руд — до 25°.

Кар'єрні стрічкові конвеєри за конструкцією поділяють на вибійні, відвальні, передавальні і стаціонарні магістральні. Крім того, вони є складовою частиною деяких кар'єрних агрегатів в складі роторних і ланцюгових екскаваторів, відвалоутворювачів, транспортно-відвальних мостів, перевантажувачів [1].

Режими роботи конвеєра характеризуються навантаженнями і тривалістю їх дії, забезпечується класами використання конвеєра по часу, продуктивністю і натягом тягового елемента, визначають умовами розрахунку елементів конвеєра на міцність і довговічність.

Таблиця 1.1- Режими роботи і приклади використання конвеєрів

Час роботи на добу	Клас використання по часу	Режими роботи	Приклад використання конвеєра
Менше одної зміни	B1	ВЛ	Конвеєри на окремих секціях складу; для прибирання стружки чи просипки землі
Одна зміна	B2	Л	Конвеєри транспортні на підприємствах різних галузей промисловості
Дві зміни	B3	С	
Три зміни	B4	Т	
Цілодобово	B5	ВТ	Конвеєри, що обслуговують неперервні технологічні процеси

У гірничорудній промисловості на підйомах крупнодробленої руди з кар'єрів продуктивність становить до 6000 т/год, ширина стрічки 1600–2000 мм, потужність електродвигунів привода 1200-3000 кВт. Загалом К.с. мають високу продуктивність, яка досягає 30 тис.т/год. Довжина К.с. в одному поставі від декількох метрів до 10-15 км, кут нахилу не перевищує 16-18°.

Перевагами стрічкових конвеєрів являються : легкість обслуговування, відносно велика довжина транспортування від одного привода, безшумність при роботі, невелика питома витрата електроенергії, можливість автоматизації. До недоліків цих конвеєрів відносяться : їх висока вартість , невеликий термін служби стрічки, обмежений кут нахилу.

Обмеження області застосування стрічкових конвеєрів пов'язано з наступними факторами:

1. Крупністю та абразивністю транспортуємого матеріалу

2. Обмеження кута підйому при використанні нормальної гладкої стрічки (до 16-20° в залежності від властивостей транспортування матеріалу і конструкції роликового става).

3. Необхідність прямолінійного встановлення конвейерного става в плані, що не дозволяє використовувати конвеєри на криволінійних ділянках.

Стрічкові конвеєри класифікуються:

За призначенням:

- для підземних гірничих роботах (шахт, рудників);
- для відкритих гірничих робіт (кар'єрів, розрізів );
- для інших галузей промисловості.

За розташуванням несучої гілки стрічки:

- з верхньою несучою гілкою (основний тип);
- з нижньою несучою гілкою;

За способом розвантаження:

- з розвантаженням на кінцевому барабані;
- з проміжним розвантаженням.

За видом вантажів:

- для насипних вантажів;
- для штучних вантажів.

За формою поперечного розрізу:

- з плоскою стрічкою;
- з стрічкою у формі жолобу.

За конструкцією приводу і кількістю приводних барабанів

- з одним, двома, трьома приводними барабанами[1].

### **Влаштування та принцип дії стрічкового конвеєру**

Несучим і тяговим елементом стрічкового конвеєра загального призначення є нескінченна гнучка стрічка 9, яка спирається верхній (робочої) і нижньої (холостий) гілками на роликові опори 6, 17 і огинає на кінцях конвеєра приводний 10 і натяжна 2 барабани. У коротких конвеєрів, часто використовуваних для переміщення штучних вантажів, робоча гілка стрічки

може ковзати по дерев'яному або металевому настилу. Рух передається стрічці фрикційним способом від приводного барабана. Необхідна первинне натягнення на збігає гілки стрічки створюється натяжним барабаном за допомогою натяжної пристрою 1 вантажного або гвинтового типу. Сипучий вантаж подається на стрічку через завантажувальну воронку 3, що встановлюється зазвичай на початку конвеєра у кінцевого барабана 2. Розвантаження стрічки може бути кінцевий або проміжної, для чого використовують пересувну розвантажувальну візок 7 або стаціонарні плужкові скидачі.

Для очищення робочої сторони стрічки від решти частинок установлюють обертові щітки 11 (капронові, гумові) або нерухомий скребок. Для багатьох видів вантажів установка очисного пристрою абсолютно необхідна, так як прилип частинки можуть призвести до нерівномірного обертання нижніх роликкоопор, що викликає високі динамічні навантаження і прискорений знос стрічки.

Очищення стрічки після приводного барабана необхідна ще й тому, що прилипли частинки, обсипаючи від струшування на кожній опорі нижньої гілки, можуть утворювати завали з дрібних частинок, що ускладнюють експлуатацію конвеєра.

Для центрування ходу обох гілок стрічки і виключення її надмірного поперечного зсуву застосовують різні центруючі роликові опори 5. На криволінійних ділянках гілок траси встановлюють роликові батареї, що створюють плавний перегин стрічки, або відхиляють барабани 4.

Привід стрічкового конвеєра складається з приводного барабана 10, електродвигуна 14, редуктора 13 і з'єднувальних муфт 12. Основними характеристиками приводного механізму є потужність двигуна, передавальне число редуктора і розвивається найбільший крутний момент, а приводного барабана - найбільший допустимий крутний момент і його фрикційна здатність, яка визначається коефіцієнтом зчеплення барабана зі стрічкою. Фрикційне здатність приводного барабана також залежить від кута обхвату барабана стрічкою. Для збільшення коефіцієнта зчеплення стрічки з барабаном останній

футерують, тобто покривається гумою або іншим матеріалом. Привід може бути з одним барабаном (однобарабанний) або з декількома (двох і трехбарабанний). Збільшення числа приводних барабанів підвищує тягову здатність приводу.

У приводах застосовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором і фазним ротором. Двигуни з короткозамкненим ротором мають нерегульовану (жорстку) характеристику, а двигуни з фазним ротором - регульовану, тобто під час пуску у них змінюється момент і час розгону.

При необхідності швидкої зупинки конвеєра або запобігати щення зворотного ходу стрічки з вантажем у приводу похилого конвеєра передбачається гальмо або храповий останов.

Всі елементи конвеєра монтують на металоконструкції 15, що прикріплюється до фундаменту або до опорних частин будівлі. Металоконструкцію з приводом називають приводний станцією. Натягач і завантажувальна воронка складають натяжну станцію. Між обома станціями розташована середня частина конвеєра, яка виконана з уніфікованих лінійних секцій. Лінійні секції, перехідні ділянки, приводний і натяжна станції з'єднані болтами.

Як правило, для сипучих вантажів застосовують многороликові опори, що формують жолобчасту форму стрічки. Така форма стрічки при однакових ширині і швидкості дозволяє отримати більш ніж дворазове збільшення продуктивності в порівнянні з плоскою стрічкою при виключенні просипи вантажу.

В якості несучого (транспортуює) і тягового органу застосовуються гумовотканинні або гумовотросові стрічки з гладкою поверхнею, причому гумовотканинні - головним чином для транспортування вантажів на невеликі відстані, а гумовотросові - в магістральних конвеєрах. Гумовотканинні стрічки состо- ят з 3-8 прокладок, між якими знаходиться гума. Для захисту прокладок і тросів стрічки мають зовнішні гумові обкладки.

Тягова здатність стрічок визначається в залежності від міцності тканини прокладок і їх числа для гумотканинних стрічок і міцності тросів для гумотросових стрічок. Залежно від температури вантажу і навколишнього середовища розрізняються стрічки загального призначення, тепло і морозостійкі.

Стрічка встановлюється на роликоопори 6 верхньої гілки і 17 нижній гілки. Роликоопори верхньої гілки жолобчасті, що складаються з трьох роликів з кутом нахилу бічних роликів  $\alpha = 20-30^\circ$ , нижній гілці - прямі. Кут  $P$  визначає жолобчастих стрічки.

Нижня гілка може підтримуватися також двухроликівими роликоопорами, що складаються з двох роликів з кутами нахилу  $\alpha = 10^\circ$ , що сприяє кращому її центруванню.

Верхні і нижні роликоопори поділяються на рядові і спеціальні. Спеціальні роликоопори:

- **амортизаційні**, що встановлюються на верхній гілці стрічки в межах завантаження конвеєра і приємним для зменшення впливу на стрічку ударів вантажу; ролики таких роликоопор мають або футерування (покриття) з гуми, або набір гумових кілець;
- **футеровані роликівіопори** верхньої і нижньої гілок, які мають ролики, футеровані гумою; установка подібних роликоопор по всій довжині конвеєра покращує його роботу, особливо при транспортуванні абразивних і вологих вантажів, виключаючи при цьому налипання вантажу на ролики;
- **центруючі і регульовані**, що встановлюються на верхній і нижній гілках стрічки; вони призначені для автоматичного (центруючі) або ручного (регульовані) утримання стрічки від сходу в бік внаслідок повороту роликоопори навколо вертикальної осі. Для обмеження бокового сходження стрічки проти її бортів (кромки) верхньої і нижньої гілок встановлюються дефлекторні ролики;
- **дискові (очисні)**, що встановлюються на нижній гілці стрічки після розвантаження і очищають робочу поверхню нижньої веті стрічки від

прилип до неї вантажу; очищення нижньої гілки стрічки є однією з проблем конвеєрного транспорту.

Для забезпечення необхідного натягу стрічки на конвеєрах установлюють натягач, яке може бути гвинтовим, вантажним 1 або лебедочного. Вантажні натяжні пристрої поділяють на візкові і вертикальні. Лебідкові пристрої - тільки візкові. Гвинтові і візкові натяжні пристрої розташовуються в хвостовій частині конвеєра, вертикальні - найчастіше в середній частині. Вантажні візкові і вертикальні натяжні пристрої складаються з натяжної барабана з ходовим пристроєм (натяжна візки або натяжна рами) і вантажного пристрою, що складається з вантажів, тросів і блоків. Вантаж тросами з'єднаний з натяжна візком або натяжна рамою. Для конвеєрів великої довжини доцільно застосування лебідки для періодичного підтягування вантажу при значительном залишковому подовженні. Таке вантажне пристрій називається грузолебедочним. Вантажні пристрої можуть бути без поліспасти або з поліспастом, який збільшує натяг стрічки від вантажу пропорційно кратності поліспасти. Грузолебедочні пристрої виготовляють тільки з поліспастом. Гвинтові натяжні пристрої і натяжні візки вантажних візкових натягачів встановлюються на опорні рами. Рами вертикальних натяжних пристроїв переміщуються по направляючих. Крім зазначених вище елементів, конвеєри обладнуються також розміщеними на похилих ділянках траси уловлювачами стрічки на випадок її обриву, пристосуваннями безпеки і автоматичними пристроями управління.

Транспортуються стрічковими конвеєрами сипучі вантажі (руда, вугілля, природного каменя матеріали та ін.) Характеризуються розміром шматків, насипною щільністю, рухливістю часток, кутом природного укосу в спокої і русі, липкістю, абразивністю, хімічною агресивністю, вологістю і температурою.

Крупність сипучого вантажу визначається його гранулометричним складом або кусковатості, т. Е. Розмірами найбільших і найменших шматків. Ступінь однорідності шматків вантажу характеризується коефіцієнтом

$$K_0 = \frac{a_{\max}}{a_{\min}} \quad (1.1)$$

де  $a_{\max}$ ,  $a_{\min}$  — розміри найбільшого і найменшого шматків вантажу, мм.  
За однорідності шматків сипучі вантажі діляться на сортовані ( $K_0 \leq 2,5$ ) і рядові ( $K_0 > 2,5$ ). Сортований вантаж характеризується середнім розміром шматка.

$$a_{\text{cp}} = \frac{(a_{\max} + a_{\min})}{2} \quad (1.2)$$

Залежно від розміру шматків  $a_{\max}$   $a_{\max}$  сипучі вантажі підрозділяються на наступні групи (табл. 1.1.1).

### Групи сипучих вантажів по крупності шматків

Таблиця 1.2

Назва групи	Розмір найбільших частин шматків, мм
Особливо крупнокускові	Більше 500
Крупнокускові	500
Среднекусковая	350
Мелкокусковой	80
Зерниста	6
Порошкоподібна	0,5
Пилоподібна	0,05 и менее

Насипною щільністю  $g$ , т/м<sup>3</sup>, називається маса одиниці об'єму вільно насипаного вантажу. За насипної щільності вантажі діляться на наступні групи (табл. 1.3).

## Групи сипучих вантажів по щільності

Таблиця 1.3

Назва групи	Плотность, т/м <sup>3</sup>		Характерні приклади вантажів
	свыше	до	
Легкі	–	0,6	Торф, кокс, борошно
Средні	0,6	1,6	Кам'яне вугілля
Важкі	1,6	2,0	Гравій, щебінь Руда,
Особливо важкі	2,0	4,0	камінь

Під абразивністю розуміється здатність вантажу зношувати контактують з ним поверхні обладнання в процесі їх роботи. За ступенем абразивності вантажі діляться на чотири групи: А - неабразивні, В - малоабразивних, С - середній абразивності, Д - високою абразивності. Високої абразивністю мають кокс, коксик, агломерат і повернення агломерату, дещо меншою - кварцовий пісок, руди чорних і кольорових металів і їх концентрати. Наявність великих включень вапна в агломерате обумовлює його хімічну агресивність. На конвеєрах, що транспортують ці вантажі, помітно прискорене зношування роликкоопор і металоконструкцій.

Вологість вантажу до 4-6% сприяє зменшенню пилоутворення при транспортуванні і перевантаженнях. При великій кількості вологи сипкість вантажу зменшується, при цьому воронки перевантажувальних пристроїв забиваються і в бункерах утворюються склепіння.

## Групи сипучих вантажів по рухливості їх часток

Таблиця 1.4

Назва групи	Приклади характерних насипних вантажів	Межі кута природного укусу вантажу в спокої $j$ , град	Межі кута природного укусу вантажу в спокої $j$ , град
Легка	Апатит, пісок сухий, цемент, кокс сухий, пилеуголь, пилегліна, окатиші, окалина	30–39	10
Средня	Пісок вологий, формувальна земля (свіжа і вибита), вугілля кам'яне рядовий, вугілля буре, камінь, щебінь, вапняк, торф, шлак, железняки: магнітний, червоний, бурий, залізний концентрат	40–49	15
Мала	Глина сира, вапно гашене, амоній хлористий, селітра аміачна	50–56	20

Штучні вантажі класифікують на безпосередньо штучні (одиничні вироби, деталі, вузли машин) і тарні (ящики, бочки, мішки, контейнери). Штучні вантажі характеризуються габаритними розмірами, формою, масою одного виробу, крихкістю, температурою і інші.

### Конвеєрні стрічки

Конвеєрна стрічка є основним, найбільш дорогим і, разом з тим, найменш довговічним елементом стрічкового конвеєра. Її вартість становить близько половини загальної вартості конвеєрної установки. Амортизаційні відрахування на стрічку є одним з основних факторів, що визначають область застосування і економічну ефективність конвеєрного транспорту.

Конвеєрна стрічка є одночасно грузонесущим і тяговим органом стрічкового конвеєра [1].

### **Основні вимоги, що пред'являються до конвеєрних стрічок:**

- Висока міцність в напрямку дії тягового зусилля;
- Висока поздовжня жорсткість при розтягуванні для забезпечення малого пружного подовження при робочих навантаженнях і, отже, невеликого ходу натяжногоустройства;
- Еластичність стрічки в поздовжньому і поперечному напрямку;
- Мале залишкове подовження в процесі експлуатації;
- Висока втомна міцність;
- Опірність ударним навантаженням в зоні завантаження конвеєра і при проходженні роликкоопор;
- Стійкість обкладок стрічки проти абразивного зносу;
- Малі гістерезисна втрати при деформації стрічки на трасі конвеєра;
- Збереження геометричних і міцнісних властивостей в процесі  
длительнойексплуатації.

У деяких випадках до стрічки пред'являються особливі вимоги, наприклад, морозостійкість, теплостійкість, вогнестійкість, стійкість до агресивних середовищ і інші.

Найважливішими розрахунковими параметрами стрічки є ширина, міцність при розриві, відносне подовження і товщина обкладок. Ширина стрічки визначається кусковатості матеріалу, який може транспортуватися даної стрічкою, а спільно з прийнятою швидкістю - продуктивністю конвеєра. Міцність на розрив (максимальне зусилля, яке можна довго допустити в даній стрічці) визначає максимальну можливу довжину конвеєра, встановлену потужність, конструкцію приводу, а з урахуванням відносного подовження стрічки - конструкцію натяжної пристрої. Міцність стрічки на розрив визначається типом основи і числом прокладок або тросів в ній. Удосконалення конвеєрних стрічок йде в напрямку підвищення їх номінальної міцності при розриві, зносостійкості, вогнестійкості і зменшення відносного подовження.

Конвеєрна стрічка складається з тягового каркасу, сприймає основне навантаження, а також зовнішніх гумових обкладок і бортів, які захищають каркас від механічних пошкоджень, вологи, тепла, хімічних впливів і інших видів руйнування.

Найбільшого поширення мають конвеєрні стрічки, тяговий каркас яких складається з пакету тканинних прокладок (гумовотканинні стрічки) або утворений сталевими тросами, розташованими в один ряд і оточеними шаром еластичної гуми (гумовотросові стрічки).

### Гумовотканинні конвеєрні стрічки

Конструкція многопрокладочной гумовотканинної стрічки представлена на рис. 1.2.

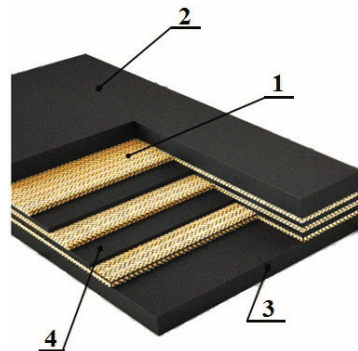


Рисунок. 1.2 - Многопрокладочная резинотканевая стрічка:

- 1 - тканинні прокладки; 2 - гумова робоча обкладка; 3 - гумова неробоча обкладка; 4 - гумовий проміжний шар

Тканинні прокладки багатошарових стрічок складаються з ниток осно- ви, розташованих уздовж стрічки, і поперечних уточнив ниток, пере- Плестан і огибають основні несучі нитки. Конструктивна і технологічна виконання основних і уточнив ниток визначає тип тканини. Тканина з основи і качку має різну міцність і подовження.

При збільшенні натягу стрічки хвилясті нитки основи стискають нитки качка; виникає при цьому подовження позначається на загальному подовженні стрічки. Тому останнім часом все більше застосування знаходять стрічки, тканинний каркас яких становить ряд прокладок з многоосновних тканин.

Тканинні прокладки тягового каркаса сучасних вітчизняних і зарубіжних гумовотканинних конвеєрних стрічок в більшості випадків виготовляють з тканин на основі синтетичних волокон, одержуваних в результаті переробки нафти, природного газу, кам'яний ного вугілля.

Після продавлювання через фільтри волокна звиваються в нитки потрібної товщини (филамент або штапельні).

Синтетичні тканини, які застосовуються для тягових прокладок сердечника, поділяються на дві основні групи:

- Поліамідні (капрон, анід, нейлон, перлон, Трелоні);
- Поліефірні (лавсан, терилен, тергаль, тетерон, тревіра). При цьому для кожної групи в дужках наведені назви одного і того ж волокна, прийняті в різних країнах в залежності від методу його отримання.

### **Гумотросові стрічки**

Останнім часом розширюється сфера застосування гумотросових стрічок, що обумовлено їх перевагами перед гумовотканинними стрічками в частині високої розривної міцності, що досягає 6300 Н / мм ширини, причому ця міцність не є граничною.

Перевагами гумотросових стрічок у порівнянні з гумовотканинними є також:

- незначне пружне подовження при робочому навантаженні (0,1- 0,25%), що дозволяє значно скоротити хід натягача і збільшити довжину конвеєра;
- менша згинальна жорсткість стрічки в поздовжньому і поперечному напрямку, що дає можливість для використання роликкоопор глибокої жолоби, а також менших діаметрів барабанів;
- можливість ефективної діагностики стану тросової основи без зупинки конвеєра;
- великий термін служби, що досягає 8 років.

Недоліками гумотросових стрічок є їх велика (в 1,5- 2 рази) маса, а також трудомісткість монтажу і стикування стрічок на конвеєрі. Основу стрічки становить резинометаллический сердечник з одного ряду паралельно розташованих сталевих латунірованая тросів, завулканізований в гуму. Основні

типи вітчизняних і зарубіжних гумотросових стрічок можна звести до чотирьох конструкцій (див. Рис. 1.3)

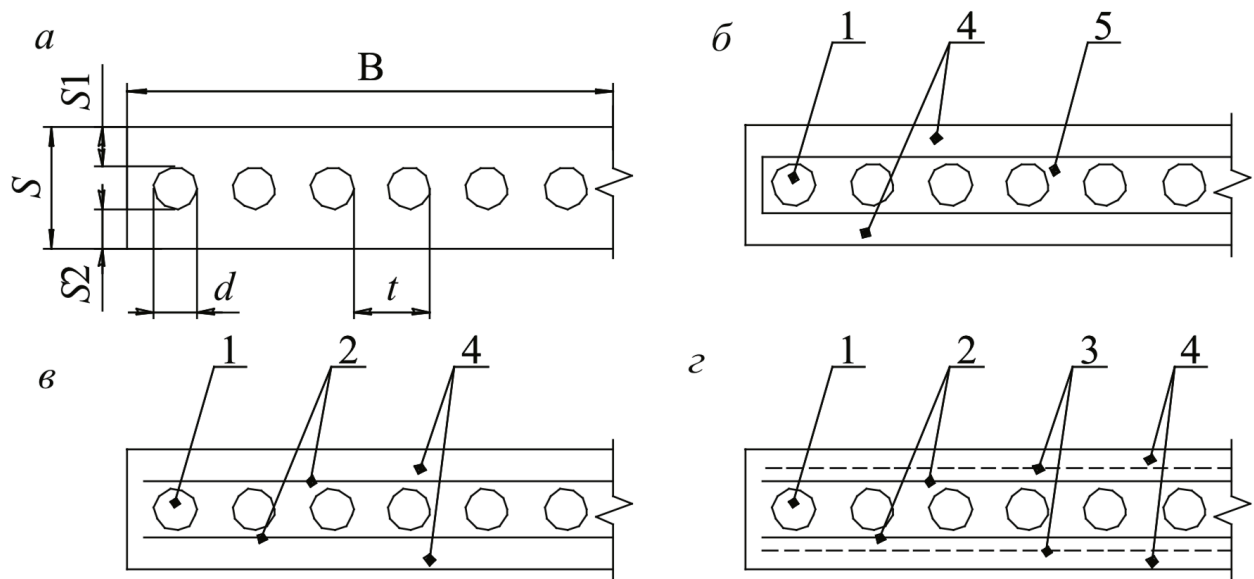


Рисунок. 1.3 - Конструкції гумотросових стрічок:

*а, б* - бестканевої; *в, г* - з тканинними прокладками. 1 - сталеві троси; 2 - тканинна прокладка; 3 - брекерного тканину; 4 - обкладочнимі гума; 5 - внутрішній гумовий шар

### Металеві конвеєрні стрічки

Металеві конвеєрні стрічки виконуються суцільними сталевими і дротяними (сітчастими).

Сталеві стрічки виготовляють з вуглецевої сталі 65 Г і 85 Г і з корозійностійкої. Товщина сталевих стрічок складає 0,8-1,0 мм, міцність на розрив 900 МПа. Сталеву стрічку з вуглецевої сталі застосовують для транспортування гарячих вантажів ( $t = 120^\circ \text{C}$ ). Конвеєри зі сталеву стрічкою застосовують на підприємствах харчової промисловості; при виробництві бетонних плит, листів пластмаси, в мийних, сушильних і холодильних установках; гладка поверхня сталеву стрічки дозволяє транспортувати на ній липкі і гарячі вантажі; кінці сталеву стрічки з'єднують внахлестку заклепками або зварюванням. Сталева стрічка на 30% легше і майже в 5 разів дешевше прогумованої (при рівній ширині і міцності).

Сітчасті (дротові) стрічки застосовуються для транспортування штучних і кускових вантажів через гартівні, нагрівальні, випалювальні та сушильні печі, для випічки хлібних і кондитерських виробів, в камерах шокової заморозки продуктів, при виробництві скляних і керамічних виробів.

### **Полімерні конвеєрні стрічки**

Полімерні конвеєрні стрічки мають рельєфну робочу поверхню і призначені для використання на похилих транспортерах, так як мають низький коефіцієнт ковзання; основна область застосування - конвеєри для упаковки, транспортування вантажів з нерівною (необробленою) поверхнею і органічних продуктів розсипом. Підбір матеріалу стрічки здійснюється в залежності від області застосування: поліпропілен, поліетилен, ацетат, нейлон.

Різні добавки до складу полімерів дозволяють підібрати ленту, яка буде відповідати необхідним умовам експлуатації: стійкість до високих (+150 ° C) або низьким (-70 ° C) температурам, вологості, абразивності або можливості порізів; стійкість до мінеральних масел і жирів, хімічна стійкість, антистатичність.

Модульні полімерні стрічки є досить перспективними і застосовуються для транспортування конвеєрами продуктів харчової, легкої, деревообробної, текстильної промисловості, поліграфічного виробництва, упаковки і в кондитерській промисловості.

Модульні стрічки (рис. 1.3.3.) Виконуються з термопластичних пластмасових модулів, які з'єднані між собою міцними стрижнями; цілісна конструкція із пластмаси забезпечує довгий термін служби, цегляна з'єднання створює можливість для складання різної ширини і забезпечує високу бічну і діагональну міцність і жорсткість.

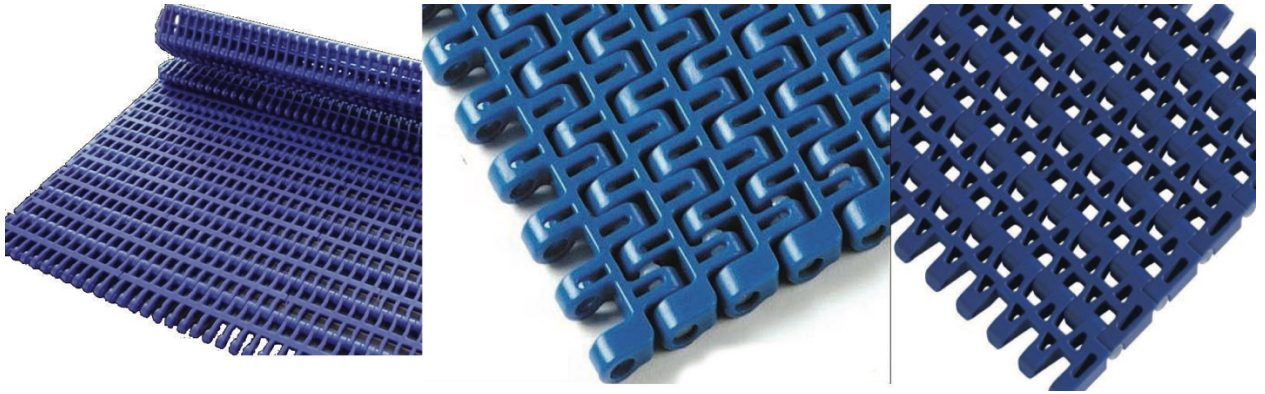


Рисунок 1.4 - Модульні полімерні стрічки

При використанні модульних стрічок є можливість зміни довжини стрічки додаванням або видаленням модулів при її поступовому витягуванні, нарощуванні або скорочення довжини самого конвеєра[1].

## **1.2 Огляд наукових досліджень в галузі стрічкових конвеєрів.**

У наш час дуже важливо слідкувати за новітніми технологіями та новинками від провідних компаній світу. Дослідники та науковці щороку покращують системи попередніх моделей та пропонують нові можливості для систем автоматизації. Тому хочу освітлити статтю яка була опублікована на початку 2020 року[2].

**Дослідження управління енергозберігаючими стрічковими конвеєрами зі змінною швидкістю стрічки відносно швидкості потоку матеріалу[2].**

Стрічковий транспортер використовується для безперервного транспортування в сучасному виробництві. Він має переваги великої місткості, великої відстані, низького енергоспоживання, низького вантажоперевезення, високої ефективності, безперебійної роботи, зручного навантаження та розвантаження, і підходить для перевезення сипучих матеріалів. Він став одним з трьох основних видів промислового транспорту разом з автомобілями та поїздами і широко використовувався у вугіллі, портах, електроенергетиці, енергетиці, гірничій промисловості, металургії, хімічній та інших галузях промисловості. На роботу стрічкового конвеєра витрачається багато електроенергії. Повідомлялося, що 41% глобальної електроенергії постачається на вугільні електростанції, а вугілля є одним з основних джерел викидів

вуглекислого газу в усьому світі. Тому вкрай необхідно зменшити споживання енергії системи стрічкових конвеєрів.

Існує два способи зменшення використання енергії стрічкового транспортера: один - підвищення продуктивності обладнання, а інший – це оптимізації параметрів роботи (наприклад, швидкості стрічки). Daijie He та ін. вивчав динаміку перехідної роботи конвеєрної стрічки під час регулювання швидкості стрічкового конвеєра та вирішив задачу оптимізації часу регулювання швидкості. Інші дослідження зосередили увагу на стрічковому конвеєрі та запропонували енергозберігаючу модель для контролю швидкості стрічкового транспортера. Через аналіз енергетичної моделі стрічкового транспортера та дробарки з кільцевим молотом, Shirong Zhang та ін. запропонувала модель енергозбереження. Проблема вищезгаданих моделей полягає в тому, що вони не приймають систему стрічкових конвеєрів як об'єкт дослідження, а лише розглядають енергоспоживання самого стрічкового конвеєра.

Прагнучи вирішити проблему високого споживання енергії при номінальній швидкості роботи стрічкового конвеєра, в цій статті проаналізовано енергоспоживання перетворювача частоти, двигуна та стрічкового конвеєра. Створено модель споживання електроенергії системи стрічкових конвеєрів і пропонує енергозберігаючу стратегію управління стрічковим конвеєром зі змінною швидкістю стрічки відносно потоку матеріалу. Для практичного випадку аналізується витрата енергії системи стрічкових конвеєрів. Результати показують, що модель споживання електроенергії в системі є точною, а стратегія управління енергозбереженням забезпечує очікувану економію енергії [2].

### **Дослідження видів і причин ушкоджень стрічки в процесі експлуатації стрічкових конвеєрів[3]**

Встановлено, що для зниження зносу і пошкоджень конвеєрної стрічки необхідно виконання наступних вимог в процесі експлуатації:

1. На стрічкових конвеєрах з шириною стрічки понад 1,0 м слід здійснювати контроль наскрізного руйнування конвеєрної стрічки, що попереджає її порив.

2. Через пробуксовки конвеєрної стрічки на приводному барабані в місцях завантаження стрічкового конвеєра можуть виникнути значні завали, що транспортується, що викликають в свою чергу підвищений знос обкладок стрічки і футерування барабана і навіть запалення стрічки, для запобігання яких конвеєр повинен оснащуватися датчиками контролю пробуксовки стрічки.

3. Пошкоджені місця конвеєрної стрічки повинні ремонтуватися (при необхідності з заміною пошкоджених ділянок) або повинна проводитися заміна стрічки цілком на нову залежно від характеру її пошкодження.

4. Стики конвеєрних стрічок повинні бути гладкими. Застосування металевих з'єднувачів стрічки не допускається.

5. Не допускається зрощування конвеєрних стрічок та привідних ременів з використанням болтів, скоб і т.п. Зрощування має виконуватися методом вулканізації або зшивкою сирицевими ремінцями.

6. Для зниження небезпеки пошкодження конвеєрної стрічки і з метою зменшення її зносу завантажувальні пристрої стрічкового конвеєра повинні забезпечувати зниження висоти падіння шматків вантажу на стрічку, повідомлення вантажному потоку при завантаженні швидкості, близької до швидкості руху стрічки по величині і напрямку, центровану подачу вантажу на стрічку, задану продуктивність, поділ вантажопотоку на фракції для створення підсипки, можливість регулювання і контролю режиму закінчення вантажопотоку, відділення негабаритів і сторонніх предметів, зменшення пилоутворення.

7. На стрічкових конвеєрах довжиною понад 80 розмірів ширини конвеєрної стрічки рекомендується проводити перевертання стрічки, що виключає забруднення роликів на холостій гілці. При цьому стрічка повинна бути зістиківана методом вулканізації, а на ділянці перевертання встановлений механізм для видалення просипи [3]

### **Стрічкові конвеєри уникаючі розсипання[4]**

Закордонні фірми пішли шляхом створення бесприсипних конвеєрів із застосуванням спеціальної дорогої стрічки - це трубчасті конвеєри і конвеєри зі спеціальною підвісний стрічкою виробництва фірм Fhoenix і Koch (Німеччина), Metco (Фінляндія), Sicon (Швеція).

Трубчасті конвеєри починають широко застосовуватися за кордоном і одинично в Україні. У машинах цього типу конвеєрна стрічка згортається в трубу, що дозволяє поліпшити санітарні умови праці, забезпечити повне збереження вантажу, виключити шкідливий вплив хімічних агресивних вантажів на металоконструкцію конвеєра, подовжуючи термін його експлуатації. З'являється можливість транспортувати матеріали під уг лом 20-25 °.

Найбільший діаметр працюючого трубчастого конвеєра - 850 мм, що відповідає ширині стрічки 1350 мм, при цьому фактичне завантаження становить 40-50% від можливої теоретичної. Так як вантаж, що перевозиться багаторазово ущільнюється на роликах, можлива втрата його якості за рахунок дроблення.

Конвеєри з підвісною стрічкою (КПЛ), створені за останні 30 років різними закордонними фірмами, в повній мірі володіють всіма достоїнствами трубчастих конвеєрів. Траса підвісних конвеєрів легко згинається у вертикальній і горизонтальній площинах а в експлуатації не були вирішені питання ремонтпридатності. В результаті, не дивлячись на свої хороші потенційні можливості, вони не набули великого поширення.

Основним недоліком існуючих до сьогоднішнього дня конструкцій трубчастих і підвісних конвеєрів є те, що вони працюють на запатентованій спеціальній і дуже дорогої стрічці а витрати при її заміні можна порівняти з ціною самого конвеєра, з чим уже зіткнулися замовники.

### 1.3 Основні вимоги до електроприводів стрічкових конвеєрів, обґрунтування та вибір системи електроприводу.

Приводний механізм служить для приведення в рух тягового і грузонесущого елементів конвеєра.

За способом передачі тягового зусилля розрізняють приводи: з передачею зусилля зачепленням; фрикційні: однобарабанні (ОДНОБЛОКОВОМУ), двох-трехбарабанні і спеціальні проміжні.

За кількістю приводів конвеєри бувають одноприводні і багато-приводні (рис. 1.3.1.). У многоприводних конвеєрів розміщують до 12 проміжних приводних механізмів з окремими електродвигунами. Використання проміжних приводів дозволяє зменшити натяг тягового елемента.

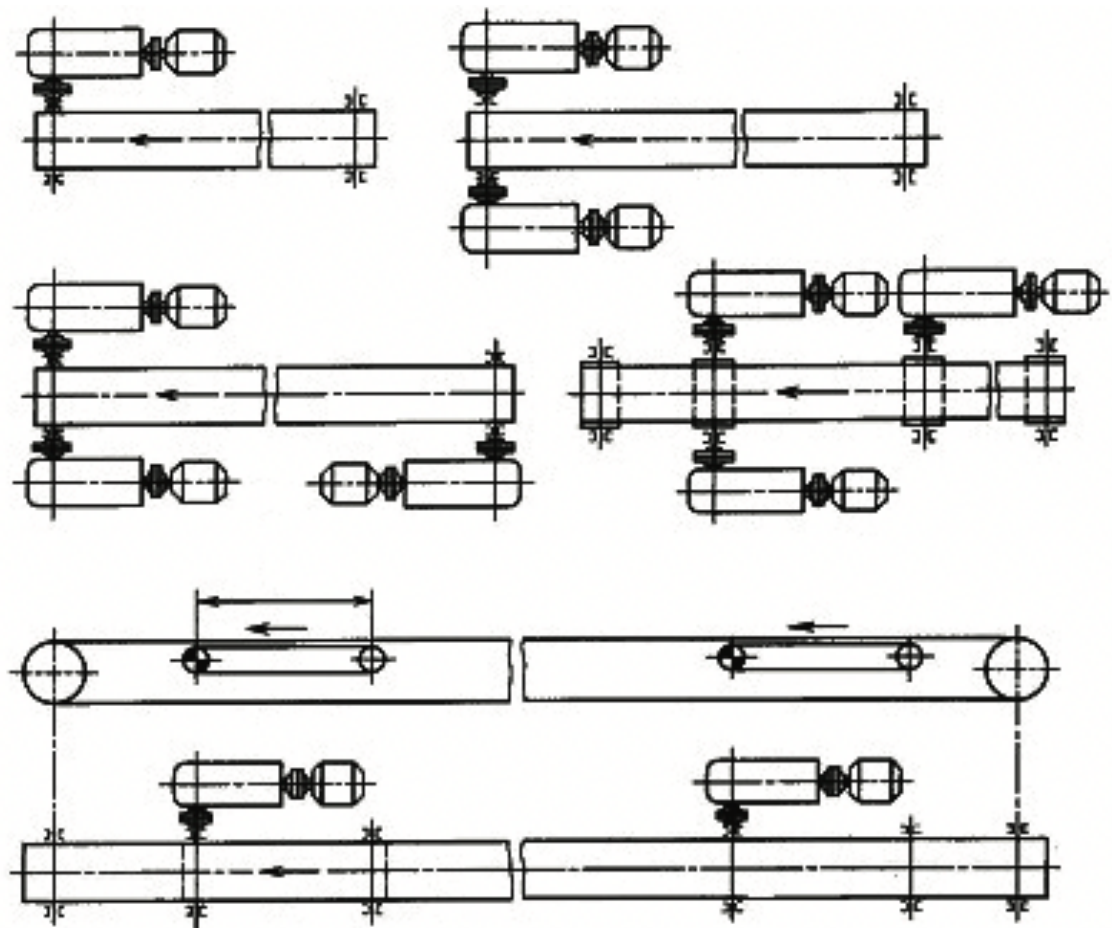


Рисунок. 1.5 Схеми розташування приводів:

*а* - з одним двигуном; *б* - з двома двигунами; *в*, *г* - з трьома двигунами;

*д* - багатопривідний з проміжними двигунами

Від розташування приводу залежить натяг тягового елемента на різних ділянках контура траси, тому привід необхідно розташовувати так, щоб зменшити найбільший натяг тягового елемента.

Застосування декількох приводів дозволяє знизити максимальний натяг гнучкого тягового елемента, тобто використовувати гнучкий тяговий елемент меншої міцності; багатоприводні конвеєри можуть мати велику довжину при правильно вибраній системі приводів.

При визначенні раціонального місця установки приводу на трасі конвеєра основним фактором є досягнення мінімального натягу тягового елемента і зниження натягу на поворотних і криволінійних ділянках, тому раціональною є установка приводу в пунктах повороту контуру траси.

Якщо конвеєр складається з однієї ділянки (горизонтального або похилого), то привід розташовується в головній частині, тобто в кінці вантажної гілки.

При русі вантажу вниз при невеликому куті нахилу руху на вантажній гілці більше, ніж на зворотній, привід в головній частині конвеєра; при русі вантажу вниз при значному куті нахилу опір руху на вантаженій гілці менше, ніж на зворотній привід в хвостовій частині конвеєра.

Для того щоб зберегти необхідний натяг тягового елемента на довгих стрічкових конвеєрах, натягач встановлюють ближче до приводу.

Оптимальна кількість приводів на конвеєрі визначається техніко-економічним розрахунком. При проектуванні і виборі оптимального числа приводів доцільним є використання меншого числа приводів підвищеної потужності. Використання прямолінійних проміжних приводів в ланцюгових конвеєрах зі складною конфігурацією траси дозволяє забезпечити найбільш оптимальне їх розташування на всій довжині контуру траси.

В даному підвісному конвеєрі будемо застосовувати кутовий привод, з постійною або змінною швидкістю. Кутовий привод може передавати тягове зусилля зчепленням за допомогою зірки або кулачкового блоку, або за

допомогою тертя. Кутовий привод із зіркою встановлюють зазвичай на повороті траси на 90 або 180 градусів.

Поширеними електроприводами конвеєрів є асинхронні електроприводи. Частотний спосіб є одним з найбільш перспективних та широко використовуваних в наш час способів регулювання частоти обертання асинхронних двигунів. [1,6]

Таким чином, система електроприводу повинна мати наступні функції:

- плавний запуск та гальмування конвеєра;
- автоматичний контроль швидкості руху ланцюга конвеєра;
- аварійне відключення конвеєра при перевищенні швидкості вставки верхнього рівня, або при зниженні нижче встановленого рівня, також відключення конвеєра за відсутності на ньому вантажу або при перевантаженні;
- автоматичне регулювання продуктивності лінії - зниження швидкості при недовантаженні і збільшення перевищенні вставки навантаження;
- діагностика стану лінії зв'язку;
- діагностика працездатності блоків керування;
- сигналізація про аварійний режим;
- передача інформації про стан конвеєрної лінії диспетчерові.

### **Загальні вимоги до електроприводу конвеєрів.**

За технологічними умовами роботи конвеєри здебільшого, не вимагають регулювання швидкості. Цей тип конвеєрів працює в тривалому режимі з постійною швидкістю.

Вимоги до електроприводу конвеєрів обумовлені необхідністю отримання базових процесів (пуску, рух на усталеній швидкості, гальмування) і декількох налагоджувальних та допоміжних режимів, та відпрацювання надійної безперервної роботи стрічкового конвеєру.

Головні потреби, електроприводу транспорту безперервного руху такі:

- Забезпечення плавного пуску двигуна з обмеженим значенням моменту і прискорення з ціллю:

1. Не швидке проходження відстані зазорів в зубчастих передачах в перші секунди рушання;
2. обмеження динамічних зусиль тягового органу.
  - Забезпечення великих моментів при перших секундах його запуску, оскільки значення опору тертя у стані спокою орієнтовно у 1.5 рази перевищують значення опору тертя при русі, а також через можливу наявність бруду в ходових частинах механізмів та застигання мастила.
  - Забезпечення сталого режиму із заданою швидкістю руху робочого органу.

Характерною особливістю конвеєрів є значний момент опору спокою і значна зведена маса при запуску навантаженої стрічки конвеєра. Запуск, як правило, проводиться при порожній стрічці. Але привід повинен бути в змозі запустити і завантаженої конвеєр. Запуск конвеєрів незалежно від завантаженості стрічки повинен бути плавним, щоб запобігти пробуксовку приводного барабана через що часто виникає при цьому пожежа стрічки.

### **Порівняльна оцінка приводів**

#### **Асинхронний привод з контактним регулятором ковзання**

В даний час на шахтах і рудниках широко поширений і до сих пір застосовується привод змінного струму з АД із фазним ротором, керований реостатом в ланцюзі ротора. Основні переваги цього приводу полягають в його структурній простоті, малої вартості обладнання та будівельно-монтажних робіт. Перевагою асинхронного приводу є не складній процес обслуговування, незначні витрати часу на відновлення руху механізму при поломках.

Використання динамічного гальмування в значній мірі покращує управління асинхронним приводом:

- забезпечує плавність зміни і додатки навантажень на елементи машин;
- створює можливість глибокого регулювання швидкості при спуску вантажів, отримання стійкої зниженої швидкості, що спрощує ручне управління приводом.

Недоліки приводу з асинхронним двигуном з фазним ротором і

роторним реостатом досить істотні і полягають в наступному:

- Асинхронний привод не володіє регульовальними якостями управління і швидкістю при різних навантаженнях. Недостатніми є і природні гальмівні характеристики асинхронного двигуна, тому що неможливо здійснити електричне гальмування на швидкості нижче синхронної при нормальному включенні двигуна. Для управління асинхронним двигуном підйомної машини вимушено використовуються різні характеристики при пуску, уповільнення і при управлінні на проміжних швидкостях. Низька керованість приводу ускладнює здійснення автоматизації підйомних установок. Практично всі підйомні установки з асинхронним приводом з реостатом у ланцюзі ротора управляються оператором підйому вручну, при цьому присутній і грає велике значення людський фактор, який в 90% випадків є причиною аварій на підйомних установках.

- Застосування асинхронного приводу на підйомах значної потужності при збільшеному часу роботи на знижених швидкостях характеризуються високими тепловими втратами в роторному ланцюзі двигуна і витратою електроенергії. Регулювання швидкості супроводжується великими втратами в роторному реостаті.

- Асинхронний привод має низький  $\cos \varphi$  : на скіпових підйомах він становить 0,6-0,65, на клітьових - 0,35-0,5 відповідно до унікальності робочих діаграм.

Навіть при численних негативних факторах АД з реостатом в роторному ланцюзі двигуна до сих пір широко використовується на малозавантажених клітьових підйомах і допоміжних стовбурах.

### **Привод постійного струму по системі ТП-Д**

Завдання подальшого підвищення ефективності роботи шахтних підйомних установок, їх продуктивності і безпечної експлуатації не можуть бути вирішені без вдосконалення як самих підйомних машин, так і їх електроприводів.

За останні часи для такого руху(підйому) найбільшого поширення набули електроприводи по системі ТП-Д. Це обумовлено простим і економічним перетворенням електроенергії змінного струму в керовану енергію постійного

струму, і, як наслідок, розвиток цього напрямку в продукції електротехнічної промисловості - силові трансформатори для перетворювачів постійного струму, спеціальні двигуни постійного струму, розроблені для роботи з ТП.

Головні переваги приводу ТП-Д це висока швидкодія, отримання потрібних характеристик і точність управління, завдяки яким полегшуються процеси управління. Завдяки високій керованості приводу, по системі ТП-Д просто здійснити автоматизацію руху підйомної машини. Електропривод підйомної установки на базі тиристорного перетворювача дозволяє:

- сформувати оптимальну діаграму швидкості, тобто що забезпечує максимальну продуктивність за умови неперевищення допустимого рівня динамічних навантажень в елементах підйомної установки;

- перед зупинкою знижувати швидкість, що забезпечує необхідну точність зупинки підйомних посудин в точках зупинки і знижує динамічні навантаження в момент стопоріння машини механічним гальмом;

- дозувати з необхідною точністю момент підйомного двигуна при нульовій швидкості, що дозволяє починати рух при повністю загальмованого машині. До недоліків тиристорного приводу за системою ТП-Д в застосуванні до шахтних підйомних машин слід віднести наступне;

- в приводі за системою ТП-Д з-за живленням двигуна та іншого обладнання пульсуючим струмом збільшуються електричні втрати, знижується наведений ККД;

- привод по системі ТП-Д піднімальних систем характеризується низькою потужністю. На скіпових машинах з короткими діаграмами руху він виявляється не більше 0,6-0,65, а для багатогоризонтних клітьових машин з роз'їздами між горизонтами на зниженій швидкості - не більше 0,35. Для поліпшення  $\cos \phi$  необхідне застосування додаткового обладнання, обсяг якого зростає в перший період експлуатації підйомів, коли номінальна швидкість, як правило не використовується, є мала ступінь заповнення діаграми швидкості і  $\cos \phi$  ще більш зменшується.

- привод по системі ТП-Д володіє деякими недоліками по відношенню до

мережі живлення. При роботі ТП генеруються вищі гармоніки, негативно впливають на інші електроприймачі. Для обмеження цих впливів працюючого ТП на живильну мережу необхідне виконання деяких умов при проектуванні системи електропостачання підприємства і самого електроприводу, а саме:

- вибір системи електропостачання з найбільшим значенням потужності короткого замикання на живильних шинах ТП. Для знову споруджуваних підприємств при проектуванні системи електропостачання необхідно приймати економічно обгрунтований струм к.з. на живильних шинах ТП, відповідно вибирати потужність живлять трансформаторів і типи струмообмежуючих реакторів таким чином, щоб співвідношення потужності к.з. на живильних шинах підстанції до потужності ТП було не менше 50-70;

- вибір многопульсної схеми випрямлення. У перетворювачах DCS 600 застосовуються дві схеми випрямлення - 6-ти пульсая (одинарний міст) і 12-пульсая (подвійний міст).

- застосування фільтрів і регульованих пристроїв, що компенсують. Рекомендується при реконструкції діючих підйомних установок, де зміна потужності живильної підстанції економічно не обгрунтоване. Характерні особливості 12-пульсної технології:

- Привод складається з двох 6-пульсної перетворювачів;

- Згоден трансформатори з з'єднанням обмоток трансформаторів трикутник / трикутник і трикутник / зірка забезпечують на перетворювачах напруга з фазовим зрушенням векторів на 30°. Найбільш суттєві переваги 12-пульсної технології:

- Наведений рівень гармонік на стороні змінної напруги для 12-пульсної схеми значно нижче в порівнянні з 6-пульсної.

- можливість аварійної роботи з одним перетворювачем в разі несправності в іншому перетворювачі. Аварійна робота можлива з 50% навантаженням на двигуні.

- Підвищення ефективності (ККД) двигуна за рахунок зниження змінної складової постійної напруги.

## **Приводи змінного струму по системі ПЧ-АД і ПЧ-СД.**

Головною перевагою цього електроприводу вважалося застосування менш дорогого і більш надійного синхронного двигуна замість двигуна постійного струму.

Фірма АВВ розробила і активно впроваджує на механізмах вимагають високу якість управління (металургія, підйомно-транспортне обладнання) нове покоління привод змінного струму побудованих за системою перетворювач частоти з ланкою постійного струму - двигун змінного струму. Рекомендації по вибору систем приводів для підйомних установок В даний час немає однозначного рішення щодо вибору системи електроприводу до кожного типу підйомної машини. Зменшення розглянутих варіантів електроприводів можливо за рахунок використання при порівнянні таких критеріїв:

- відносна вартість приводів;
- необхідна потужність приводу і максимальний момент при пуску;
- рівень керованості в зв'язку з призначенням і технологією роботи підйомної установки. Розглянемо більш докладно варіанти електроприводу по пунктах які ми розглянули.

При розрахунку техніко-економічного порівняння ЕП одним з основних критеріїв є загальні витрати на обладнання, в які необхідно включити вартість електрообладнання, будівельні витрати. За цим критерієм найменших витрат потребує АД з реостатним управлінням Але використання такого типу електроприводу виправдано на малозавантажених клітьових і допоміжних підйомах, де при відносно малому часу роботи підйому неекономічність і низька керованість приводу не позначаються на експлуатаційних витратах.

Область застосування редукторного приводу обмежується допустимим крутним моментом на тихохідному валу редуктора. Під час вибору серед безредукторного типу ЕП та між редукторним, потрібно звернути увагу на додаткові витрати при безредукторному варіанті і вагомій перевазі під час використання установи. Це дозволяє рекомендувати безредукторний ЕП майже в усіх конструкціях підйомних установок при потужності двигуна понад 1000 кВт.

На барабанних підйомних установка потужність двигуна якій приєднаний до приводного барабану може визначатись певним значенням моменту при пуску. При однакових умовах підйому (висота, маса вантажу, що піднімається) підйомні установки із фрекційним шківом потребують у декілька разів меншої потужності у момент пуску якщо порівнювати із барабанною машиною за рахунок загальної врівноваженості системи підйому.

Застосування приводу змінного струму з перетворювачами частоти може виявитися доцільним в наступних випадках:

- потужність шахтної підстанції відносно невелика і не допускає пускових навантажень від ТП постійного струму;
- привод підйомних машин віддалені від живильної і розподільної підстанції, що живлять лінії мають велику протяжність і опір, при яких застосування системи ТП-Д викликало б неприпустимі падіння і коливання напруги мережі;
- до живильної підстанції підключається значне число приводів, які впливають на електромережу погіршенням гармонійного складу.

У табл. 1.5 наведено можливі межі застосування різних систем електроприводу.

Таблиця 1.5 (а)

Система ЕП	Потужність приводу, кВт	Вид підйому		
		Клітьовий		Скіповий
		Допоміжний	Головний	
Асинхронний однодвигунний	315- 1250	+	-	-
Асинхронний двухдвигунний	630- 2500	+	-	-
ТП-Д або ПЧ- АД ред. однодвиг.	315- 1600	-	+	+

Таблиця 1.5 (б)

ТП-Д або ПЧ- АД ред. дводвиг.	630- 3200	-	+	+
ТП-Д або ПЧ безредукторний	630- 6300	-	+	+
ПЧ-СД безредукторний	>6300	-	+	+

Враховуючи наведені вище вимоги, можемо зробити висновок, що до даного технологічного агрегату найбільш прийнятною буде система «перетворювач частоти – асинхронний двигун». Яка дозволяє сформуванню ЕМС і розрахувати її елементи.

#### **Висновки до розділу**

На основі аналітичного огляду науково-технічного огляду літератури, вивчення режимів роботи конвеєрних систем, а також з урахування вимог до електроприводів систем безперервного транспорту з гнучким тяговим елементом виконано обґрунтування та вибір в якості електроприводу системи ПЧ-АД як найбільш раціональною.

Отримані результати дозволяють, визначити структуру електромеханічної системи конвеєра та забезпечити розрахунок та вибір його елементів.

## 2 ТЯГОВИЙ РОЗРАХУНОК КОНВЕЄРА, ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА

### 2.1 Схема та параметри конвеєра

Даний стрічковий конвеєр призначений для транспортування рядового кам'яного вугілля середнього розміру. Конвеєр похило-горизонтальний, розвантаження фронтальне через двох барабанний скидний візок. Додова тривалість роботи конвеєра не перевищує 13 год. Конвеєр встановлений на відкритому повітрі, із важкими умовами експлуатації.

Розрахункова продуктивність конвеєра  $Q = 700$  т / год;

Розміри ділянок траси:

$L_1 = 190$  м;  $L_2 = 150$  м;  $L_3 = 14$  м;  $L_4 = 146$  м;  $L_5 = 180$  м;  $L_6 = 20$  м;

$H = 20$  м;  $H_1 = 0,8$  м;  $h_t = 1,65$  м.

Розмір типового шматка вантажу  $a' = 160$  мм;

Насипна щільність вантажу  $\rho = 0,8$  т / м<sup>3</sup>;

Кут природного нахилу в спокої  $\varphi = 37^\circ$ ; кут природного нахилу вантажу на стрічці  $\varphi_d = 20^\circ$ .

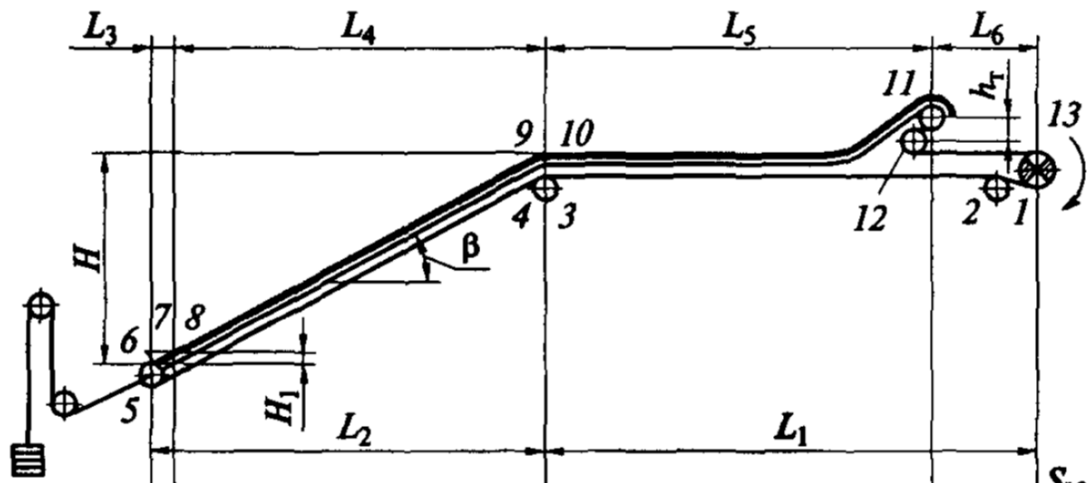


Рисунок 2.1- Конвеєр похило-горизонтальний

Привід конвеєра - однобарабанний з чугунним барабаном, кут обхвату  $\alpha = 210^\circ$

Розрахунки виконано з використанням методики наведених в [1].

Кут нахилу частини траси:

$$\beta = \left( \frac{H}{L20} \right) = \text{arctg} \left( \frac{20}{150} \right) = 0.1326. \quad (2.1)$$

або  $\beta = 7.59^\circ$ . У приводного барабану встановлений відхиляючий барабан, що збільшує кут обхвату стрічки, на перегині нижньої гілки стрічки - поворотний барабан, а на перегині верхньої гілки роликів батарея. На верхній гілці стрічки застосовані трьох роликів опори з кутом нахилу бічних роликів  $\alpha_{ж} = 30^\circ$

## 2.2 Тяговий розрахунок конвеєра

Ширина стрічки визначається наступним чином

$$\begin{aligned} B &= 1.1 \left( \sqrt{\frac{Q}{K_{\Pi} \cdot v \cdot \rho \cdot K_{\beta}} + 0.05} \right) = \\ &= 1.1 \left( \sqrt{\frac{700}{550 \cdot 2.5 \cdot 0.8 \cdot 0.9} + 0.05} \right) = 0.98 \end{aligned} \quad (2.2)$$

де  $K_{\Pi}$  - коефіцієнт продуктивності

$v$  - швидкість руху стрічки

$K_{\beta}$  - коефіцієнт зменшення розміру вантажу на похилому конвеєрі

Ширину стрічки приймаємо  $B = 1000$  мм

Тягове зусилля в попередньому розрахунку

$$W_0 = k_0 \cdot L \cdot g \left( (q + q_0 + q_p) \cdot \omega + (q_0 + q'_p) \omega' \right) + q \cdot g \cdot H \quad (2.3)$$

де  $k_0$  - узагальнений коефіцієнт місцевих опорів;  $q$  - розподілена маса насипного вантажу:

$$q = \frac{Q}{3.6 \cdot v} = \frac{700}{3.6 \cdot 2.5} = 77.7 \text{ кг/м} \quad (2.4)$$

$q_0$  - розподілена маса стрічки при числі прокладок  $i_{\Pi} = 4$ , що визначається за наступною формулою:

$$\begin{aligned} q_0 &= 1.1 \cdot 10^{-3} \cdot \beta \cdot (\delta_0 \cdot i + \delta_1 + \delta_2) = \\ &= 1.1 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot (1.1 \cdot 4 + 6 + 2) = 13.64 \text{ кг/м} \end{aligned} \quad (2.5)$$

$q_p = 21$  кг/м - розподілена маса обертових частин роликів опор робочої гілки;

$q'_p = 9.2$  кг/м - розподілена маса обертових частин роликів опор холостий гілки;

$\omega = 0.04$ ;  $\omega' = 0.03$  - значення коефіцієнтів опору відповідно робочої і холостої віток.

$$\begin{aligned} W_0 &= 1.5 \cdot 340 \cdot 9.81 \cdot (77.7 + 13.64 + 21) \cdot 0.04 + \\ &+ (13.64 + 9.2) \cdot 0.03 + 77.7 \cdot 9.81 \cdot 20 = 41185 \text{ Н}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Максимальний натяг стрічки в попередньому розрахунку визначається за формулою:

$$S_{\max} = k_3 \cdot W_0 \cdot \frac{e^{\mu\alpha}}{e^{\mu\alpha} - 1} = 1.3 \cdot 41185 \cdot \frac{3}{3 - 1} = 80311 \text{ Н} \quad (2.7)$$

де  $k_3 = 1.3$  - коефіцієнт запасу зчеплення стрічки з барабаном;  
 $e^{\mu\alpha} = 3$  - тяговий фактор.

Число прокладок тягового каркасу в стрічці:

$$i = \frac{S_{max} \cdot C_{\Pi}}{k_p \cdot B} = \frac{80311 \cdot 9}{100 \cdot 1000} = 7.23 \text{ кг/м} \quad (2.8)$$

де  $C_{\Pi} = 9$  - запас міцності стрічки;

$k_p = 10$  - міцність при розриві однієї прокладки, Н / мм.

Число прокладок тягового каркасу в стрічці приймаємо:  $i = 8$

Діаметр приводного барабана:

$$D_{\Pi} \geq K_1 \cdot K_2 \cdot i = 160 \cdot 0.85 \cdot 8 = 1088 \text{ мм} \quad (2.9)$$

де  $K_1 = 160$  - коефіцієнт, що враховує міцність прокладок;

$K_2 = 0,85$  - для однобарабанного приводу.

Відповідно до нормального ряду діаметр приводного барабану приймаємо:

$$D_{\Pi} = 1250 \text{ мм}$$

### **Натяги стрічки у характерних точках траси:**

Натяг траси конвеєра у точці 1

$$S_1 = S_{sb} \quad (2.10)$$

Натяг траси конвеєра у точці 2

$$S_2 = S_1 \cdot k_{1,2} = S_1 \cdot 1.03 \quad (2.11)$$

Натяг траси конвеєра у точці 3

$$\begin{aligned} S_3 &= S_2 + (q_0 \cdot q_p') \cdot g \cdot L_1 \cdot \omega = \\ &= S_1 \cdot 1.03 + (13.64 + 9.2) \cdot 9.81 \cdot 190 \cdot 0.04 = \\ &= S_1 \cdot 1.03 + 1702 \text{ Н} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Натяг траси конвеєра у точці 4

$$S_4 = S_3 \cdot k_{3,4} = (S_1 \cdot 1.03 + 1702) \cdot 1.03 = S_1 \cdot 1.061 + 1754 \text{ Н} \quad (2.13)$$

Натяг траси конвеєра у точці 5

$$\begin{aligned} S_5 &= S_4 + (q_0 + q_p') \cdot g \cdot L_2 \cdot \omega - q_0 \cdot g \cdot H = \\ &= S_1 \cdot 1.061 + 1754 + (13.64 + 9.2) \cdot 9.81 \cdot 150 \cdot 0.04 - \\ &\quad - 13.64 \cdot 9.81 \cdot 20 = S_1 \cdot 1.061 + 422 \text{ Н} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Натяг траси конвеєра у точці 6

$$S_6 = S_5 \cdot k_{5,6} = (S_1 \cdot 1.061 + 422) \cdot 1.03 = S_1 \cdot 1.061 + 434 \text{ Н} \quad (2.15)$$

Натяг траси конвеєра у точці 7

$$\begin{aligned} S_7 &= S_6 + (q_0 + q_p') \cdot g \cdot L_3 \cdot \omega = \\ &= S_1 \cdot 1.09 + 434 + (q_0 + q_p') \cdot 9.81 \cdot 14 \cdot 0.04 \\ &= S_1 \cdot 1.09 + 560 \text{ Н} \end{aligned} \quad (2.16)$$

**Опір в пункті загрузки:**

$$\begin{aligned} W_3 &= \frac{Q \cdot f_l \cdot (v - v_1)}{3.6 \cdot (f_l \cdot tg\beta - k_6 f_6)} = \frac{700 \cdot 0.63 \cdot (2.5 - 0.8)}{3.6 \cdot (0.63 \cdot tg(132) - 0.25 \cdot 0.5)} = \\ &= 559 \text{ Н} \end{aligned} \quad (2.17)$$

де  $v_1 = 0.8$  м/с – швидкість вантажу в напрямку транспортування;

$k_6 = 0.25$  – коефіцієнт бокового тиску вантажу на направляючі борту;

$f_l = 0.63$ ,  $f_6 = 0.5$  – коефіцієнт тертя вантажу об стрічку і борти навантажувального лотка.

Натяг траси конвеєра у точці 8

$$S_8 = S_6 + W_3 = S_1 \cdot 1.09 + 560 + 559 = S_1 \cdot 1.092 + 1119 \text{ Н} \quad (2.18)$$

Натяг траси конвеєра у точці 9

$$\begin{aligned}
 S_9 &= S_8 + (q_0 + q_p' + q) \cdot g \cdot L_4 \cdot \omega - (q_0 + q) \cdot g \cdot (H - H_1) = \\
 &= S_1 \cdot 1.092 + 1119 + (13.64 + 9.2 + 77.7) \cdot 9.81 \cdot 146 \cdot 0.04 + \\
 &\quad + (13.64 + 77.7) \cdot 9.81 \cdot (20 - 0.8) = S_1 \cdot 1.092 + 24102 \text{ Н}
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

Натяг траси конвеєра у точці 10

$$\begin{aligned}
 S_{10} &= S_9 \cdot k_{10.9} = (S_1 \cdot 1.092 + 24102) \cdot 1.03 = \\
 &= S_1 \cdot 1.125 + 24826 \text{ Н}
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Натяг траси конвеєра у точці 11

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= S_{10} + (q_0 + q_p + q) \cdot g \cdot L_5 \cdot \omega = \\
 &= S_1 \cdot 1.125 + 24826 + (13.64 + 9.2 + 77.7) \cdot 9.81 \cdot 180 \cdot 0.04 = \\
 &= S_1 \cdot 1.125 + 31932 \text{ Н}
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

Натяг траси конвеєра у точці 12

$$\begin{aligned}
 S_{12} &= (S_{11} + q + g + h_t) \cdot k_6^2 = \\
 &= (S_1 \cdot 1.125 + 31932 + 77.7 + 9.81 + 1.65) \cdot 1.03^2 \\
 &= S_1 \cdot 1.194 + 35213 \text{ Н}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

Натяг траси конвеєра у точці 13

$$\begin{aligned}
 S_{13} &= S_{12} + (q_0 + q_p + q) \cdot g \cdot L_6 \cdot \omega = \\
 &= S_1 \cdot 1.194 + 35213 + (13.64 + 9.2 + 77.7) \cdot 9.81 \cdot 20 \cdot 0.04 \\
 &= S_1 \cdot 1.194 + 36002 \text{ Н}
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

Позначимо  $A_s = 1.194$ ,  $B_s = 36.002 \text{ кН}$ , тоді

$$S_{\text{наб}} = S_{\text{сб}} \cdot 1.194 + 36.002 \text{ кН} \quad (2.24)$$

З умови непрослизання стрічки на барабані

$$S_{\text{сб}} = \frac{K_{\text{цц}} \cdot B_s}{e^{\mu\alpha} - K_{\text{цц}} \cdot A_s} = \frac{1.3 \cdot 36002}{3 - 1.3 \cdot 1.194} = 32.326 \text{ кН} \quad (2.25)$$

$$S_{\text{наб}} = S_{\text{сб}} \cdot \frac{e^{\mu\alpha}}{S_{\text{сб}}} = 32326 \cdot \frac{3}{1.3} = 74.600 \text{ кН} \quad (2.26)$$

Вирахуємо натяг стрічки у всіх розглянутих точках:

$$\begin{aligned} S_{\text{сб}} &= 32.326 \text{ кН} \\ S_2 &= 1.03 \cdot 32.32 = 33.29 \text{ кН} \\ S_3 &= 1.03 \cdot 32.32 + 1.70 = 34.99 \text{ кН} \\ S_4 &= (1.03 \cdot 32.32 + 1.03) \cdot 1.03 = 36.091 \text{ кН} \\ S_5 &= 1.061 \cdot 32.32 + 0.42 = 34.712 \text{ кН} \\ S_6 &= 1.092 \cdot 32.32 + 0.43 = 35.763 \text{ кН} \\ S_7 &= 1.092 \cdot 32.32 + 0.56 = 35.905 \text{ кН} \\ S_8 &= 1.092 \cdot 32.32 + 1.11 = 36.506 \text{ кН} \\ S_9 &= 1.092 \cdot 32.32 + 24.10 = 59.393 \text{ кН} \\ S_{10} &= 1.125 \cdot 32.32 + 24.82 = 61.180 \text{ кН} \\ S_{11} &= 1.125 \cdot 32.32 + 31.94 = 68.30 \text{ кН} \\ S_{12} &= 1.194 \cdot 32.32 + 35.21 = 73.80 \text{ кН} \\ S_{13} &= 1.194 \cdot S_1 + 36.00 = 74.59 \text{ кН} \end{aligned} \quad (2.27)$$

За отриманими даними побудуємо діаграму натягу стрічки.



Рисунок 2.2 – Діаграма натягу стрічки конвеєра

Мінімальний натяг стрічки з умови забезпечення допустимої стріли провисання стрічки на навантаженій лінії вирахуємо за формулою

$$\begin{aligned}
 S_{min}^{rp} &\geq K_1 \cdot (q_0 + q) \cdot g \cdot l_p \cdot \cos(\beta) = \\
 &= 8 \cdot (13.64 + 77.7) \cdot 9.81 \cdot 1.3 \cdot \cos(0.132) = 9245 \text{ H}
 \end{aligned}
 \tag{2.28}$$

де  $K_1 = 8$  для загальної довжини конвеєра більше 100м.

Найменший натяг стрічки на навантаженій гілці в точці 6 дорівнює 35.763 кН, що більше мінімально необхідної величини.

Фактичний запас міцності стрічки:

$$C_{\Pi} = \frac{B \cdot i \cdot \sigma_p}{S_{\text{наб}}} = \frac{1000 \cdot 8 \cdot 100}{74600} = 10.72 > C_{\Pi} = 9 \quad (2.29)$$

Фактичний запас міцності стрічки більший за значення мінімального запасу, тому стрічка підібрана вірно.

### 2.3 Вибір двигуна

Тягове зусилля на приводному барабані:

$$W_0 = S_{\text{наб}} - S_{\text{сб}} = 74600 - 32326 = 42.270 \text{ кН} \quad (2.30)$$

**Потужність двигуна для приводу конвеєра:**

$$P_{\text{дв}} = \frac{K_3 \cdot W_0 \cdot v}{\eta_0} = \frac{1.3 \cdot 42273 \cdot 2.5}{0.92} = 149.335 \text{ кВт} \quad (2.31)$$

де  $K_3 = 1,1$  - коефіцієнт запасу потужності;  $\eta_0 = 0,92$  - ККД приводу з урахуванням втрат на приводному барабані.

Виберемо двигун 4А355S6У3 з частотою обертання  $n_{\text{дв}} = 985$  об/хв,  $P_{\text{дв}} = 160$  кВт, момент інерції ротора = 7.33 кг / м<sup>2</sup>.

Кутова швидкість обертання валу електродвигуна:

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{дв}}}{30} = \frac{3.14 \cdot 985}{30} = 103 \text{ рад/с} \quad (2.32)$$

Крутний момент двигуна:

$$T_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega_{\text{дв}}} = \frac{160000}{103} = 1551 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.33)$$

Пусковий момент двигуна

$$T_{\text{дв.п}} = 1.5 \cdot T_{\text{дв}} = 1.5 \cdot 1551 = 2327 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.34)$$

Для з'єднання валів двигуна і редуктора виберемо муфту МУВП-4000, здатну передавати крутний момент в  $2330 \text{ Н} \cdot \text{м}$  і має момент інерції  $J_M = 0.8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Частота обертання валу приводного барабана

$$n_{\phi} = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D_{\Pi}} = \frac{60 \cdot 2.5}{3.14 \cdot 1.250} = 38.19 \text{ об/хв} \quad (2.35)$$

Необхідне передатне число відносно приводу обрахуємо за наступною формулою:

$$u_0 = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\phi}} = \frac{985}{38.19} = 25.7 \quad (2.36)$$

Виходячи з необхідного передатного відношення і потужності приводу виберемо редуктор Ц2-500 з передавальним відношенням  $u = 25$

Фактична швидкість стрічки:

$$v_{\text{дв}} = \frac{\pi \cdot D_{\Pi} \cdot n_{\text{дв}}}{60 \cdot u_{\phi}} = \frac{3.14 \cdot 1.250 \cdot 985}{60 \cdot 25} = 2.57 \text{ м/с} \quad (2.37)$$

Визначимо фактичну продуктивність конвеєра:

$$\begin{aligned} Q_{\phi} &= K_{\Pi} \cdot K_{\beta} \cdot (0.9 \cdot B - 0.05)^2 \cdot v_{\phi} \cdot \rho = \\ &= 550 \cdot 0.9 \cdot (0.9 \cdot 1 - 0.05)^2 \cdot 2.57 \cdot 0.8 = 737.7 \text{ т/год} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Статичний опір при пуску :

$$\begin{aligned} W_{\text{ст.п}} &= k_{\text{п.с}} \cdot (W_0 - q \cdot g \cdot H) + q \cdot g \cdot H = \\ &= 1,2 \cdot (42273 - 77,7 \cdot 9,81 \cdot 20) + 77,7 \cdot 9,81 \cdot 20 = \\ &= 47676 \text{ Н} \end{aligned} \quad (2.39)$$

Статичний момент при пуску :

$$T_{\text{ст.п}} = \frac{W_{\text{ст.п}} \cdot D_{\text{п}}}{2 \cdot u_{\phi} \cdot \eta_0} = \frac{47676 \cdot 1250}{2 \cdot 25 \cdot 0,92} = 1295 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.40)$$

де  $k_{\text{п.с}} = 1,2$  - коефіцієнт збільшення сили опору при пуску.

Час пуску за формулою

$$t_{\text{п}} = \frac{J_0 \cdot \omega_{\text{дв}}}{(T_{\text{дв.п}} - T_{\text{ст.п}}) \cdot k_y} = \frac{26,21 \cdot 103}{(2326 - 1295) \cdot 0,7} = 3,74 \text{ с} \quad (2.41)$$

де  $k_y = 0,7$  - коефіцієнт, що враховує пружне подовження гумовотканинної стрічки при пуску;

$J_0$ - приведений момент інерції поступально і обертово-рухомих частин вантажу, конвеєра і приводу, визначений наступною формулою:

$$\begin{aligned} J_0 &= \frac{(2 \cdot q_0 + q) \cdot (1 + K_{\text{и}}) \cdot D_{\text{п}}^2 \cdot L}{4 \cdot u_{\phi}^2 \cdot \eta_0} + (1 + \psi)(J_p + J_m) = \\ &= \frac{(2 \cdot 13,64 + 77,7) \cdot (1 + 0,08) \cdot 340 \cdot 1250^2}{4 \cdot 25^2 \cdot 0,92} + \\ &\quad + (1 + 0,15)(7,33 + 0,8) = 26,21 \text{ кг/м}^2 \end{aligned} \quad (2.42)$$

Тут  $K_{\text{и}} = 0,08$  - коефіцієнт, що враховує інерцію обертових мас роликів і барабанів конвеєра;

$\psi = 0,15$  - коефіцієнт, що враховує маси деталей приводу, що обертаються повільніше, ніж вал електродвигуна.

Мінімально допустимий час пуску конвеєра:

$$t_{п min} = \frac{v}{J_{п}} = \frac{2.57}{0.2} = 12.8 \text{ с} \quad (2.43)$$

де  $J = 0,2$  - допустиме прискорення пуску.

Для запуску конвеєра необхідно застосування відповідної електронних схем або муфт ковзання, відрегульованих на необхідний пусковий момент.

Гальмівний момент на валу двигуна, що перешкоджає зворотньому руху стрічки під дією сил ваги вантажу при виключенні струму визначимо за формулою :

$$\begin{aligned} T_T &= (q \cdot g \cdot H - c_0(W_0 - q \cdot g \cdot H)) \frac{D_{п}}{2 \cdot u_{\phi}} \eta_0 = \\ &= (77.7 \cdot 9.81 \cdot 20 - 0.5(42273 - 77.7 \cdot 9.81 \cdot 20)) \frac{1.250}{2 \cdot 25} \cdot 0.92 = \\ &= 40.32 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned} \quad (2.44)$$

де  $c_0 = 0.5$  - коефіцієнт можливого зменшення опорів при вільному русі стрічки.

Обрахуємо гальмівний момент на валу двигуна для обмеження вибігу стрічки конвеєра після виключення електродвигуна:

$$t_T = \frac{2 \cdot l_{вб}}{v} = \frac{2 \cdot 4}{v} = 3.1 \text{ с} \quad (2.45)$$

де  $t_T$  - час гальмування, яке визначається з прийнятою величини вибігу; приймаємо  $l_{вб} = 2$  м,

$$T_T = \frac{(2 \cdot q_0 + q)(1 + K_H) \cdot L \cdot D_{II}^2 \cdot \eta_0 \cdot \omega_{ДВ}}{4 \cdot u_{\Phi}^2 \cdot t_T} (q \cdot g \cdot H - c_0(W_0 - q \cdot g \cdot H)) \frac{D_{II}}{2 \cdot u_{\Phi}} \eta_0, \quad (2.46)$$

$$T_T = \frac{(2 \cdot 13.64 + 77.7)(1 + 0.08) \cdot 340 \cdot 1.250^2 \cdot 0.92 \cdot 103}{4 \cdot 25^2 \cdot 3.1} \cdot (77.7 \cdot 9.81 \cdot 20 - 0.5(42273 - 77.7 \cdot 9.81 \cdot 20)) \frac{1.250}{2 \cdot 25} \cdot 0.92 =$$

$$= 75.8 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

Тобто вибігу стрічки після вимкнення електродвигуна не буде. Тормоз потрібен лише для запобігання зворотнього руху стрічки з вантажем.

### **Висновки до розділу**

В результаті тягового розрахунку визначені основні елементи стрічкового конвеєра, отримана навантажувальна діаграма на основі якої проведений вибір електродвигуна типу 4А355S6УЗ, потужністю 160 кВт.

Отримані результати дозволяють в подальшому виконати розрахунок та вибір елементів електромеханічної системи.

### **3 ВИЗНАЧЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ**

Для проектування електроприводу необхідно розрахувати певні параметри перетворювача та за отриманими даними вибрати елементи, а саме: транзистори, конденсатори, резистори, ємності, датчики і тому подібне, необхідні для створення цього приводу.

#### **3.1 Функціональна схема керування електроприводом конвеєра.**

Основними загальними вимогами до сучасних асинхронних приводів є [11]:

- Напряга живлення електроприводу – 3 фази 380 (В) 50 (Гц) або 220 (В) 50 (Гц) 1 фазна.
- Вихідна частота 0...400 (Гц).
- Перелік алгоритмів керування що виконуються перетворювачами:
- Звичайне частотне керування з  $U/f^2$  або лінійною  $U/f$  залежністю з можливими ІR-компенсацією та компенсації ковзання.
- векторне бездатчикове керування.
- векторне керування з датчиком швидкості.
- В класичній конфігурації ЕП має забезпечувати щонайменше наступні інтерфейси:
- дискретних гальванічно-розв'язаних входів – 6.
- Аналогових входів 0...10 В – 1 канал, 4...20мА – 1 канал. Аналоговий вихід 0...10 В.
- Виходів релейного типу – 2 Гальванічно розв'язані інтерфейси зв'язку з системами верхнього рівня RS-485, CAN.
- Вбудований ПІД-регулятор технологічного параметру.
- Внутрішній ключ кЛАа на низьких потужностях (до 15 кВт).
- Можливість підєднання енкодера.
- наявність джерел живлення +10 В та +24 В для забезпечення зовнішніх підключень аналогових та дискретних сигналів.

Загальний вигляд функціональної схеми керування асинхронним електроприводом (ЕП) зображено на рис 4.1.1

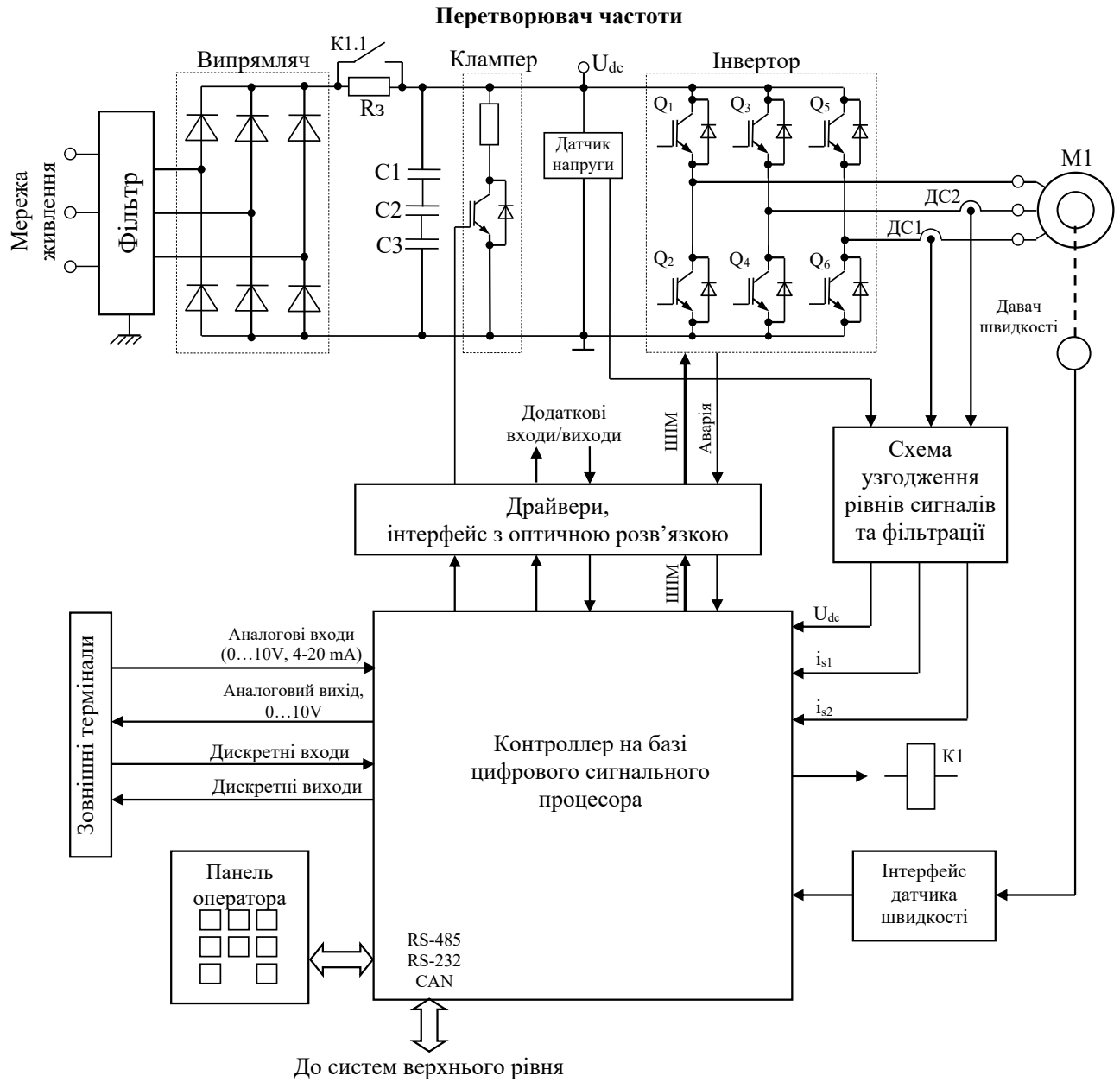


Рисунок 3.1 – Функціональна схема керування асинхронним ЕП

Основу електроприводу складає перетворювач частоти, який поєднує в собі перетворювальний та керуючий пристрій з класичного визначення електроприводу.

Перетворювач зазвичай розділяють на дві частини: силова частина і керуючий контролер.

- силова частина, до якої входять вхідний фільтр, некерований випрямляч, зарядне коло, ємність фільтру випрямляча, кла, датчик напруги ланки

постійного струму, інвертор, датчики вихідного струму, схеми драйверів та гальванічної розв'язки сигналів керування ключами інвертора і клаАа, блок живлення;

- керуючий контролер, до якого входять власне цифровий контролер, який, як правило, базується на цифровому сигнальному процесорі, та схеми узгодження сигналів.

Фільтр – як правило складається з двох основних складових: варисторів для запобігання перенапругам в ланці постійного струму внаслідок сплесків напруги мережі живлення, та фільтру радіоперешкод, який запобігає розповсюдженню в мережу живлення високочастотних перешкод, які виникають при комутації ключів інвертора.

Випрямляч – перетворює змінну напругу мережі живлення в постійну напругу ланки постійного струму .

Ємність С – фільтр, призначений для згладжування випрямленої напруги на виході випрямляча.

Зарядне коло (резистор Rз та реле K1) – забезпечують плавний заряд ємності фільтру випрямляча С при подачі живлення на перетворювач. Після закінчення заряду контакт реле K1.1 замикається.

Клампер – призначений для стабілізації напруги в ланці постійного струму при генераторних режимах роботи двигуна, які супроводжуються рекуперацією енергії в ланку постійного струму.

Датчик напруги – призначений для передачі в керуючий контролер інформації про напругу ланки постійного струму, де вона використовується для забезпечення захисних функцій, контролю заряду ємності фільтру випрямляча, а також для генерування імпульсів керування ключами інвертора по законам широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Інвертор – перетворює постійну напругу ланки постійного струму у задану трифазну напругу на виході перетворювача, результуючий вектор якої (усереднений на періоді ШІМ) має заданий модуль, частоту та кутове положення.

Датчики струму ДС1, ДС2 – призначені для передачі в керуючий контролер інформації про фазні струми двигуна, де вона використовується для організації захисних функцій інвертора та двигуна, а також для організації зворотних зв'язків в системах векторного керування.

Датчик швидкості – призначений для вимірювання контролером кутової швидкості (положення) з метою організації зворотних зв'язків та захисних функцій.

Драйвери – перетворюють параметри імпульсів керування силовими ключами, які надходять від контролера, з метою забезпечення надійного відкриття та запирання IGBT ключів. Фактично драйвери можна розглядати як підсилювачі сигналів. Досить часто драйвери додатково забезпечують захист від струмів короткого замикання інвертора.

Опторозв'язка – забезпечує гальванічну розв'язку дискретних сигналів керування з метою підвищення заводозахисту керуючого контролера, а також для запобігання виходу його з ладу при аварійних режимах в силовій частині. Виконується за допомогою оптопар, або оптоволоконних ліній зв'язку у перетворювачах великої потужності.

Керуючий контролер – виконує всі функції автоматизації перетворювача, отримання завдання на регульовані координати, розраховує алгоритм керування двигуном, генерує імпульси керування ключами, реалізує захисні функції, здійснює комунікації з системами верхнього рівня.

Схеми узгодження рівнів сигналів та фільтрації – необхідна для приведення рівнів сигналів, які отримуються від датчиків струму та напруги до рівнів допустимої вхідної напруги аналого-цифрового перетворювача керуючого контролера. Фільтрація може застосовуватися для підвищення заводостійкості системи керування.

Інтерфейс датчика швидкості – дозволяє підключати до контролера фото імпульсні датчики з різними типами апаратних інтерфейсів. Як правило містить гальванічну розв'язку.

Блок живлення – пристрій який забезпечує живлення власних потреб перетворювача: живлення контролера, драйверів, зовнішні +10 В та +24 В, живлення датчиків та ін. В сучасних перетворювачах вхідна напруга для блоку живлення власних потреб береться від ланки постійного струму, що забезпечує безпечну зупинку системи при зникненні напруги мережі живлення.

Зовнішні термінали – служать для підключення до перетворювача дискретних входів/виходів (наприклад сигналів керування перетворювачем «Пуск», «Стоп», «Реверс», інших), аналогових входів/виходів (наприклад завдання швидкості, зворотного зв'язку за технологічним параметром та інших).

Панель оператора – призначена для налаштування параметрів системи, подачі команд перетворювача та завдання на регульовану величину в ручному режимі, спостереження за контрольними величинами та діагностики.

Додаткові входи виходи – призначені для керування додатковими системами, наприклад для включення вентиляторів системи охолодження, контролю спрацювання зарядного реле та інше.

### 3.2 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна

Розрахунок параметрів обраного двигуна проводиться за методикою, яка наведена в [6].

Таблиця 3.1 - Паспортні дані асинхронного двигуна серії 4А355S6У3[9].

Номінальна потужність	$P_{2n} = 160000 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга	$U_{\text{лн}} = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 3$
Момент інерції	$J_D = 7.33 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Номінальний ККД	$\eta = 93.5 \%$
Коефіцієнт потужності	$\cos(\varphi)_n = 0.9$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.2$
Номінальне ковзання	$s_n, \% = 1.4$
Критичне ковзання	$s_k, \% = 6.5$
Номінальна частота напруги	$f_n = 50 \text{ Гц}$
Параметри Г-подібної схеми заміщення у (відносних одиницях)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\bar{x}'_1 = 0.1$
Активний опір статора	$\bar{R}'_1 = 0.02$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\bar{x}''_2 = 0.14$
Приведений активний опір ротора	$\bar{R}''_2 = 0.15$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\bar{x}_\mu = 3.8$

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{oc} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (3.1)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{oc}}{p_n} = \frac{314}{3} = 104,7 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (3.2)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot (1 - s_n) \cdot n_c}{30} = \frac{3,14 \cdot (1 - 0,014) \cdot 1000}{30} = 103,02 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (3.2)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_H = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{160000}{103,02} = 1553 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.3)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності  $\lambda$  з каталогу)

$$M_k = \lambda \cdot M_H = 2,2 \cdot 1553 = 3416 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.4)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги статора:

$$U_n = U_{in} / \sqrt{3} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В} \quad (3.5)$$

Номінальне значення фазного струму статора:

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3U_n \eta \cos(\varphi)} = \frac{160000}{3 \cdot 220 \cdot 0.935 \cdot 0.9} = 288 \text{ A} \quad (3.6)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2}U_n = \sqrt{2} \cdot 219.393 = 311 \text{ В} \quad (3.7)$$

$$I_{na} = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 288 = 408.5 \text{ А} \quad (3.8)$$

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

$$\Psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0c}} = \frac{311}{314} = 0.98 \text{ Вб} \quad (3.9)$$

Перерахунок параметрів з Г-подібної схеми заміщення на Т-подібну

Для перерахунку параметрів з Г-подібної схеми заміщення в Т-подібну використовується наступна методика :

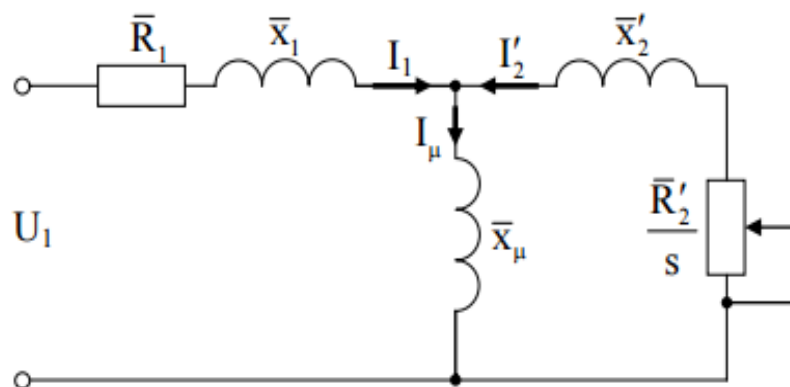


Рисунок 3.2 - Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

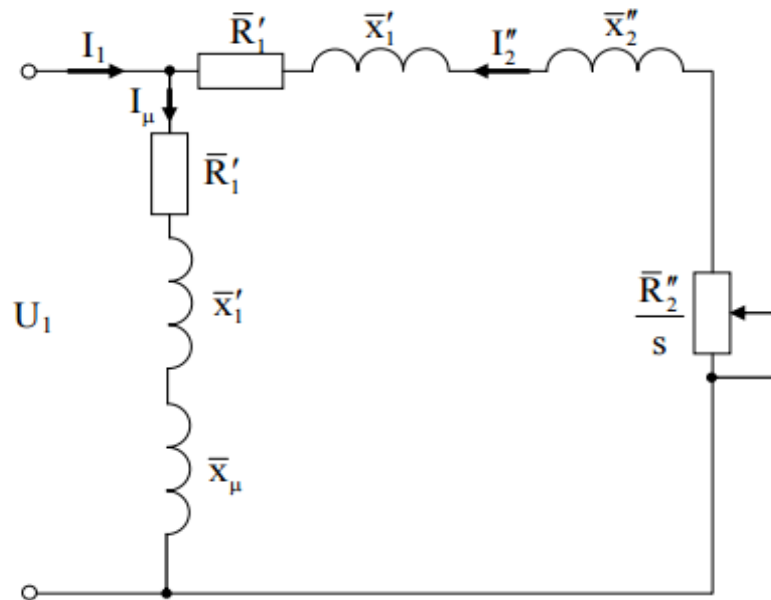


Рисунок 3.3 - Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення:

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4x_1 \bar{x}_\mu}}{2\bar{x}_\mu} = \frac{3.8 + \sqrt{3.8^2 + 4 \cdot 0.1 \cdot 3.8}}{2 \cdot 3.8} = 1.0257 \quad (3.10)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\bar{x}_1' = \frac{\bar{x}_1}{c_1} = \frac{0.1}{1.025} = 0.097 \quad (3.11)$$

$$\bar{x}_2'' = \frac{\bar{x}_2}{c_1^2} = \frac{0.14}{1.025^2} = 0.133 \quad (3.12)$$

$$\bar{r}_1' = \frac{\bar{r}_1}{c_1} = \frac{0.02}{1.025} = 0.0195 \quad (3.13)$$

$$\bar{R}_2 = \frac{\bar{R}_2''}{c_1^2} = \frac{0.15}{1.025^2} = 0.142 \quad (3.14)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях:

Активний опір статора:

$$R_1 = \bar{R}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.0195 \cdot \frac{220}{288} = 0.014 \text{ Ом} \quad (3.15)$$

Індуктивний опір статора:

$$X_1' = \bar{x}_1' \frac{U_n}{I_n} = 0.0975 \cdot \frac{220}{288} = 0.074 \text{ Ом} \quad (3.16)$$

Активний опір ротора, приведений до статора:

$$R_2 = \bar{R}_2' \frac{U_n}{I_n} = 0.142 \cdot \frac{220}{288} = 0.108 \text{ Ом} \quad (3.17)$$

Індуктивний опір ротора, приведений до статора:

$$X_2 = \bar{x}_2 \frac{U_n}{I_n} = 0.133 \cdot \frac{220}{288} = 0.101 \text{ Ом} \quad (3.18)$$

Індуктивний опір розсіювання:

$$x_\mu = \bar{x}_\mu \frac{U_n}{I_n} = 3.8 \cdot \frac{220}{288} = 2.88 \text{ Ом.} \quad (3.19)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру

$$L_m = \frac{X_\mu}{\omega_0} = \frac{2.88}{2 \cdot \pi \cdot 50} = \frac{2.88}{314} = 0.0092 \text{ Гн} \quad (3.20)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_{oc}} = \frac{0.074}{2 \cdot \pi \cdot 50} = \frac{0.074}{314} = 0.000235 \text{ Гн} \quad (3.21)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2'}{\omega_{oc}} = \frac{0.101}{2 \cdot \pi \cdot 50} = \frac{0.101}{314} = 0.000321 \text{ Гн} \quad (3.22)$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.0092 + 0.000235 = 0.0094 \text{ Гн} \quad (3.23)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.0092 + 0.00032 = 0.0095 \text{ Гн} \quad (3.24)$$

На основі проведених розрахунків обчислюються значення наступних параметрів:

$$\alpha = \frac{R_2'}{L_2} = \frac{0.108}{0.0095} = 11.38 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \quad (3.25)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1'}{L_1} = \frac{0.101}{0.0094} = 1.57c^{-1} \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \quad (3.26)$$

$$\beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_2} = \frac{0.0092}{0.00054 \cdot 0.0095} = 1767.3 \frac{1}{\text{Гн}} \quad (3.27)$$

Таблиця 3.2 – Розрахункові дані асинхронного двигуна.

$P_{2n}$ , кВт	160	$R_1$ , Ом	0.014
$\omega_{xx}$ , рад/с	104.71	$R_2$ , Ом	0.108
$\omega_n$ , рад/с	102.52	$L_1$ , Гн	0.0094
$M_n$ , Нм	3819	$L_2$ , Гн	0.0095
$M_k$ , Нм	8403	$L_m$ , Гн	0.0092
$\lambda$	2.2	$\alpha_1$ , Ом/Гн	1.57
$I_n$ , А	288	$\alpha$ , Ом/Гн	11.38
$\psi_{1xx}$ , Вб	0.98	$\beta$ , 1/Гн	1767
$\eta$	0.935	$\beta_1$ , 1/Гн	1784
$\cos \varphi$	0.90		

### 3.4 Розрахунок та вибір перетворювача частоти

Розрахунок перетворювача виконувався за методикою, наведеною в [5]

Параметри двигуна 4A355S6Y3, необхідні для розрахунку перетворювача частоти, наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Паспортні дані двигуна 4A355S6Y3

Номінальна потужність	$P_{2n} = 160 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{\text{лн}} = 380 \text{ В}$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 93.5\%$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.9$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.2$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора, а також амплітудні значення фазної напруги і струму статора розраховані в пункті 4.1:

$$\begin{aligned}
 U_n &= 220(\text{В}); \\
 I_n &= 288(\text{А}). \\
 U_{na} &= 311(\text{В}); \\
 I_{na} &= 408.5(\text{А}).
 \end{aligned}
 \tag{3.28}$$

Прийmemo перевантажувальну здатність приводу  $K_{ov} = 1.5$ , розрахуємо максимальний струм на виході перетворювача.

$$I_{max} = K_{ov} I_{na} = 1.5 \cdot 408.5 = 613 \text{ А} \tag{3.29}$$

При виборі IGBT для автономних інверторів напруги їх максимально-допустима напруга колектор-емітер має бути мінімум в 1.5 разів вищою, ніж максимальна напруга в ланці постійного струму. Максимальна напруга в ланці постійного струму сучасних перетворювачів визначається допустимою напругою встановлених електролітичних конденсаторів фільтру, і складає приблизно 750 В для перетворювачів з трифазним живленням  $U_{grid} = 380\text{В}$ .

$$U_{CE} = 1.5 \cdot 750 = 1125\text{В} \quad (3.30)$$

$$U_{1\text{нф}} = \frac{U_{1\text{н}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220\text{В} \quad (3.31)$$

Вибір IGBT буде здійснюватись за наступними параметрами:

$$U_{CE\text{max}} > U_{CE} \quad (3.32)$$

$$I_C > I_{\text{max}}$$

З каталогу вибираємо MIXA450PF1200TSF з параметрами:

$$U_{CE} = 1200\text{В} \quad (3.33)$$

$$I_C = 650\text{А}$$

Розрахуємо значення струму ланки постійного струму з урахуванням перевантаження:

$$I_{dc} = \frac{K_{ov} P_{2n}}{U_{dc} \cdot \eta \cdot \eta_{inv}} = \frac{1.5 \cdot 160000}{540 \cdot 0.935 \cdot 0.94} = 505\text{А} \quad (3.34)$$

де  $\eta_{inv}$  – коефіцієнт корисної дії інвертора напруги.

Еквівалентний опір навантаження:

$$R_o = \frac{U_{dc}}{I_{dc}} = \frac{540}{505} = 1.069 \text{ Ом} \quad (3.35)$$

Визначаємо ємність фільтру:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot m \cdot k \cdot f \cdot R_o} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 3 \cdot 0.05 \cdot 50 \cdot 1.069} = 19880 \text{ (мкФ)} \quad (3.36)$$

Вибираємо по каталогу конденсатори типу ЕСАР-GT-22000mkf - 160v (GT) з ємністю  $C=22000$  мкФ та максимальною напругою 160 В. Потрібна ємність та робоча напруга фільтру досягається послідовним включенням чотирьох конденсаторів.

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

Якщо для керування координатами двигуна використовуються методи, які не потребують організації зворотних зв'язків за струмом, а вимірювання струму здійснюється лише для захисту системи, то для здешевлення перетворювача датчики на виході інвертора можна не встановлювати і обмежитися лише датчиком струму в ланці постійного струму.



Рисунок 3.4 - Загальний вид перетворювача.

Таблиця 3.4 – Параметри перетворювача АBBACS550.

Панель управління	В комплекті
Тип управління	Векторний
Струм, А	289
Потужність, кВт	160
Захист, клас	IP21
Вага, кг	155
Фазність	3 фаз – 380В
Висота*Ширина*Глибина, мм	1507*250*520
Вхідна фазність	3-ф/380
Вихідна частота, Гц	500
Робоча температура, С	0 +50
Серія	ACS580

Панель управління і зручне меню налаштувань підтримують російську мову. Зручне і швидке введення в експлуатацію, конфігурація і моніторинг параметрів, журнал відмов. Вам не потрібно знати всі параметри приводу. Панель управління і асистенти підкажуть які першо-початкові параметри потрібно зробити для введення приводу в експлуатацію. Економія часу настройки обладнання. Можливість швидко усунути помилки і попередження, виникаючі в приводі, оскільки клавіша Help пропонує докладні інструкції щодо усунення несправностей.

Монтаж і введення в експлуатацію. Найвища потужність в порівнянні з аналогічними моделями інших виробників. Приводи можуть бути встановлені в шафі сторона-до-сторони. Скорочення часу введення в експлуатацію та пространства в шафі.

Підключення до громадських низьковольтних мереж. Вбудований ЕМС фільтр категорії С2 (1-і умови експлуатації) для типорозмірів R0 і R9 або ЕМС фільтр категорії С2 (2-гі умови експлуатації) для типорозмірів R10 і R11. Вбудований дросель для зниження гармонік в стандартній комплектації.

Оптимізація енергоспоживання. Вбудовані лічильники енергоефективності дозволяють оцінити економію енергії в кВт/ч. Оптимізатор енергоспоживання забезпечує максимальний крутний момент на валу двигуна. Приводи настінного монтажу відповідають класу ІЕ2 (EN 50598-2) і підтримують роботу з двигунами високого класу енергоефективності ІЕ4. Енергоефективність досягається завдяки якісному управлінню енергоспоживанням.

Функції захисту. Вбудована функція безпечного відключення моменту STO (SIL3 / PL e), відповідно необхідним машинобудівним директивам. Відповідає директивам 2006/42 / ЕС, EN / ІЕС 61800-5- 2: 2007. Являє собою безпечне і сертифіковане рішення для експлуатації механізмів.

### 3.4 Синтез регулятора швидкості.

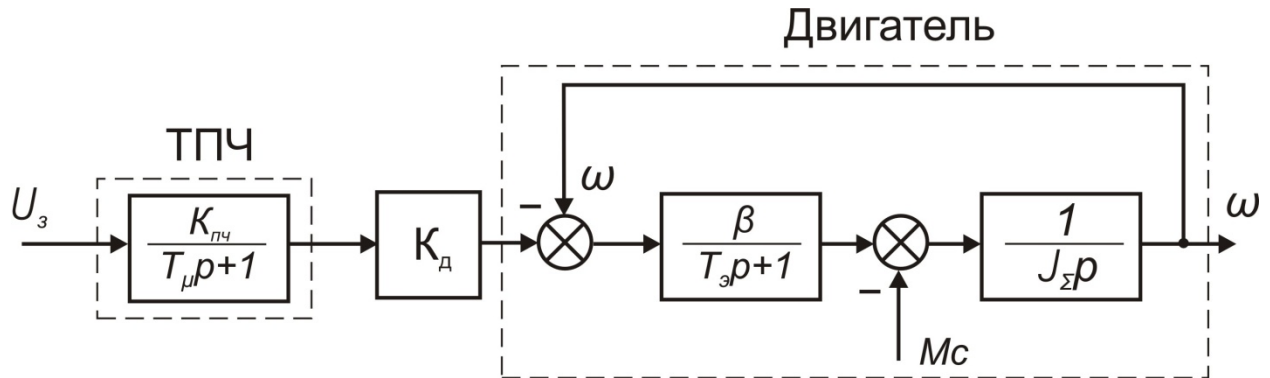


Рисунок 3.5 - Структурна схема об'єкта регулювання

Розрахуємо параметри передатних функцій даної структурної схеми.

Передатна функція ПЧ [8]:

$$W_{\text{ПЧ}}(p) = \frac{K_{\text{ПЧ}}}{T_{\mu} \cdot p + 1} = \frac{5}{0,01 \cdot p + 1} \quad (3.37)$$

де,

$$K_{\text{ПЧ}} = \frac{f_{\text{H}}}{U_3} = \frac{50}{10} = 5 \quad (3.38)$$

$K_{\text{ПЧ}}$  - коефіцієнт підсилення ПЧ[3].

$T_{\mu} = 0,01$  - постійна часу ПЧ.

Інші параметри схеми:

$\omega_0$  - номінальна швидкість ідеального холостого ходу;

$p$  – число пар полюсів обмотки статора;

$T_e$ - електромагнітна стала часу двигуна;

$\omega_{\text{H}}$ - номінальна швидкість двигуна;

$M_{\text{H}}$ - номінальний момент двигуна;

$\beta$ - модуль статичної жорсткості;

$J_{\text{M}}$ - момент інерції механізму;

$J_{\Sigma}$  - сумарний момент інерції;

$T_M$ - Електромеханічна постійна двигуна;

$M_C$ -Моментнавантаження;

$K_d$ -Коефіцієнт передачідвигуна;

$\omega_{oc}$  – кутова частота напруги статора;

$S_{KH}$  – критичне ковзання.

Так як кількість обертів двигуна  $n=1000$  то к-ть пар полюсів буде  $p=3$

$$T_e = \frac{1}{\omega_{oc} \cdot S_{KH}} = \frac{1}{314 \cdot 0.023} = 0,138; \quad (3.39)$$

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_C - \omega_H} = \frac{3819}{103.62 - 102.52} = 3471.8 \text{ Нм} \cdot \text{с}; \quad (3.40)$$

$$J_M = 8 \cdot J_d = 8 \cdot 7.33 = 58.64 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (3.41)$$

$$J_\Sigma = J_d + \frac{J_M}{i^2} = 7.33 + \frac{58.64}{4^2} = 10.99 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (3.42)$$

$$T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta} = \frac{10.99}{3471.8} = 3.1 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (3.43)$$

$$M_C = 1,7 \cdot M_H = 1,7 \cdot 3819 = 6492.2 \text{ Нм}; \quad (3.44)$$

$$K_d = \frac{2 \cdot \pi}{p} = \frac{2 \cdot 3,14}{3} = 2.09 \quad (3.45)$$

З метою отримання необхідних динамічних властивостей системи використовуємо контур регулювання із зворотним зв'язком по швидкості. Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку по швидкості:

$$K_{\omega} = \frac{U_3}{1,3 \cdot \omega_H} = \frac{10}{1,3 \cdot 102,52} = 0,075 \text{ В} \cdot \text{с} \quad (3.46)$$

Такимчином, узагальнена структурна схемачастотного регулювання (Рисунок 3.2)буде мати такий вигляд:

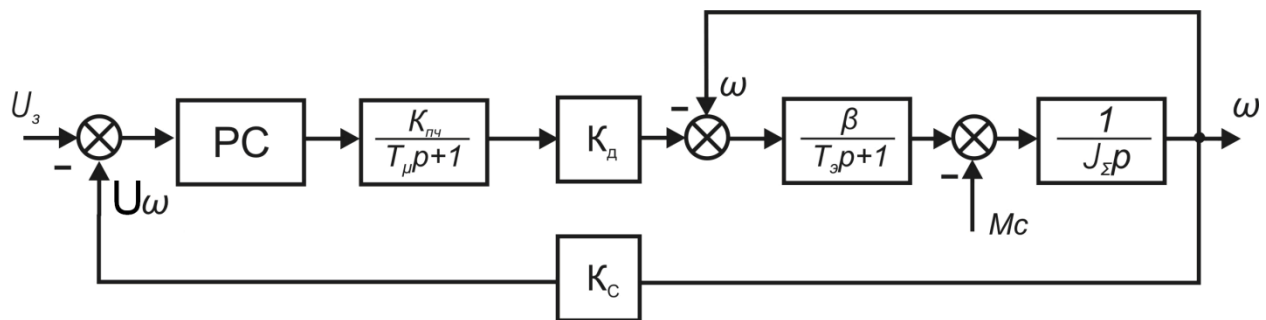


Рисунок 3.6- Структурна схема частотного регулювання

Передаточна функція двигуна буде мати вигляд :

$$W_d(p) = \frac{\beta \cdot K_d}{J_{\Sigma} \cdot p \cdot (T_3 \cdot p + 1)} = \frac{\beta \cdot K_d}{J_{\Sigma} \cdot T_3 \cdot p^2 + J_{\Sigma} \cdot p + \beta} = \frac{K_d}{T_M \cdot T_3 \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1} = \quad (3.47)$$

$$= \frac{2,09}{0,138 \cdot 3,1 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 3,1 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1} = \frac{2,09}{0,427 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 3,1 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}$$

Структурна схема регулювання контуру швидкості (Рисунок 3.3) виглядає наступним чином :

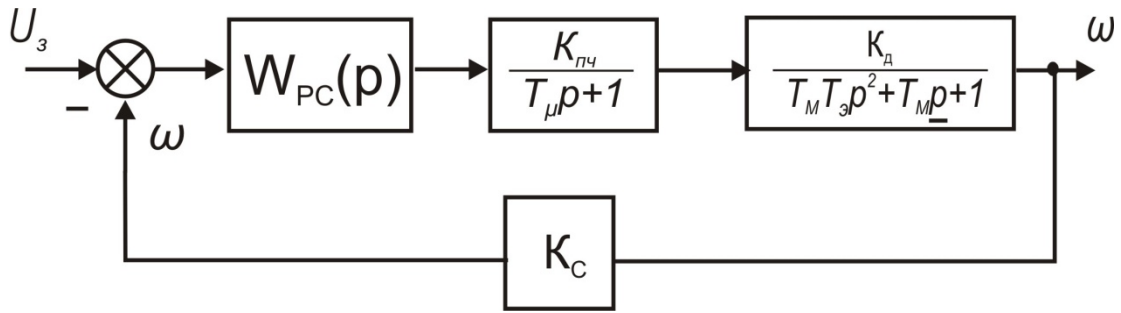


Рисунок 3.7- Структурна схема регулювання контуру швидкості  
Звідси передатна функція об'єкта регулювання за швидкістю буде:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{ОПШ}}(p) &= \frac{K_{\text{ПЧ}} \cdot K_{\text{Д}}}{(T_{\mu} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{М}} \cdot T_{\text{Э}} \cdot p^2 + T_{\text{М}} \cdot p + 1)} = \\
 &= \frac{5 \cdot 2.09}{(0,01 \cdot p + 1) \cdot (3.1 \cdot 10^{-3} \cdot 0.138 \cdot p^2 + 3.1 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1)} = \\
 &= \frac{10.45}{(0,01 \cdot p + 1) \cdot (0.427 \cdot 10^{-3} p^2 + 3.1 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1)}.
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

Регулятор швидкості будемо вибирати з наступних міркувань. Прийmemo, що передатна функція об'єкта регулювання має вигляд:

$$W_{\text{ОПШ}}(p) = \frac{K_1 \cdot K_2 \dots K_n}{\prod_1^m (T_i \cdot p + 1)}, \text{де}$$

$T_i$  - постійна часу об'єкта регулювання.

Користуючись співвідношенням:

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

Можна компенсувати постійні часу, виключивши їх з розімкнутого контуру регулювання. Аналогічним шляхом можна виключити з розімкнутого контуру регулювання всі коефіцієнти  $K_1 \cdot K_2 \dots K_n$ , а для усунення статичної помилки ввести в нього інтегральний елемент з постійною часу.

Таким чином, вихідний розімкнутий контур регулювання вдається замінити бажаним контуром, які мають загальний коефіцієнт посилення, рівний одиниці (зворотний зв'язок представляється одиничним). Але що володіє а

статизмом першого порядку і забезпечує високу швидкодію завдяки незначними постійних часу, що залишилися не скомпенсованими.

$$W_{\text{РАЗС}}(p) = W_{\text{ОРС}}(p) \cdot W_{\text{РС}}(p) = \frac{1}{T_0 p \cdot \prod_{i=1}^m (T_i p + 1)}$$

де  $i$  – число постійних, компенсованих регулятором.

Визначення передавальної функції регулятора:

$$W_{\text{РС}}(p) = \frac{W_{\text{РАЗС}}(p)}{W_{\text{ОРС}}(p)} = \frac{T_M \cdot T_{\text{Э}} \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1}{T_U \cdot p} = \frac{0.138 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 3.1 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}{0.01 \cdot p} \quad (3.49)$$

де,

$$T_U = a_c \cdot K_{\omega} \cdot K_{\text{ПЧ}} \cdot K_d \cdot T_M = 2 \cdot 0.075 \cdot 5 \cdot 2.09 \cdot 3.1 \cdot 10^{-3} = 0.04 \text{ с} \quad (3.50)$$

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

Підставимо значення, отримаємо:

$$W_{\text{РС}}(p) = 0.0106 \cdot p + 0.246 + \frac{1}{0.01p}. \quad (3.51)$$

Відповідно, в данному випадку необхідний пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) регулятор (Рисунок 3.6).

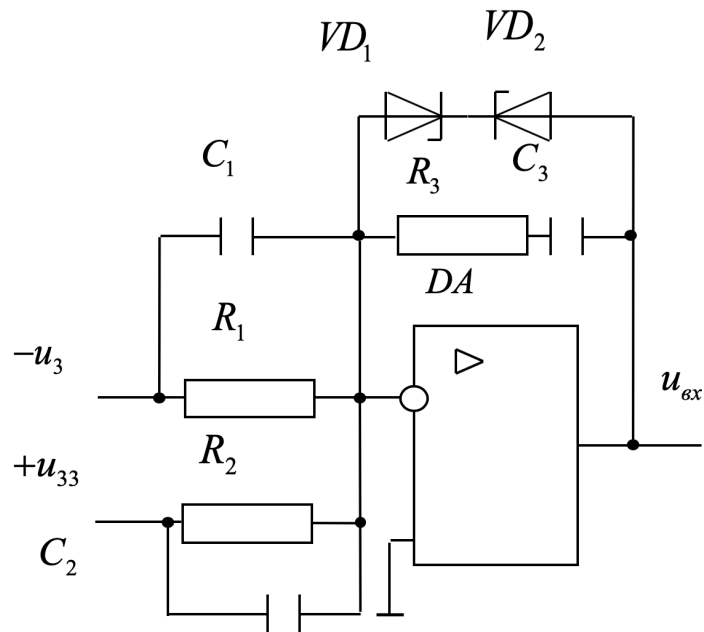


Рисунок 3.8 – Схема електрична принципова ПІД регулятора.

Розрахуємо параметри ПІД- регулятора швидкості на базі ОП К140УД6.

Оскільки  $R_1 = R_2$ ;  $C_1 = C_2$ ;

$$W_{\text{ПІД}}(p) = \frac{(R_3 \cdot C_3 \cdot p + 1)(R_1 \cdot C_1 \cdot p + 1)}{R_1 \cdot C_3 \cdot p} = K_{\text{П}} + \frac{1}{T_I p} + K_{\text{Д}} p; \quad (3.52)$$

$$K_{\text{П}} = \frac{R_3 \cdot C_3 + R_1 \cdot C_1}{R_1 \cdot C_3} = 0,246; \quad (3.53)$$

$$K_{\text{Д}} = R_3 \cdot C_1 = 0,0106; \quad (3.54)$$

$$T_I = R_1 \cdot C_3 = 0,035; \quad (3.55)$$

Нехай:  $C_3 = 1 \text{ мкФ}$  ,

$$R_1 = \frac{T_1}{C_3} = \frac{0,022}{10^{-6}} = 35 \text{ кОм}; \quad (3.56)$$

З рівняння  $C_1^2 \cdot R_1 - K_{\Pi} \cdot R_1 \cdot C_3 \cdot C_1 - K_{\text{Д}} \cdot C_3 = 0$ , знайдемо значення  $C_1$ :

$$C_1 = 0,68 \cdot 10^{-6}; \quad (3.32)$$

Прийmemo, що  $C_1 = 1 \text{ мкФ}$ .

Тоді  $R_3$ :

$$R_3 = \frac{K_{\text{Д}}}{C_1} = \frac{0,0106}{1 \cdot 10^{-6}} = 10600 \text{ Ом}; \quad (3.57)$$

Прийmemo що,  $R_3 = 12 \cdot 10^3 \text{ Ом}$  [3].

### **Висновки до розділу 3**

Представлена функціональна схема керування, надано опис принципів її побудови. Виконано вибір перетворювача (ABBACS580), здійснено синтез регулятора швидкості.

Отримані результати дають можливість отримати математичні моделі електромеханічної системи.

## 4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

### 4.1 Алгоритм непрямого векторного керування асинхронним електродвигуном

Структурна схема системи керування приведена на рисунку 4.1.

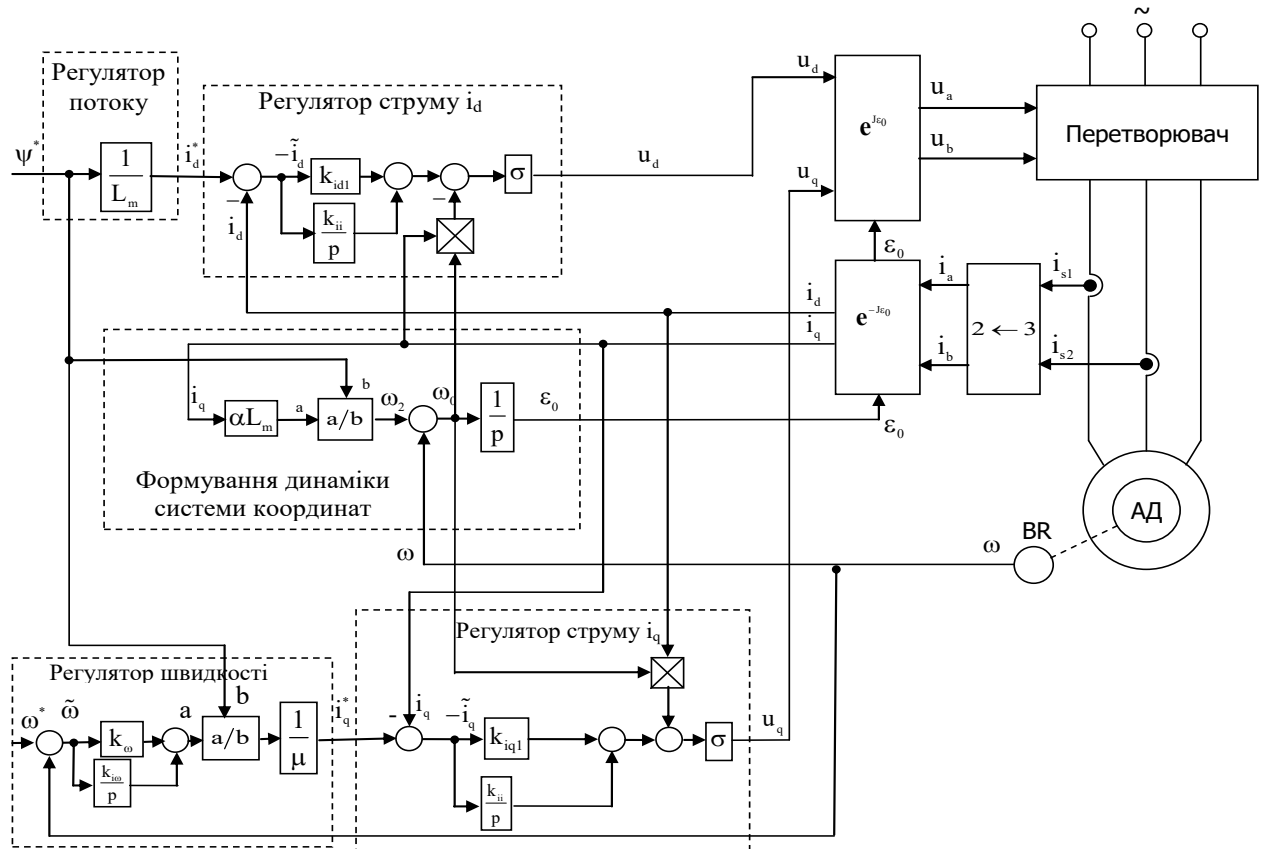


Рисунок 4.1 – Структурна схема системи керування.

Для дослідження динамічних режимів роботи магістрального стрічкового конвеєра на основі алгоритму непрямого векторного керування було побудовано математичну модель у пакеті Simulink програми MATLAB, яка представлена на рисунку 4.1.

Для моделювання систем керування АД прийнято використовувати математичну модель, яка записується в стаціонарній системі координат (а-в).[7]

$$\begin{aligned}
\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) - v\omega, \quad M = \mu(\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}) \\
\dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} U_{1a} \\
\dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} + \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} U_{1b} \\
\dot{\psi}_{2a} &= -\alpha\psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a} \\
\dot{\psi}_{2b} &= -\alpha\psi_{2b} - p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}
\end{aligned} \tag{4.1}$$

де  $\omega$  – кутова швидкість ротора,

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

$(\psi_{2a}; \psi_{2b})^T$  – компоненти вектора потокозчеплень ротора,

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

$M_c$  – момент навантаження,

$v$  – коефіцієнт в'язкого тертя.

Додатні константи, що відносяться до електричних і механічних параметрів АД, визначені в попередньому розділі.

Напма'ятаємо лише, що:

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}\right), \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}, \quad \mu = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{J L_2}, \quad \alpha = \frac{R_2}{L_2}, \quad \gamma = \left(\frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta\right) \tag{4.2}$$

Для переходу з системи координат (a - b), у синхронну систему координат ротора (d - q), яка обертається відносно стаціонарної системи координат з швидкістю  $\omega_0$ , виконаємо перетворення Парка-Горева, яке визначається наступними рівняннями:

$$\begin{aligned}
 x_{dq} &= e^{-J\varepsilon_0} x_{ab} \\
 x_{ab} &= e^{J\varepsilon_0} x_{dq} \\
 e^{-J\varepsilon_0} &= \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Проблема відпрацювання заданих траєкторій кутової швидкості – потокозчеплення формулюється наступним чином. Припустимо, що для моделі АД, заданої, виконується наступне:

A.1. Струми статора та кутова швидкість ротора доступні для вимірювання.

A2. Параметри АД відомі і незмінні.

A3. Момент навантаження  $s M_c$  невідомий, постійний та обмежений.

A4. Задані траєкторії кутової швидкості  $\omega^*$  і потокозчеплення  $\psi^*$  є обмеженими функціями з обмеженими першою та другою похідними по часу [4].

В умовах цих припущень відбувається проектування непрямого алгоритму керування, яке для заданого варіанту роботи необхідно спроектувати. Таким чином виконується глобальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій швидкості – потокозчеплення, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0 \text{ - при обмеженні усіх внутрішніх змінних}$$

Структура алгоритму непрямого векторного керування містить:

1. розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*) \tag{4.4}$$

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*) \tag{4.5}$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{\psi^*} + \phi \quad (4.6)$$

2. регулятор струму по осі (d) (польової складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma \left( \gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_{1d} - x_d \right), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_{1d}, \end{aligned} \quad (4.7)$$

3. регулятор кутової швидкості

$$\begin{aligned} \dot{i}_{1q}^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left( -k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + v \omega^* \right) \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega} \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[ -k_\omega \left( -k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_{1q} \right) + \dot{\hat{M}}_c + \dot{\omega}^* + v \omega^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^* \quad (4.9)$$

4. регулятор струму по осі (q) (моментна складова струму статора)

$$\begin{aligned} u_{1q} &= \sigma \left( \gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta \omega p_n \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq} \tilde{i}_{1q} - x_q \right), \\ \dot{x}_q &= k_{ii} \tilde{i}_{1q}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

Даний алгоритм забезпечує асимптотичне відпрацювання заданої траєкторії кутової швидкості ( $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0$ ), асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій модуля потокозчеплення, асимптотичну орієнтацію керування за вектором потокозчеплення ротора, а також асимптотичну розв'язку процесів регулювання моменту, швидкості, кутового положення та потозчеплення. Також потрібно відмітити можливість тримання моменту та швидкості при різних моментах навантаження та динамічних моментах.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi}_q = 0 \rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \psi_q = 0$$

Умови полеорієнтування

$$\tilde{\psi}_q = \psi_d$$

Розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення складається з рівнянь для струму статора в координатах (d-q) та швидкості обертання ротора, яке включає в себе швидкість обертання магнітного поля статора, швидкість ковзання та робастну складову, яка дорівнює нулю при даному алгоритмі керування. Похідні за заданим потокозчепленням  $\dot{\psi}^*$ ,  $\ddot{\psi}^*$  вводяться для форсування збудження АД.

Регулятори струмів по осі (q) та (d) мають в своєму складі нелінійну складову та ПІ-регулятор, який описується, наприклад для регулятора струму по осі (d) -  $k_i \tilde{i}_d + x_d$ . Коефіцієнти регуляторів вибираються виходячи з вимог до швидкодії перехідних процесів.

Регулятор кутової швидкості включає в себе похідні від заданої траєкторії швидкості для забезпечення відпрацювання заданих траєкторій без похибок. При чому  $\dot{\omega}^*$  має більший вплив на відпрацювання траєкторії ніж  $\ddot{\omega}^*$ . Потрібно зауважити наявність коефіцієнта в'язкого тертя  $\nu$ , який створює похилу частину в динамічному моменті двигуна. Складову в'язкого тертя на пряму залежить від швидкості [3].

## 4.2 Побудова структурної схеми системи векторного керування асинхронним електродвигуном.

За рівняннями із попереднього розділу побудуємо структурну схему для керування АД .

В структурній схемі за допомогою матриці перетворення  $\mathbf{Q}$  відбувається перетворення трифазних змінних на еквівалентні двофазні і навпаки (двофазних на трифазні).

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_{ab01} &= \mathbf{Q} \mathbf{i}_{abcs}, \\ \mathbf{i}_{abcs} &= \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{i}_{ab01}, \end{aligned} \quad (4.11)$$

Де

$$\mathbf{i}_{ab01} = (i_{1a}, i_{1b}, i_{10})^T; \mathbf{i}_{abcs} = (i_{s1}, i_{s2}, i_{s3})^T \quad (4.12)$$

$$\mathbf{Q} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}; \mathbf{Q}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

У виразі (3.34) для перетвореного вектора струму статора  $i_{10}$  є складовою нульової послідовності. Якщо трифазні змінні утворюють симетричну систему, тобто  $i_{s1} + i_{s2} + i_{s3} = 0$ , то складові нульової послідовності відсутні і матриця (3.35) набуває вигляду:

$$\mathbf{Q} = [3 \rightarrow 2] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}; \mathbf{Q}^{-1} = [2 \rightarrow 3] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$



#### **Висновки до розділу 4**

Була наведена структурна схема непрямого векторного керування, надано алгоритм керування наведена структурна схеми відпрацювання моменту та поточозчеплення для обраного принципу керування. Отримані результати сумісно з попередніми, дозволяють сформувати модель в пакеті прикладних програм MATLAB Simulink, для дослідження електромеханічної системи конвеєра.

## 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

### 5.1 Модель для дослідження динамічних режимів в межах пакету програм «MATLAB».

Використовуючи математичну модель електромеханічної системи конвеєра сформована у програмному середовищі MATLAB «Simulink» модель для дослідження динамічних характеристик системи безперервного транспорту. Загальний вид моделі приведений на рисунку (5.1).

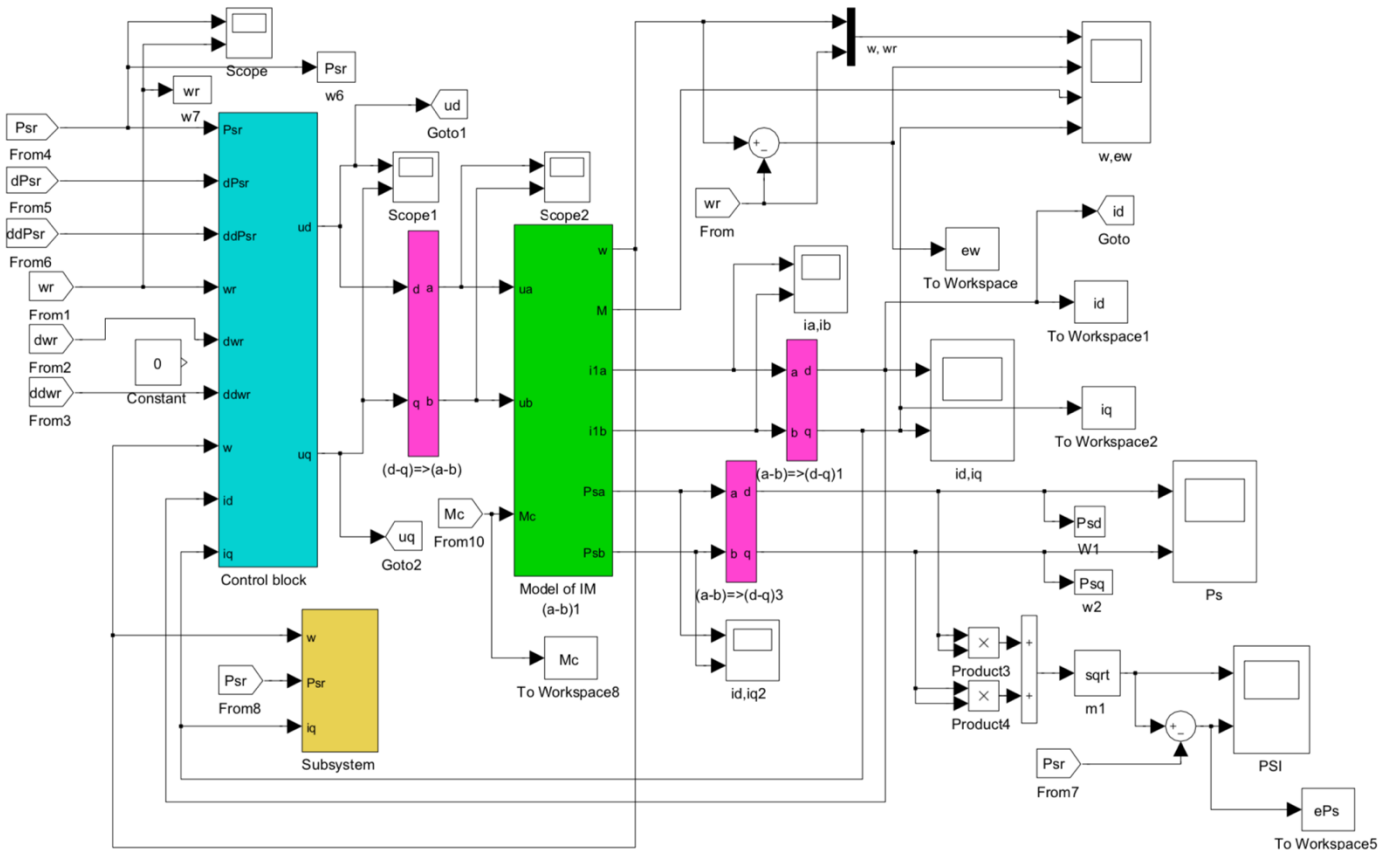


Рисунок 5.1 - Математична модель у пакеті Simulink для дослідження динамічних процесів.

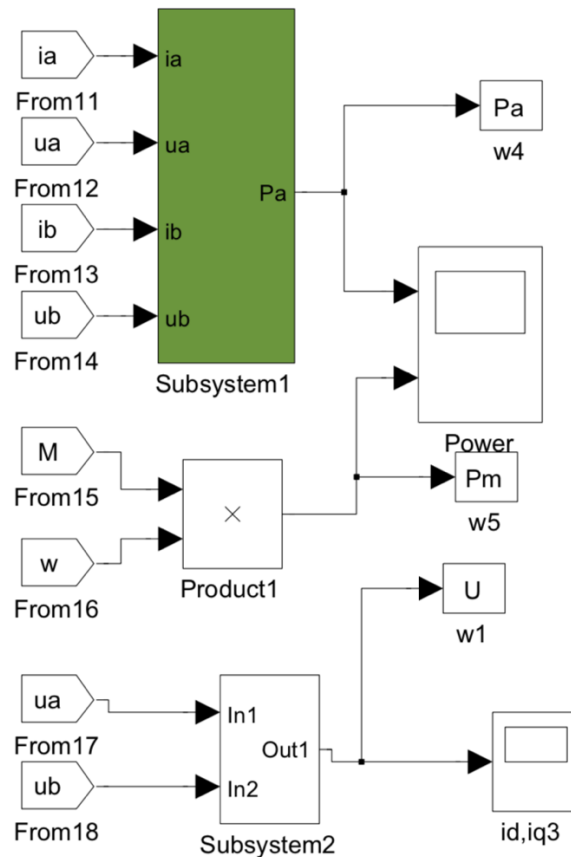


Рисунок 5.2 – Блок схема виведення параметрів електромеханічної системи.

На рисунку 5.2 зображено: control block – блок керування рухом двигуна, model of IM – модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, (a-b,d-q) – блоки перетворення координат, а також допоміжні блоки задання траєкторій швидкості, потокощеплення, профіля статичного навантаження і засоби виміру дослідних даних.

## 5.2 Дослідження динамічних режимів роботи конвеєра при різних значеннях статичного моменту

Дослідження динамічних характеристик двигуна здійснюємо за наступним алгоритмом:

- 1) збудження двигуна;
- 2) відпрацювання траєкторії розгону;
- 3) накидання статичного номінального навантаження;
- 4) скидання статичного номінального навантаження;
- 5) відпрацювання траєкторії гальмування;

Результати дослідження при номінальному статичному моменті  $M_c$  та при номінальній заданій швидкості  $\omega^* = \omega_n$  приведені на рисунку 5.3.

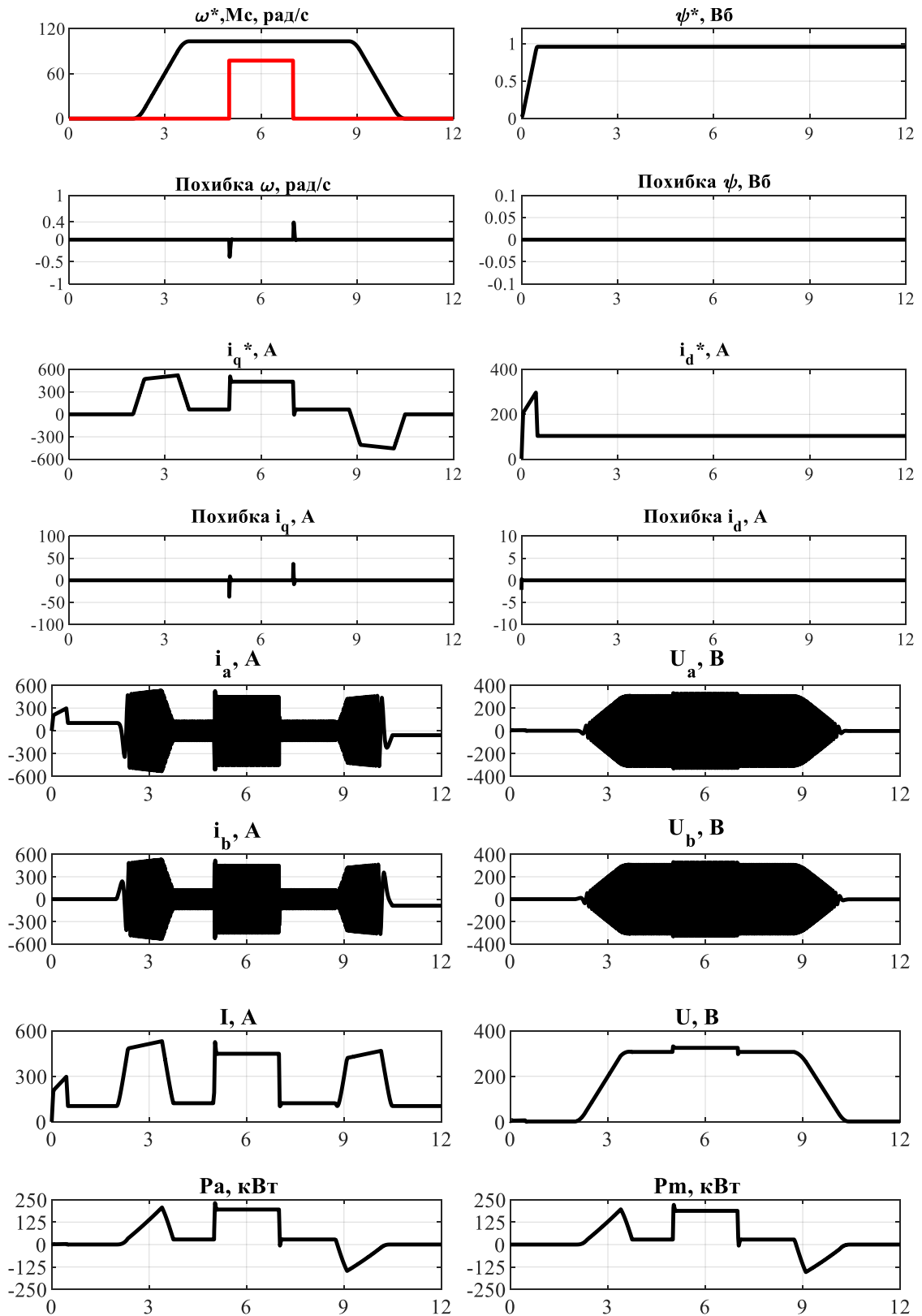


Рисунок 5.3(а)- Моделювання динамічних процесів в двигуні для номінального режиму роботи

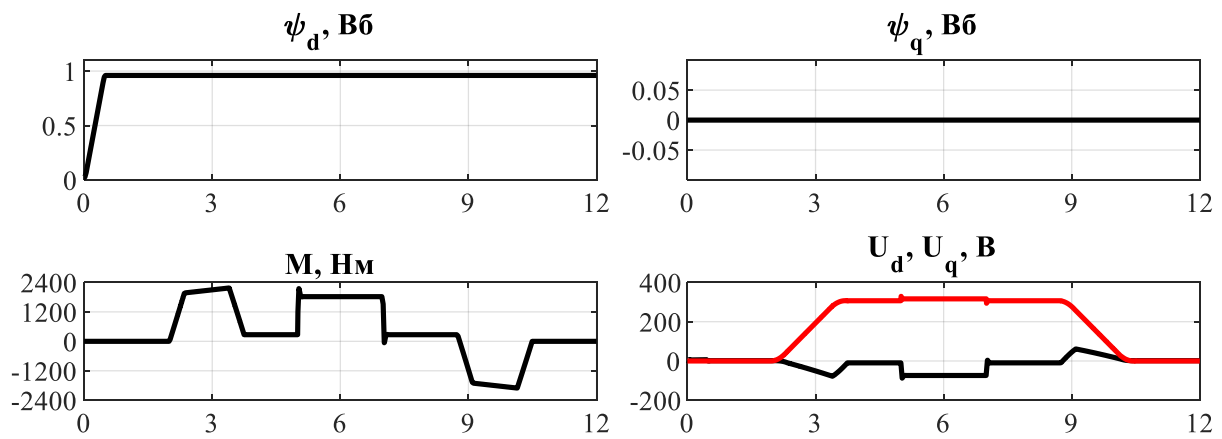


Рисунок 5.3(б)– Моделювання динамічних процесів в двигуні для

$$\begin{aligned} \omega^* &= \omega_H \\ M_c &= M_H \end{aligned}$$

номінального режиму роботи

Аналіз результатів показує, що похибка по швидкості для номінального режиму роботи, складає 0.43 рад/с(0.45% від номінальної швидкості). Величина даної похибки повністю допустима для транспортних систем оснащених гнучким тяговим елементом. Після відпрацювання похибки протягом 0.2с номінальна швидкість стабілізується.

Проведено дослідження похибки відпрацювання швидкості для крайніх значень діапазону зміни швидкості тягового елемента  $\omega^* = \omega_H$  та  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$  при навантаженнях  $M_c = 1.1 \cdot M_H, 1 \cdot M_H, 0.9 \cdot M_H, 0.7 \cdot M_H, 0.5 \cdot M_H$

Результати досліджень приведені рисунках 5.4-5.13.

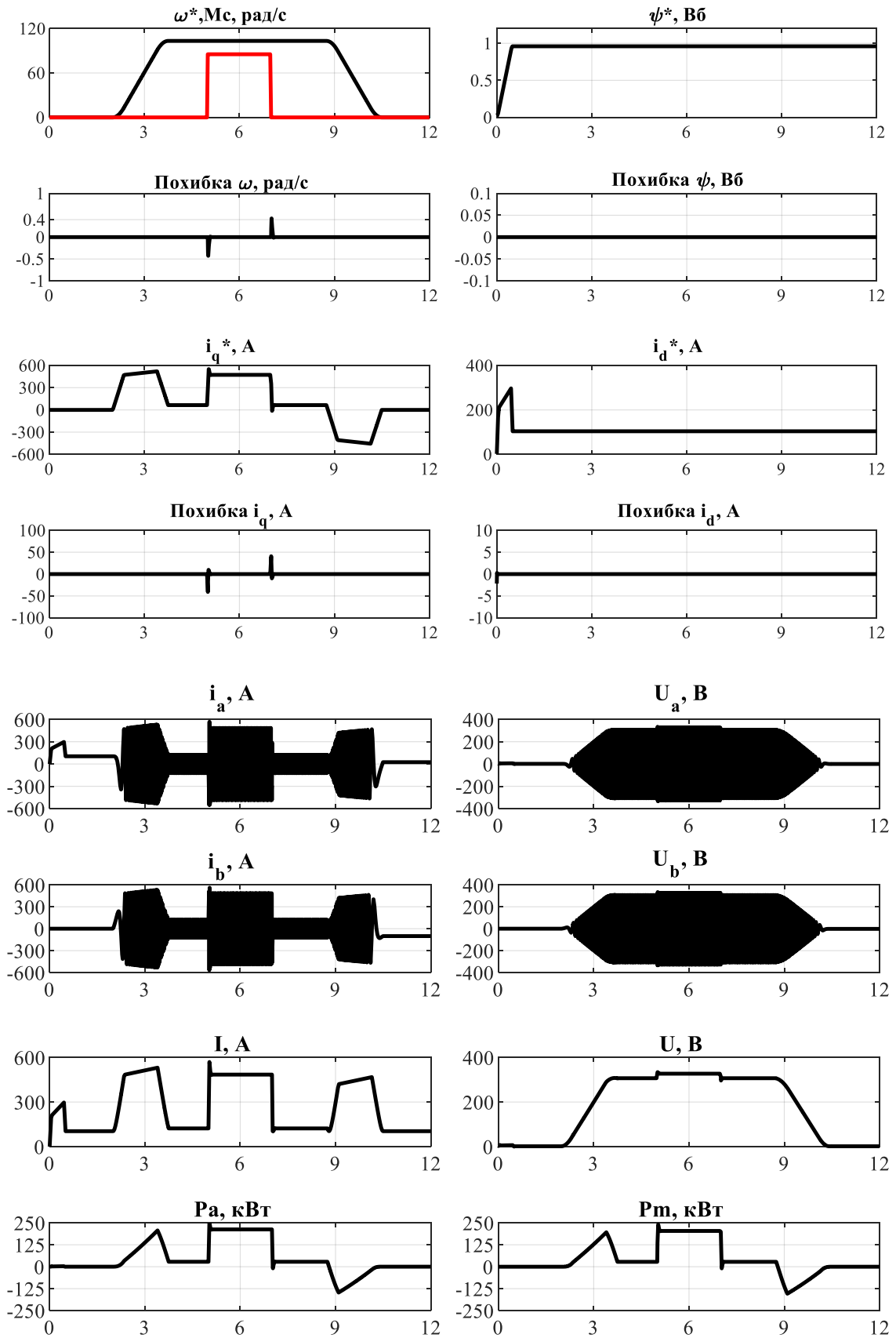


Рисунок 5.4 (а) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для заданої

швидкості

$$\begin{aligned} \omega^* &= \omega_H \\ M_c &= 1.1 \cdot M_H \end{aligned}$$

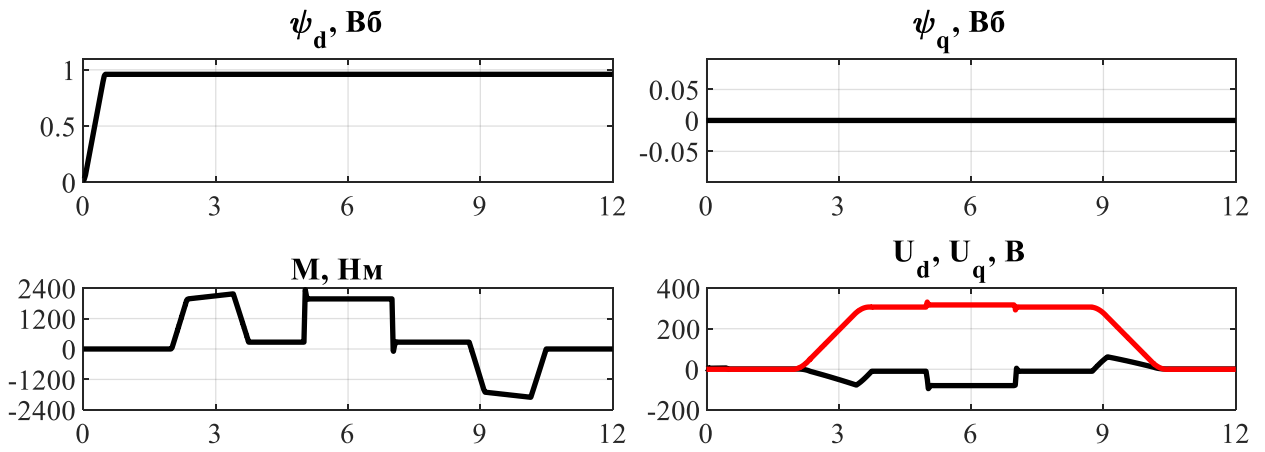


Рисунок 5.4 (б)– Моделювання динамічних процесів в двигуні для заданої

швидкості  $\omega^* = \omega_H$   
 $M_c = 1.1 \cdot M_H$

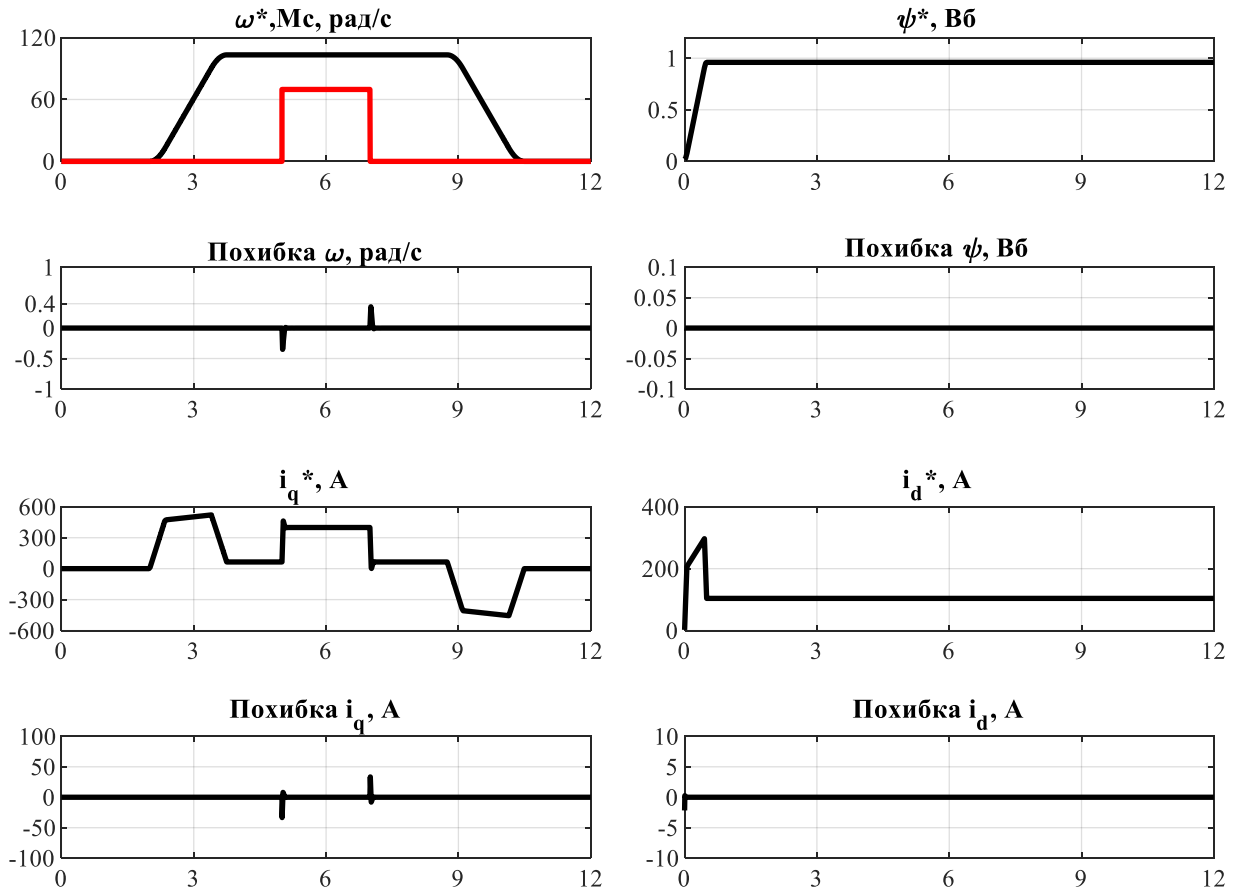


Рисунок 5.5 (а)– Моделювання динамічних процесів в двигуні для заданої

швидкості  $\omega^* = \omega_H$   
 $M_c = 0.9 \cdot M_H$

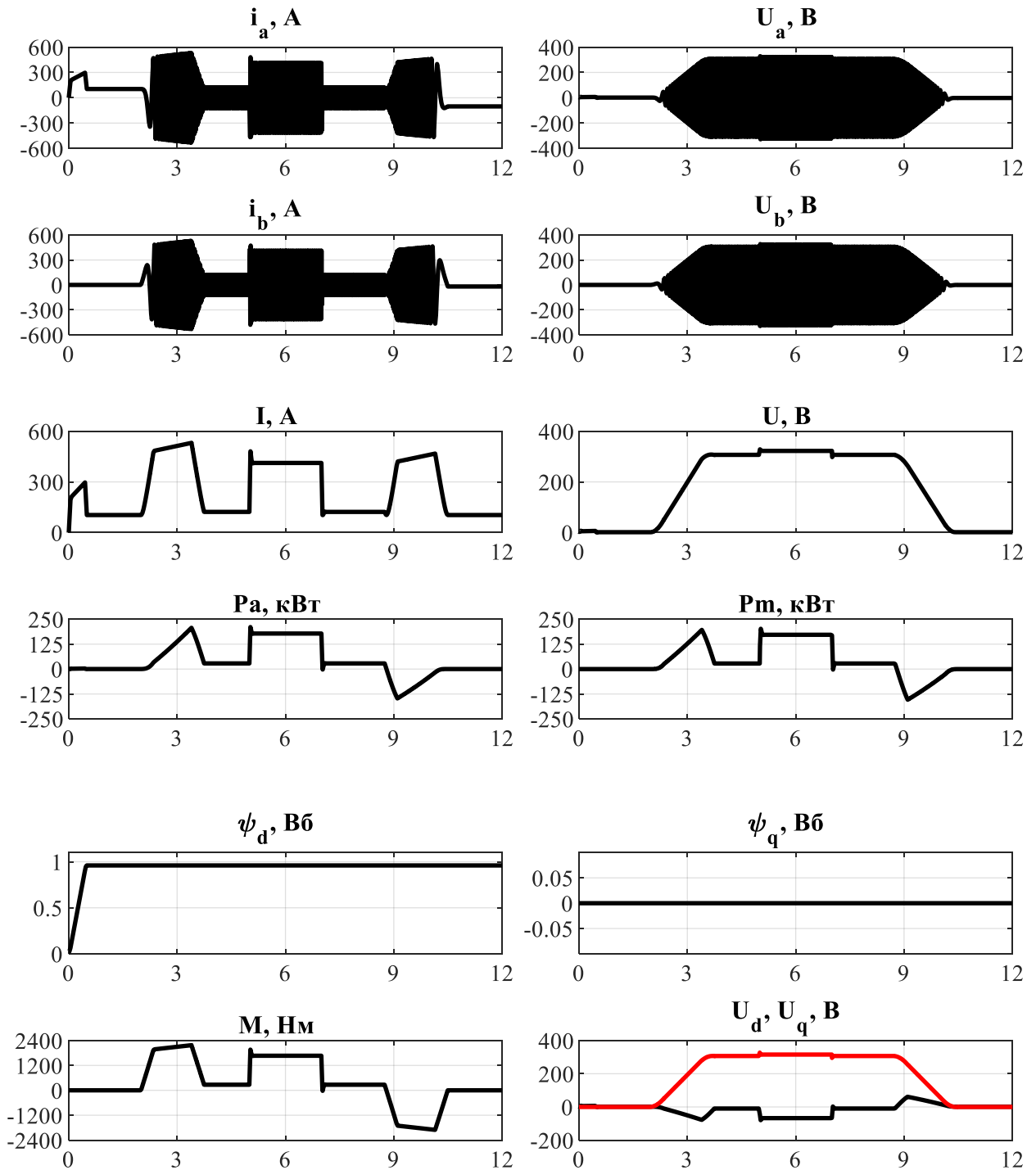


Рисунок 5.5 (б)– Моделювання динамічних процесів в двигуні для заданої

швидкості  $\omega^* = \omega_H$   
 $M_c = 0.9 \cdot M_H$

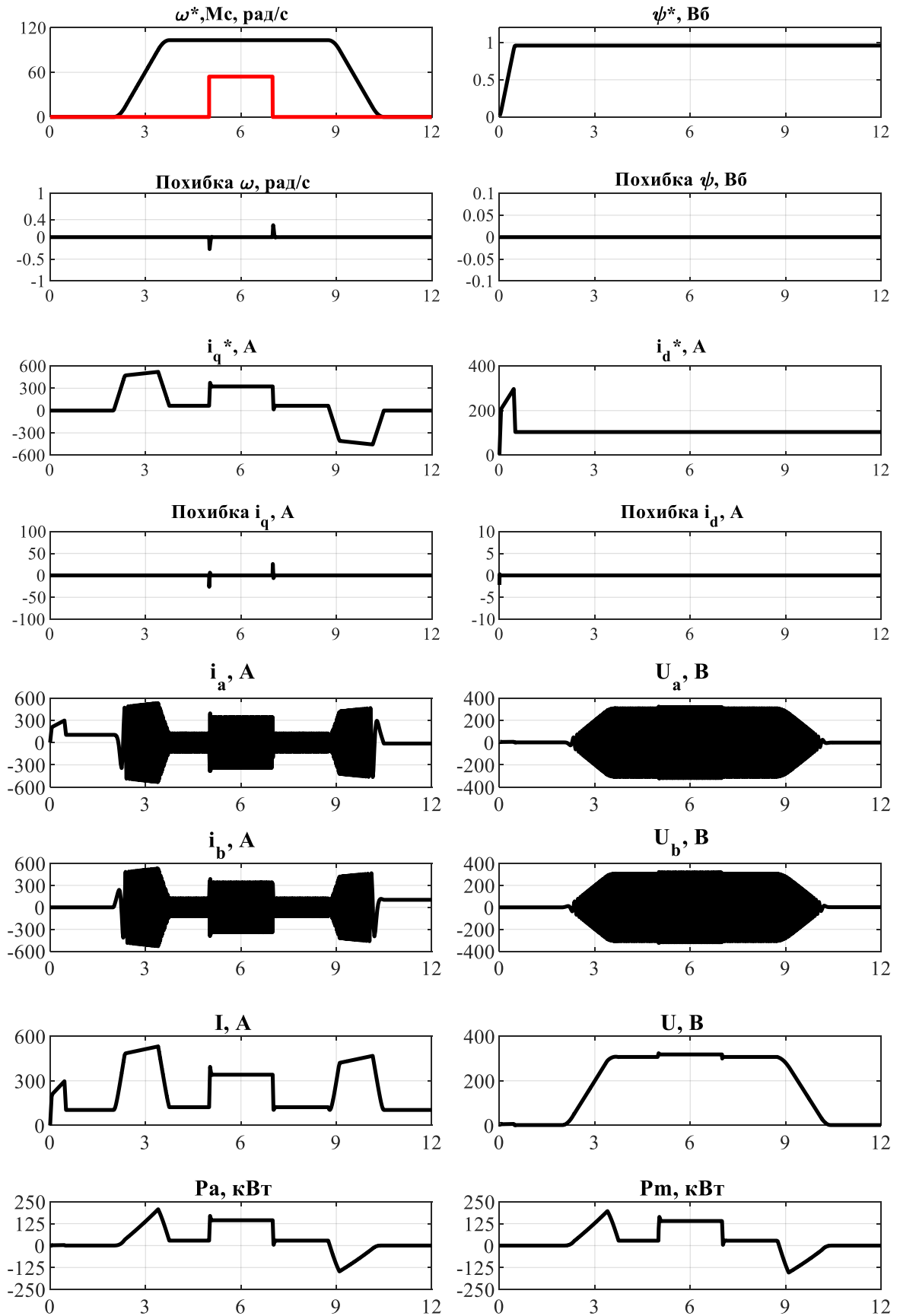


Рисунок 5.6 (а) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для

$$\begin{aligned} \omega^* &= \omega_H \\ \text{заданої швидкості} \\ M_c &= 0.7 \cdot M_H \end{aligned}$$

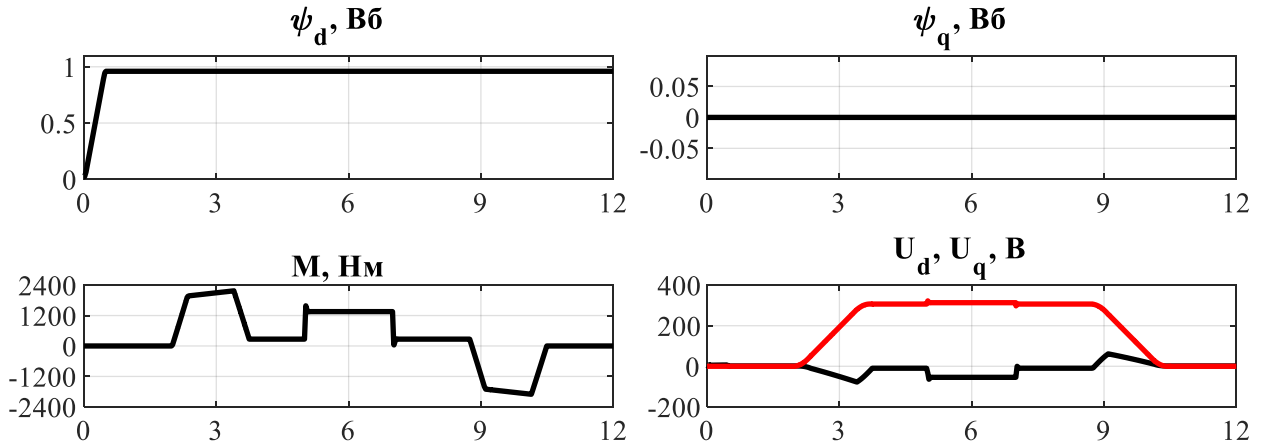


Рисунок 5.6 (б) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для

заданої швидкості  $\omega^* = \omega_H$   
 $M_c = 0.7 \cdot M_H$

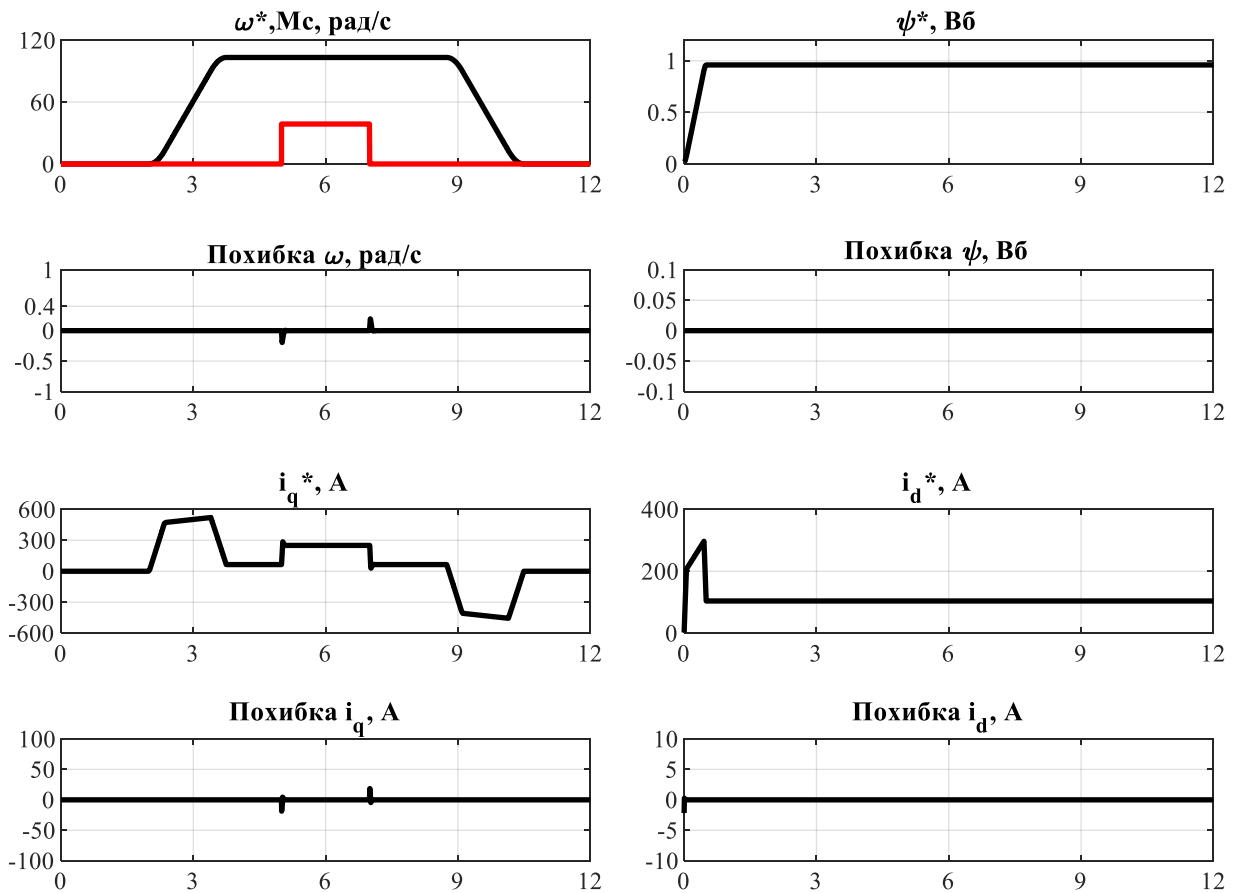


Рисунок 5.7 (а) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для

заданої швидкості  $\omega^* = \omega_H$   
 $M_c = 0.5 \cdot M_H$

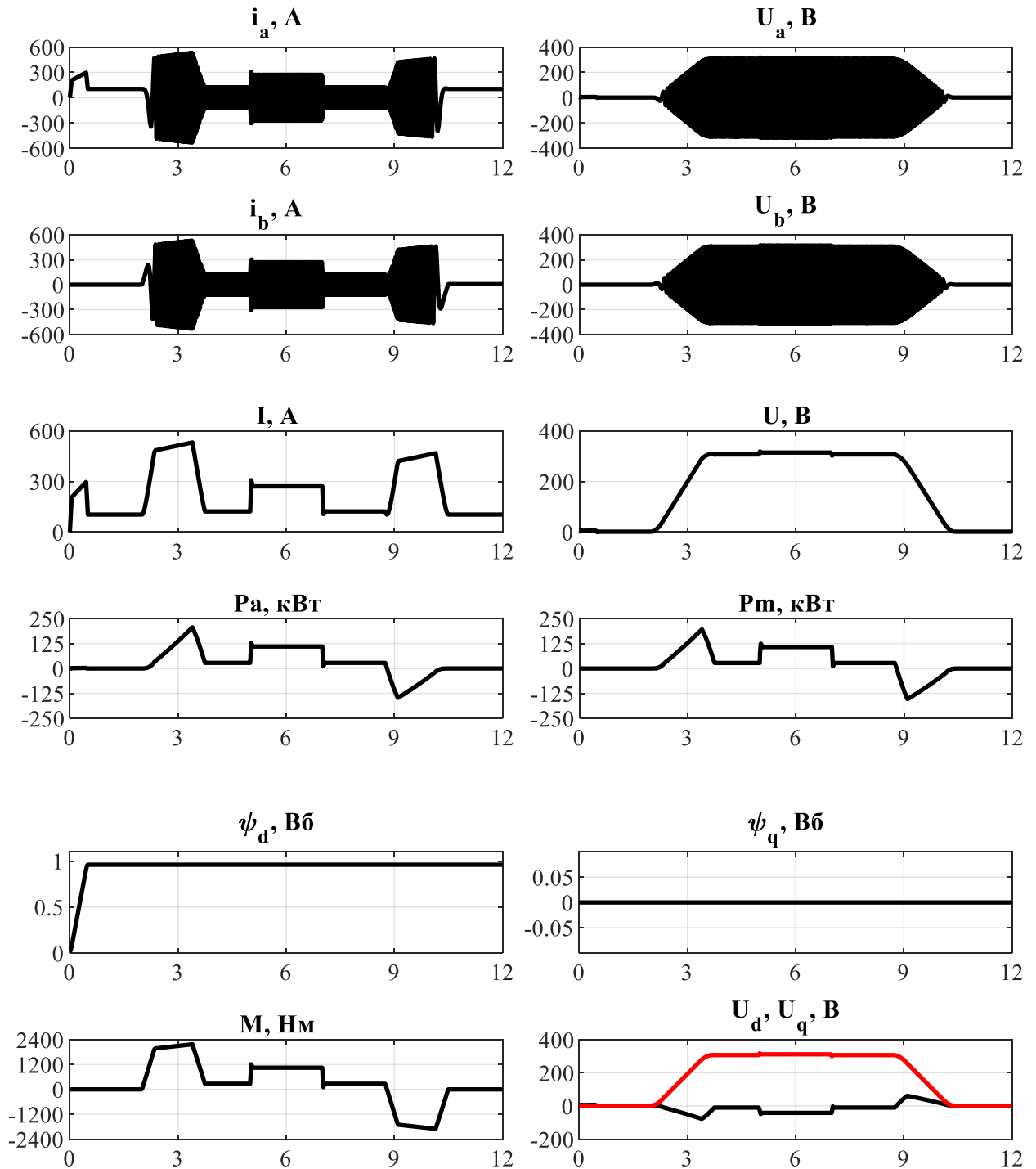


Рисунок 5.7 (б) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для

$$\begin{aligned} \text{заданої швидкості } \omega^* &= \omega_H \\ M_c &= 0.5 \cdot M_H \end{aligned}$$

Дослідження відпрацювання заданої швидкості  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$  при різних значеннях статичного моменту  $M_c = 1.1 \cdot M_H, 1 \cdot M_H, 0.9 \cdot M_H, 0.7 \cdot M_H, 0.5 \cdot M_H$ .

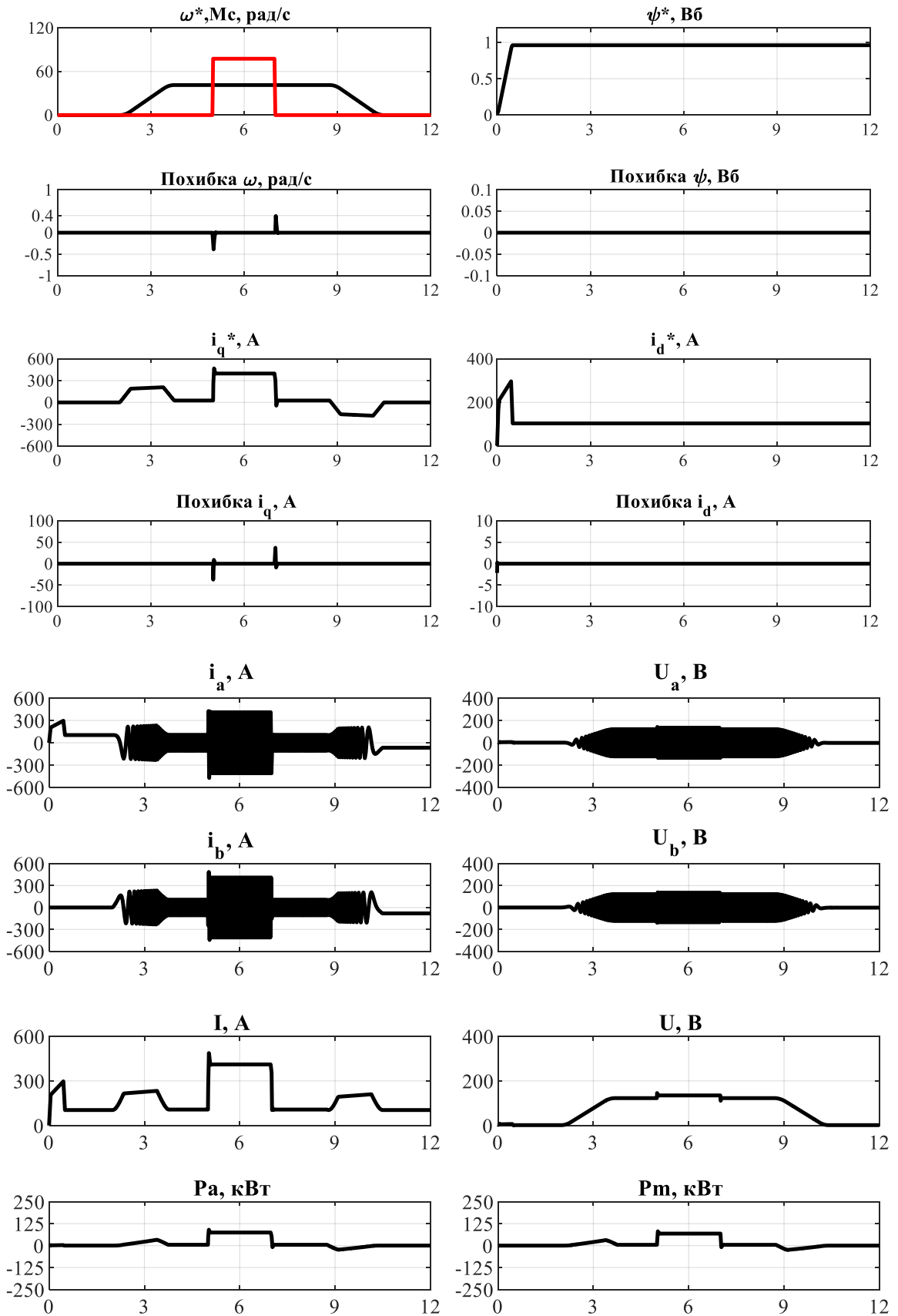


Рисунок 5.8 (а) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для

заданої швидкості  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$   
 $M_c = M_H$

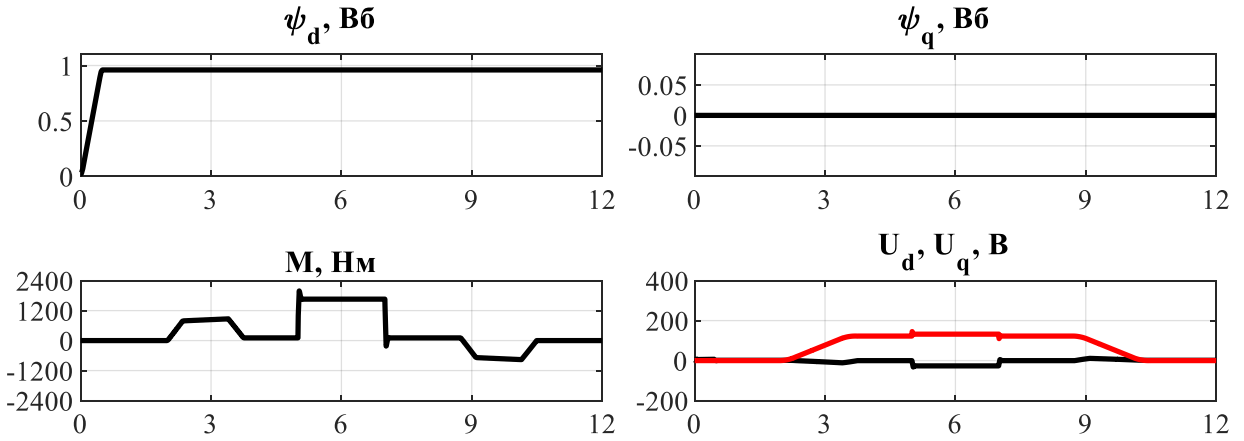


Рисунок 5.8 (б) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для

заданої швидкості  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$   
 $M_c = M_H$

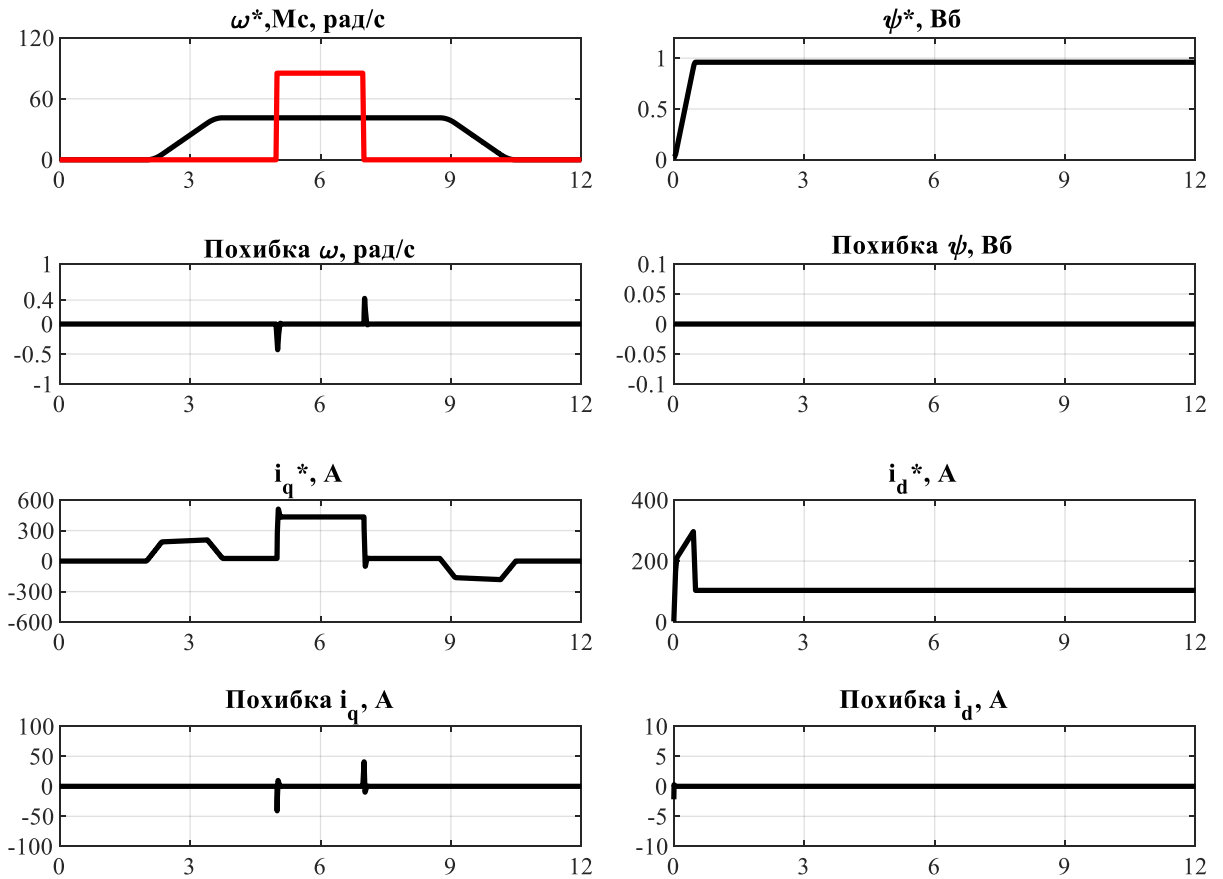


Рисунок 5.9 (а) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для

заданої швидкості  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$   
 $M_c = 1.1 \cdot M_H$

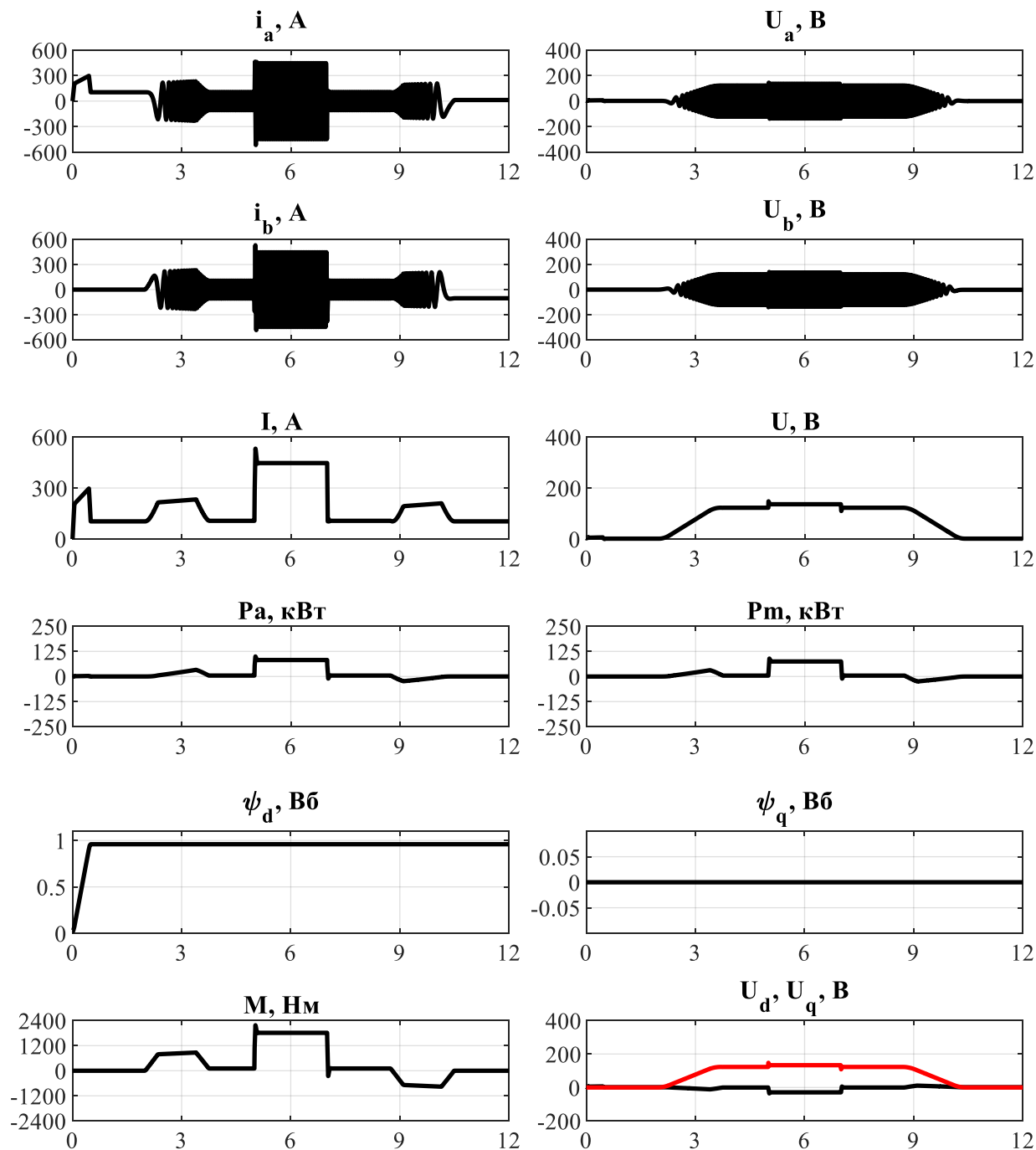


Рисунок 5.9 (б) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для

заданої швидкості

$$\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$$

$$M_c = 1.1 \cdot M_H$$

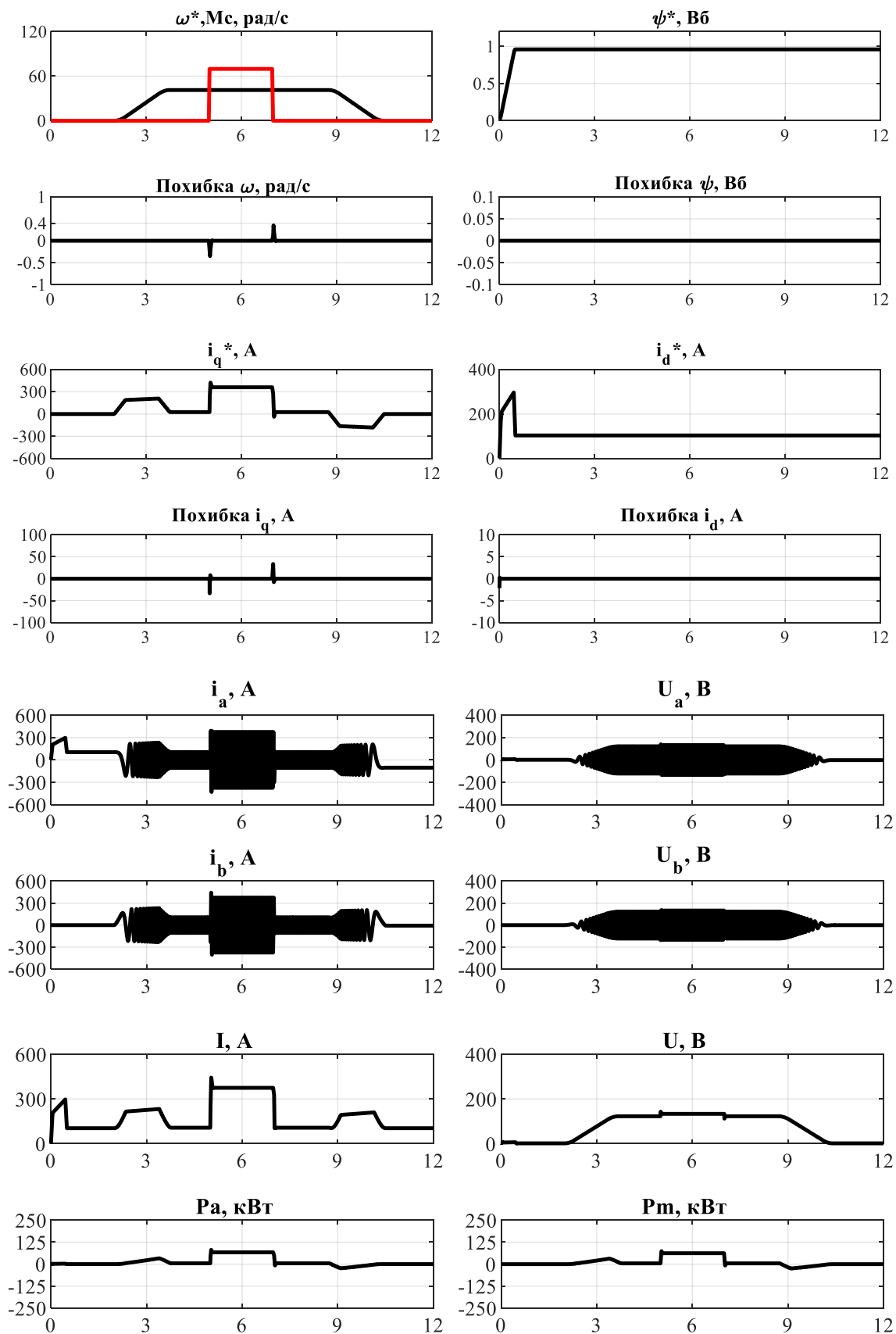


Рисунок 5.10 (а) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для

заданої швидкості  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$   
 $M_c = 0.9 \cdot M_H$

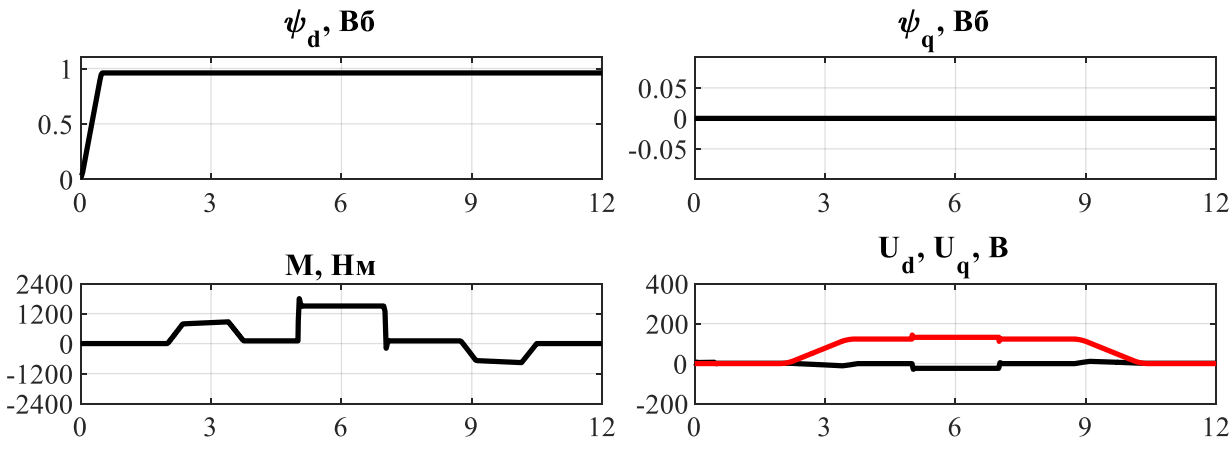


Рисунок 5.10 (б) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для

заданої швидкості  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$   
 $M_c = 0.9 \cdot M_H$

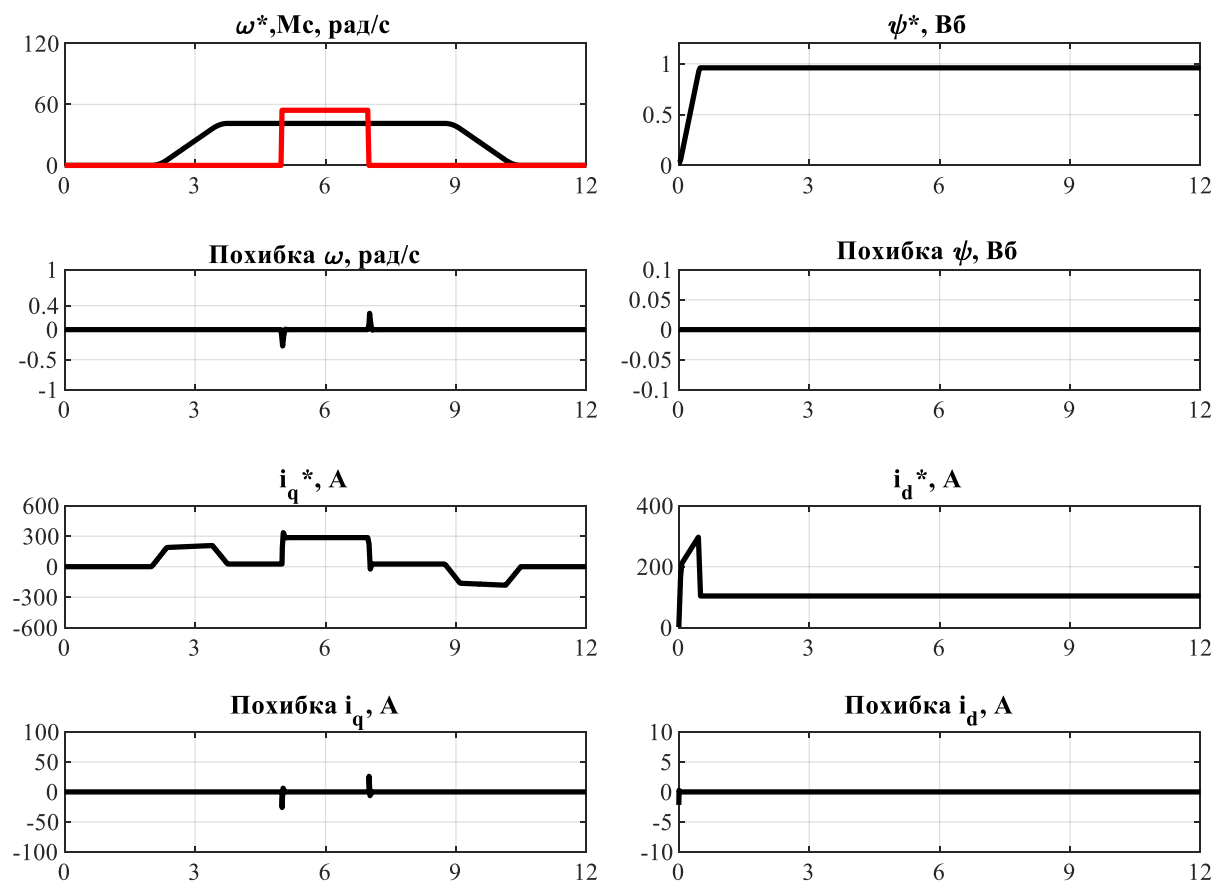


Рисунок 5.11 (а) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для

заданої швидкості  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$   
 $M_c = 0.7 \cdot M_H$

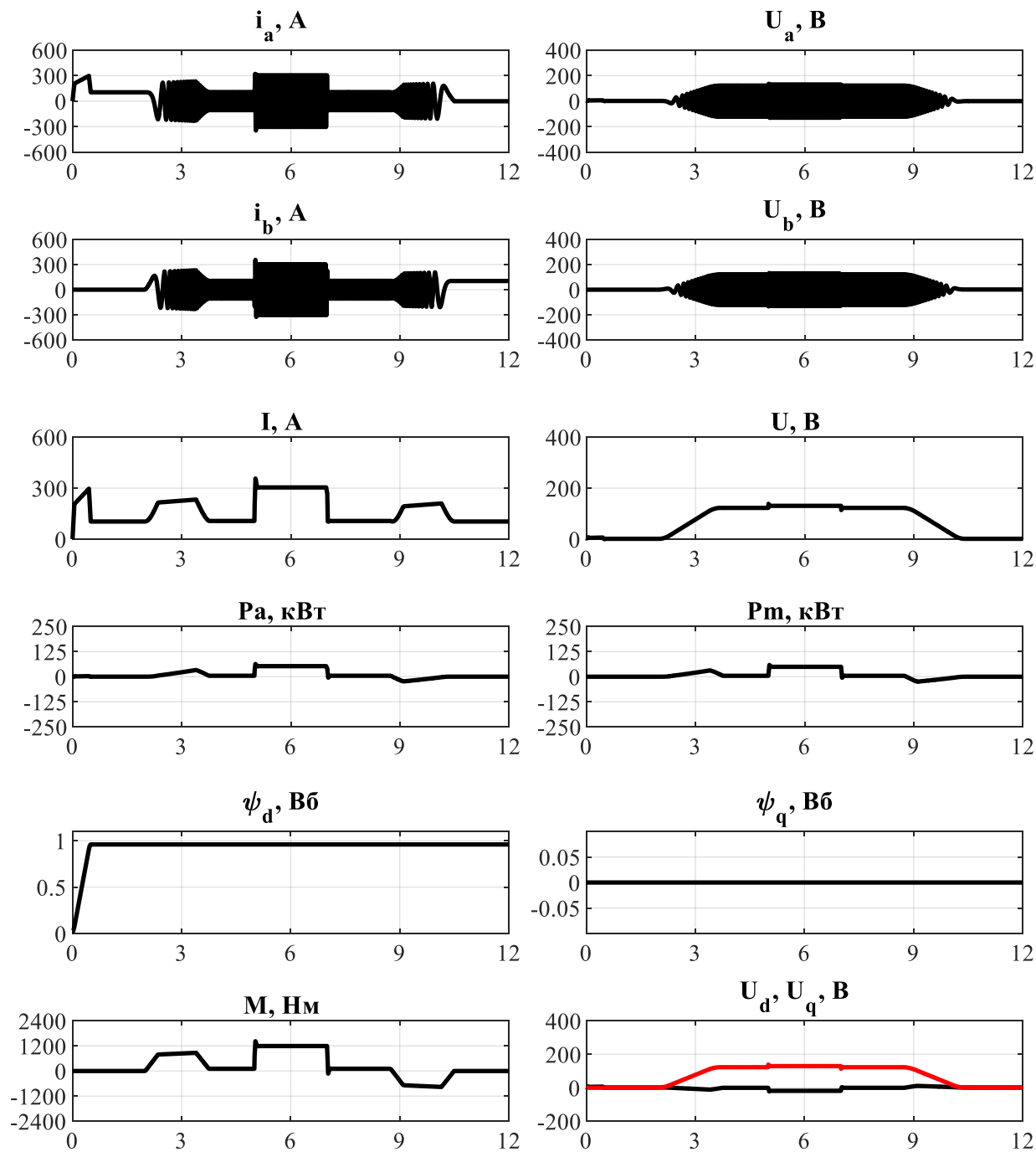


Рисунок 5.11 (б) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для

заданої швидкості

$$\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$$

$$M_c = 0.7 \cdot M_H$$

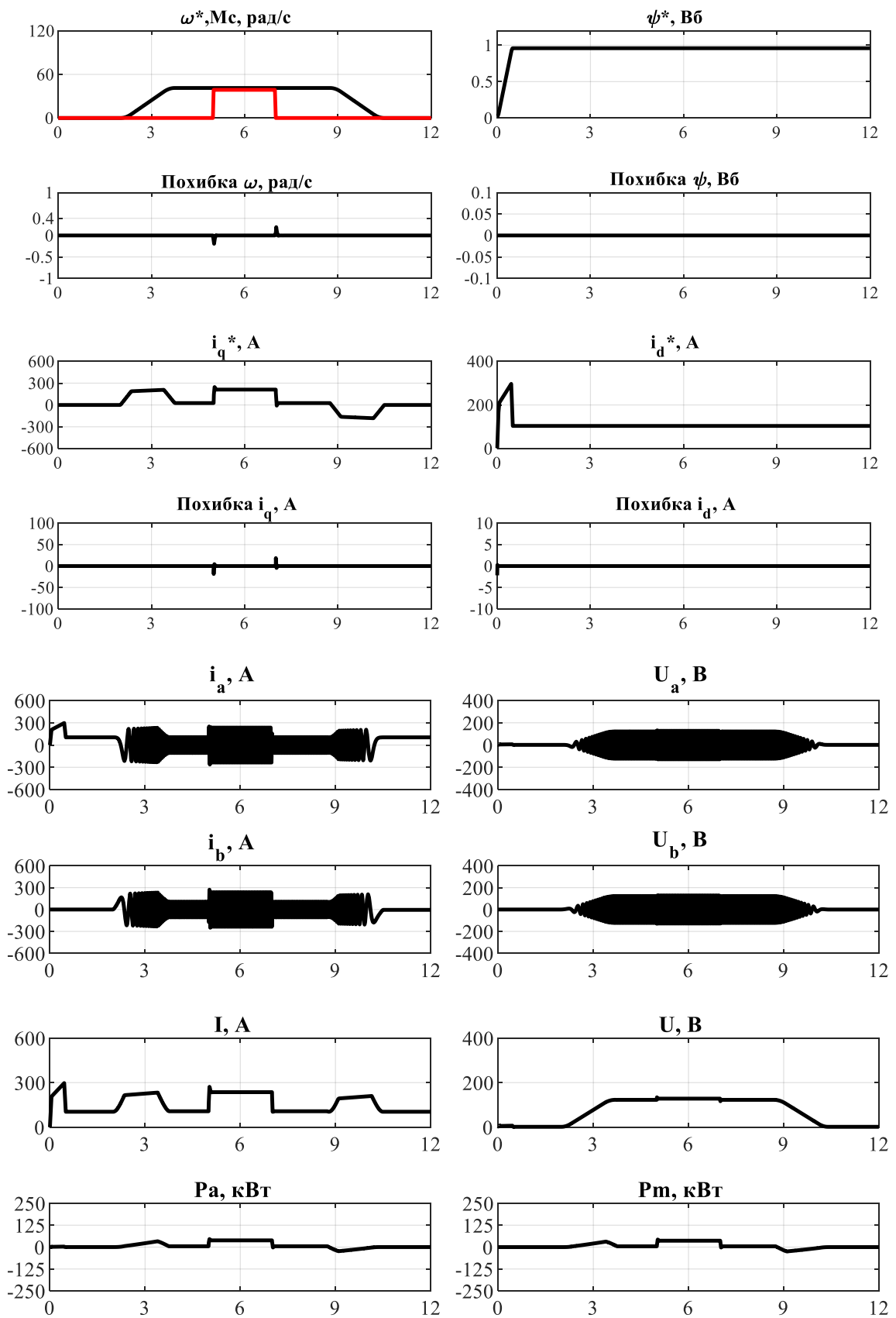


Рисунок 5.12 (а) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для

заданої швидкості  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$   
 $M_c = 0.5 \cdot M_H$

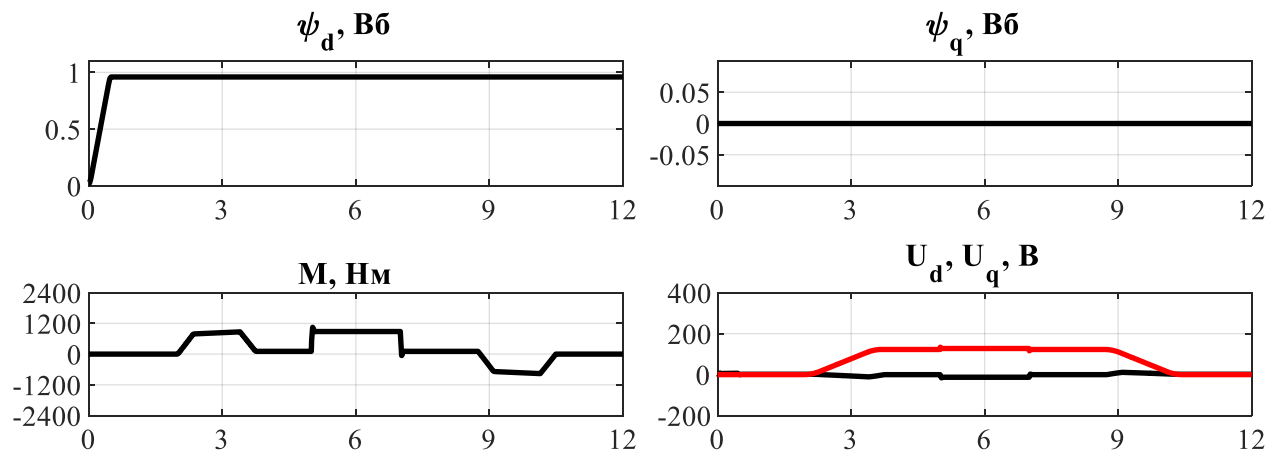


Рисунок 5.12 (б) – Моделювання динамічних процесів в двигуні для

заданої швидкості  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$   
 $M_c = 0.5 \cdot M_H$

Таблиця 5.1 – Похибка відпрацювання швидкості

$M_c$	$0.5 \cdot M_H$	$0.7 \cdot M_H$	$0.9 \cdot M_H$	$M_H$	$1.1 \cdot M_H$
$\Delta\omega^* = \omega_H$	0.25	0.32	0.39	0.42	0.46
$\Delta\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$	0.25	0.32	0.39	0.41	0.46

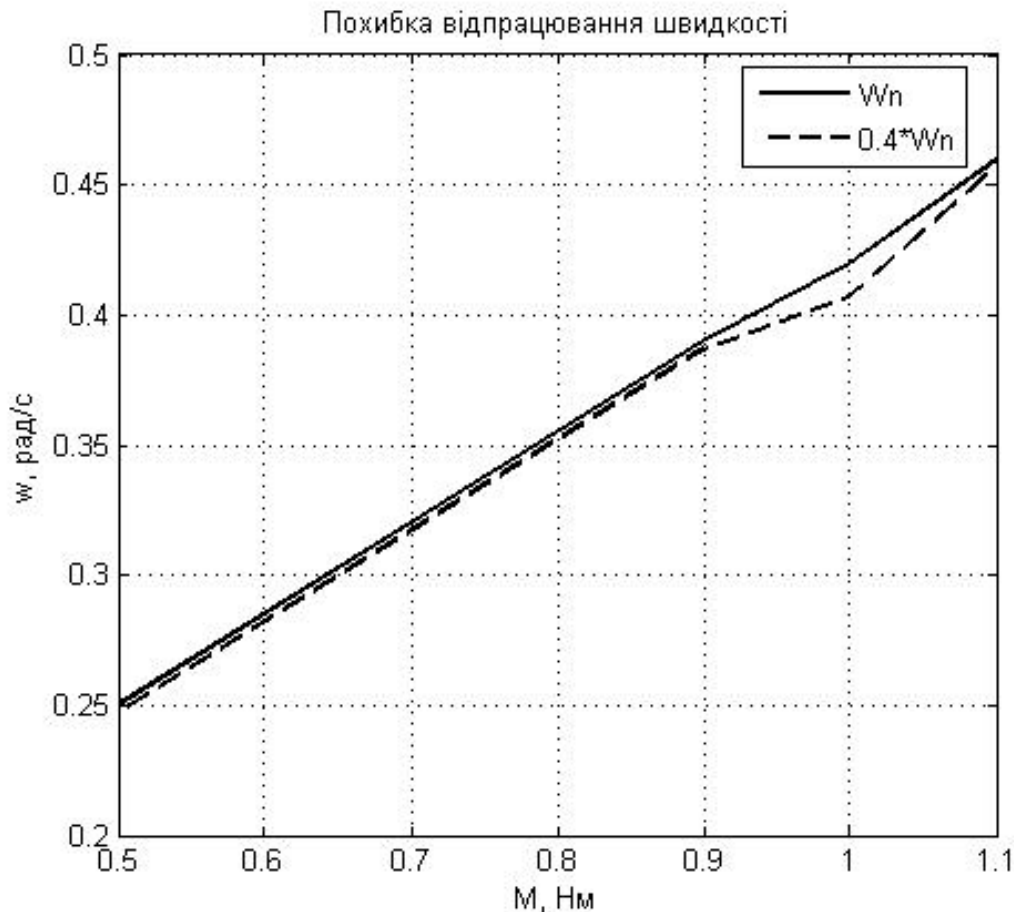


Рисунок 5.13 – Графік залежності похибки відпрацювання швидкості при зміні статичного навантаження  $M_c = 1.1 \cdot M_H, 1 \cdot M_H, 0.9 \cdot M_H, 0.7 \cdot M_H, 0.5 \cdot M_H$ .

Всі процеси виконувались при наступних значеннях навантаження конвейера  $M_c = 1.1 \cdot M_H, 1 \cdot M_H, 0.9 \cdot M_H, 0.7 \cdot M_H, 0.5 \cdot M_H$ , для дослідження відпрацювання заданої швидкості  $\omega^* = \omega_H$  (рис.5.4-5.7). Та при  $M_c = 1.1 \cdot M_H, 1 \cdot M_H, 0.9 \cdot M_H, 0.7 \cdot M_H, 0.5 \cdot M_H$ , для дослідження відпрацювання заданої швидкості  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$  (рис.5.8-5.12).

Отримані результати показують що при коливаннях моменту від  $0.5 M_H$  до  $1.1 M_H$  значення похибки від заданої швидкості  $\omega^* = \omega_H$  та  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$  при даних навантаженнях коливається від 0.25 рад/с до 0.45 рад/с, що відповідає значенню 0.26% та 0.6% від заданої швидкості та є прийнятним для конвеєрів довжиною від 400 - 800 метрів. Дані коливання лінійної швидкості не показує суттєвого впливу на технологічний режим роботи конвеєра. Зміна продуктивності конвеєра

в межах даних коливань не перевищує допустиме значення по технологічним умовам. В статичних режимах лінійна швидкість залишається стабільною.

Похибка при накиданні навантаження визначається в перехідному процесі тривалість якої триває не більше 0,1 секунди. При закінченні перехідного процесу швидкість стабілізується.

## 5.2 Дослідження характеристик електромеханічної системи конвеєра при зміні швидкості тягового елемента.

Дослідження відпрацювання різних значень заданої швидкості  $\omega^* = \omega_n, 0.9 \cdot \omega_n, 0.7 \cdot \omega_n, 0.6 \cdot \omega_n, 0.4 \cdot \omega_n$ , при статичному моменті  $M_c = M_n$ ,

Дослідження відпрацювання різних значень заданої швидкості  $\omega^* = \omega_n, 0.9 \cdot \omega_n, 0.7 \cdot \omega_n, 0.6 \cdot \omega_n, 0.4 \cdot \omega_n$ , при статичному моменті  $M_c = 0.5 \cdot M_n$ .

Результати досліджень приведені на рисунках 5.14-5.22 представлені графіки траєкторій заданого моменту  $M^*$ , кутової швидкості двигуна  $\omega$ , похибки відпрацювання швидкості двигуна  $\tilde{\omega}$ , модуль потокозчеплення  $|\psi|$  та похибка потокозчеплення.

Дослідження відпрацювання різних значень заданої швидкості  $\omega^* = \omega_n, 0.9 \cdot \omega_n, 0.7 \cdot \omega_n, 0.6 \cdot \omega_n, 0.4 \cdot \omega_n$ , при статичному моменті  $M_c = M_n$ ,

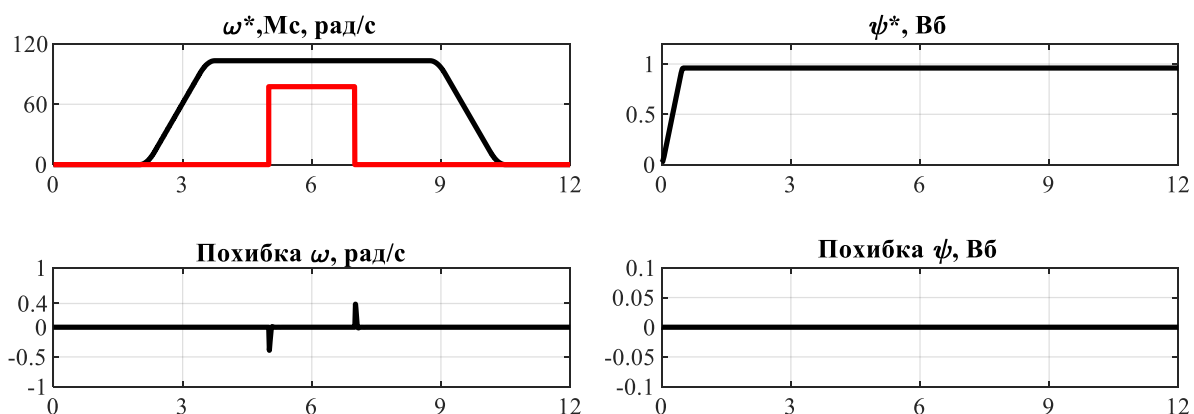


Рисунок 5.14 – Моделювання динамічних процесів в двигуні для заданої

$$\begin{array}{l} \text{швидкості} \\ \omega^* = \omega_n \\ M_c = M_n \end{array}$$

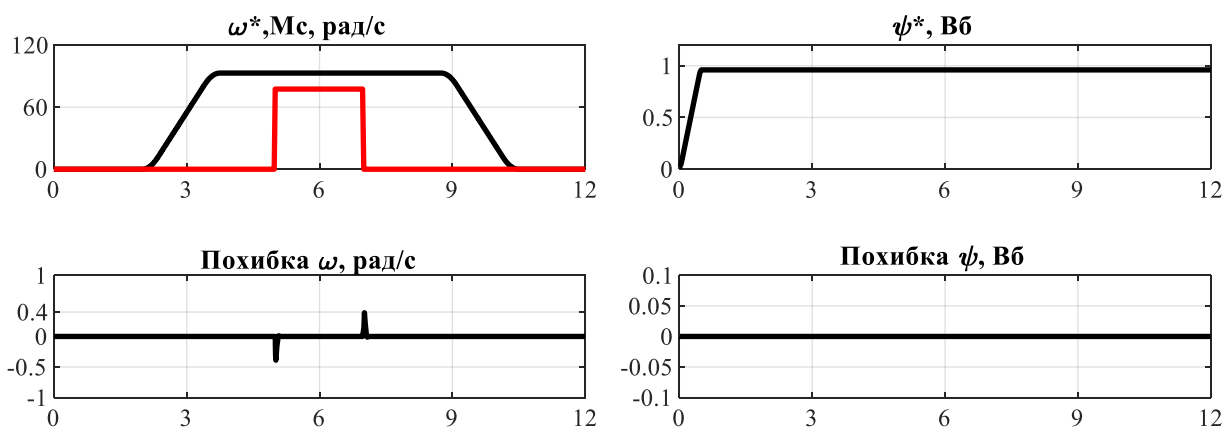


Рисунок 5.15 – Моделювання динамічних процесів в двигуні для заданої

швидкості  $\omega^* = 0.9 \cdot \omega_H$   
 $M_c = M_H$

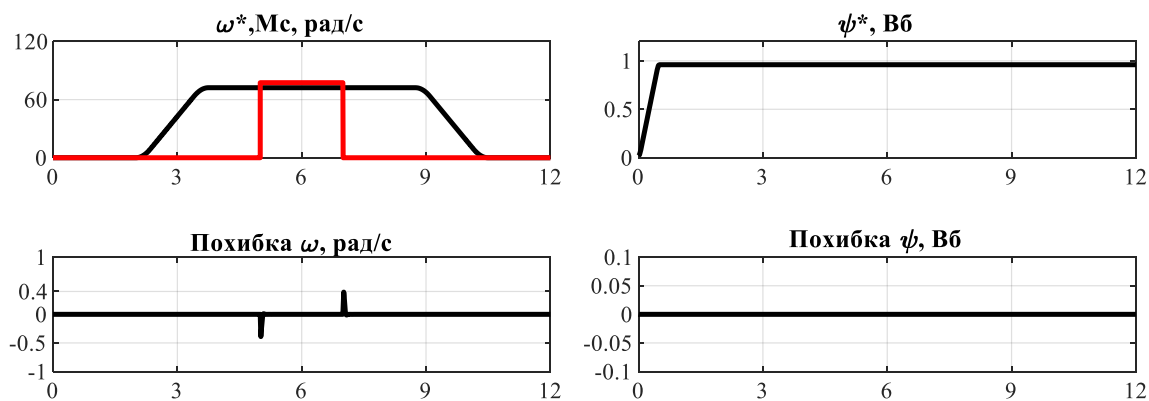


Рисунок 5.16 – Моделювання динамічних процесів в двигуні для заданої

швидкості  $\omega^* = 0.7 \cdot \omega_H$   
 $M_c = M_H$

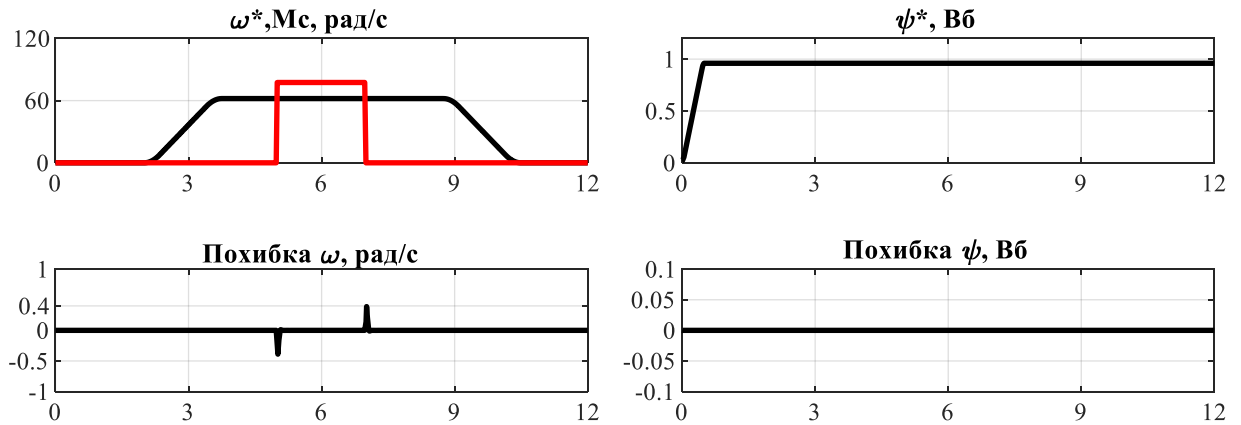


Рисунок 5.17 – Моделювання динамічних процесів в двигуні для заданої

швидкості  $\omega^* = 0.6 \cdot \omega_H$   
 $M_c = M_H$

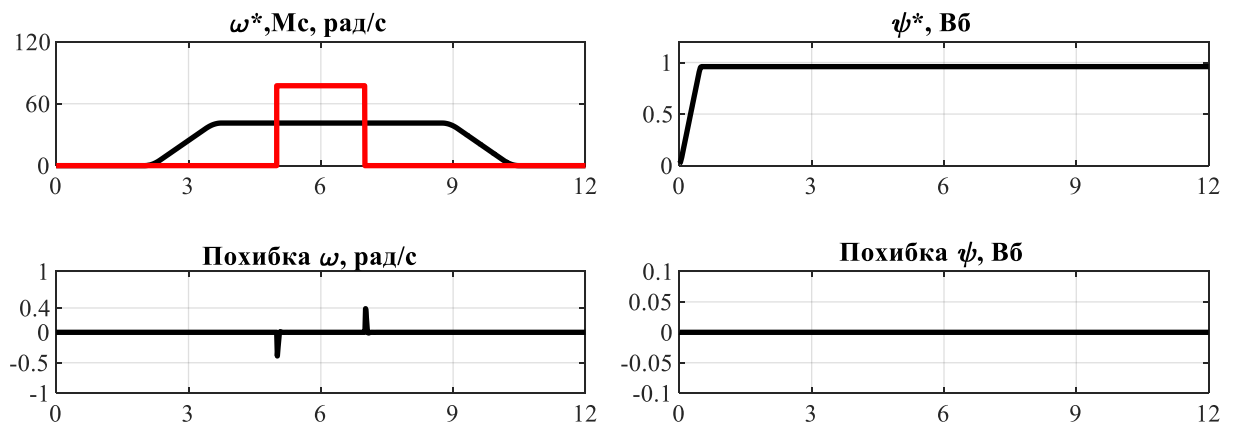


Рисунок 5.18 – Моделювання динамічних процесів в двигуні для заданої

швидкості  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$   
 $M_c = M_H$

Дослідження відпрацювання різних значень заданої швидкості  $\omega^* = \omega_H, 0.9 \cdot \omega_H, 0.7 \cdot \omega_H, 0.6 \cdot \omega_H, 0.4 \cdot \omega_H$ , при статичному моменті  $M_c = 0.5 \cdot M_H$ .

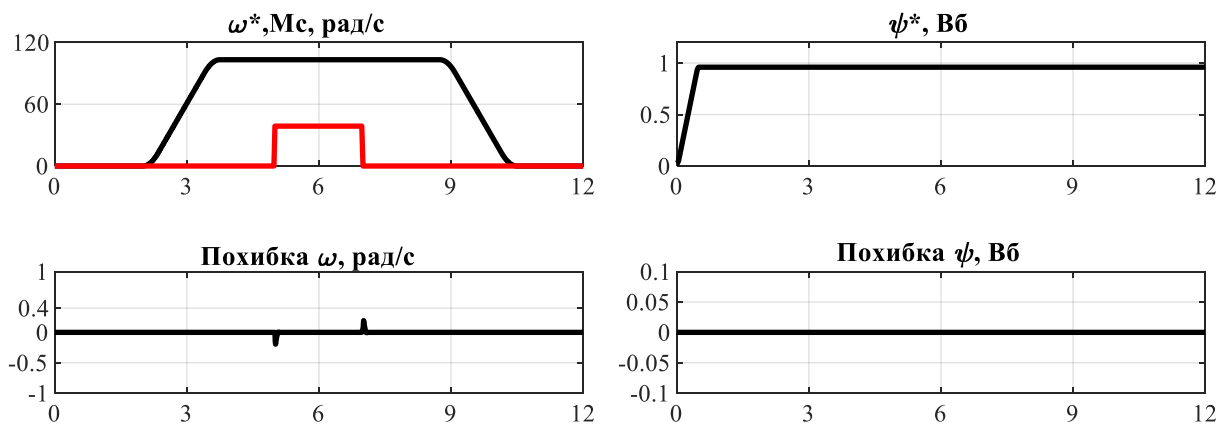


Рисунок 5.19 – Моделювання динамічних процесів в двигуні для заданої

швидкості  $\omega^* = \omega_H$   
 $M_c = 0.5 \cdot M_H$

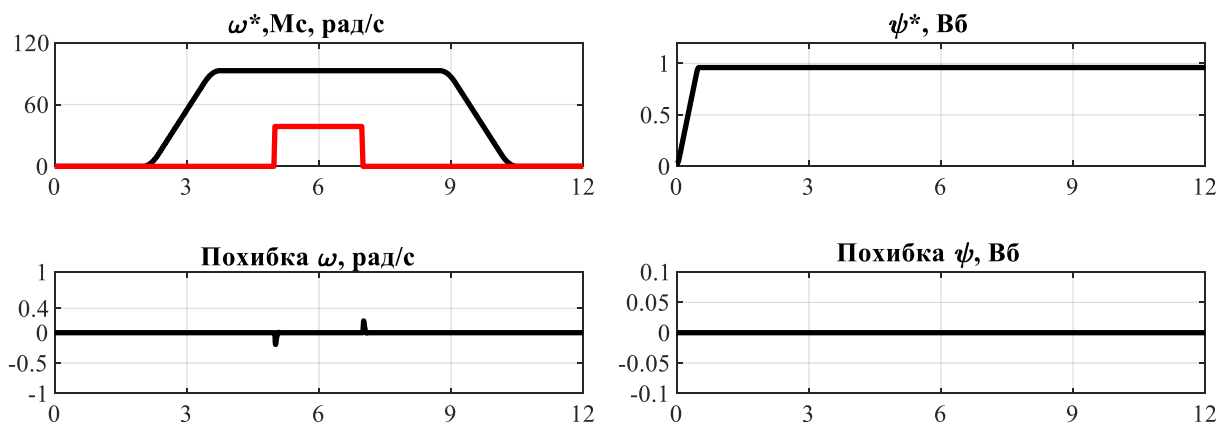


Рисунок 5.20 – Моделювання динамічних процесів в двигуні для заданої

швидкості  $\omega^* = 0.9 \cdot \omega_H$   
 $M_c = 0.5 \cdot M_H$

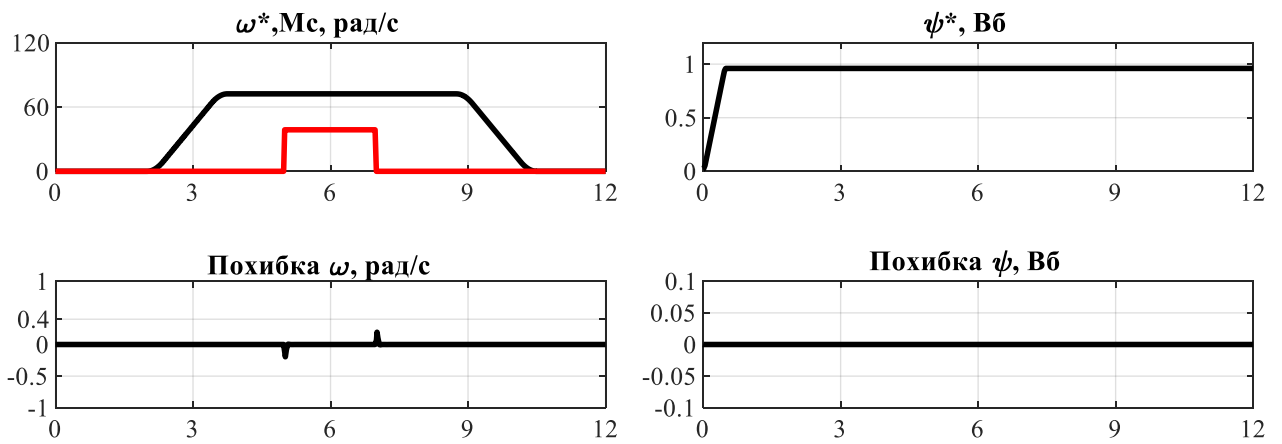


Рисунок 5.21 – Моделювання динамічних процесів в двигуні для заданої

швидкості  $\omega^* = 0.7 \cdot \omega_H$   
 $M_c = 0.5 \cdot M_H$

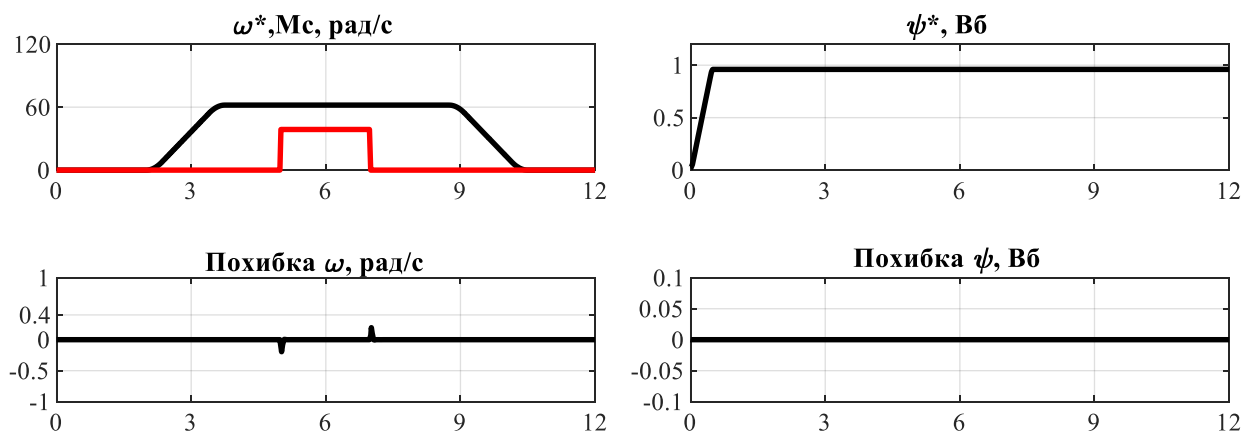


Рисунок 5.22 – Моделювання динамічних процесів в двигуні для заданої

швидкості  $\omega^* = 0.6 \cdot \omega_H$   
 $M_c = 0.5 \cdot M_H$

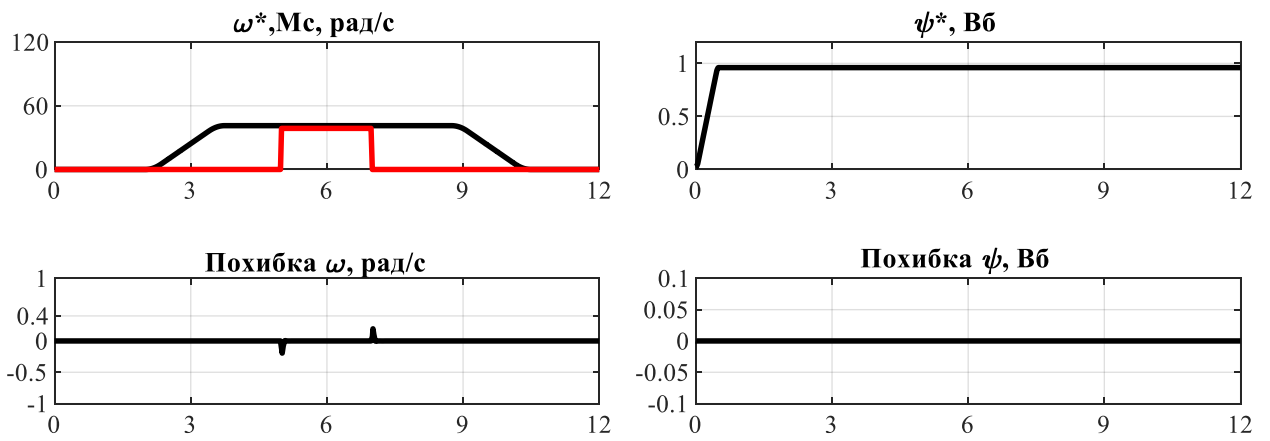


Рисунок 5.23 – Моделювання динамічних процесів в двигуні для заданої

швидкості  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_H$   
 $M_c = 0.5 \cdot M_H$

Таблиця 5.2 – Похибка відпрацювання швидкості

$\tilde{\omega}$ \ $\omega^*$	$0.4 \cdot \omega_H$	$0.6 \cdot \omega_H$	$0.7 \cdot \omega_H$	$0.9 \cdot \omega_H$	$\omega_H$
$\tilde{\omega}$ при $M_c = M_H$	0.41	0.41	0.42	0.42	0.43
$\tilde{\omega}$ при $M_c = 0.5 \cdot M_H$	0.19	0.20	0.20	0.20	0.21

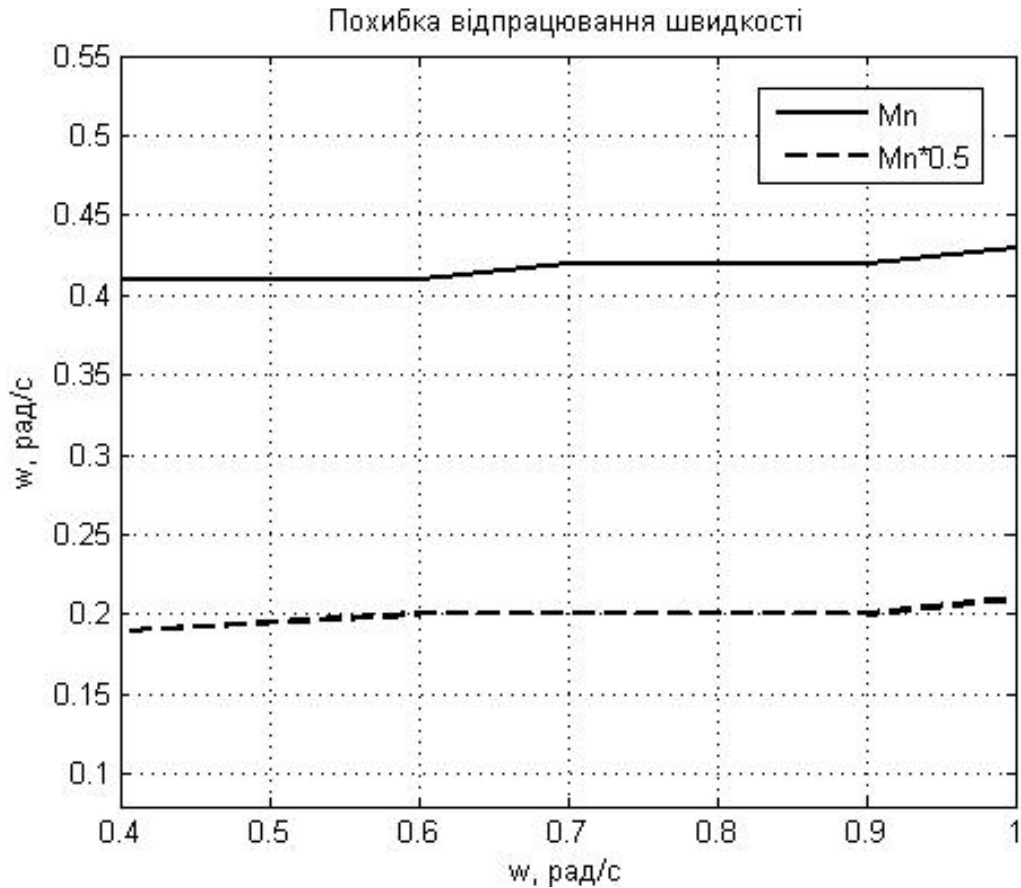


Рисунок 5.22 – Залежність похибки відпрацювання  $\omega^*$ , при  $M_c = M_n$  та  $M_c = 0.5 \cdot M_n$

Отримані результати показують що при зміні значення заданої швидкості  $\omega^* = \omega_n, 0.9 \cdot \omega_n, 0.7 \cdot \omega_n, 0.6 \cdot \omega_n, 0.4 \cdot \omega_n$ , та зміні значення статичного моменту від  $M_c = M_n$  до  $M_c = 0.5 \cdot M_n$  значення похибки відпрацювання швидкості коливаються в межах від 0.19 рад/с до 0.43 рад/с, що відповідає значенню 0.20% та 0.5% від заданої швидкості. Після завершення перехідного процесу швидкість стабілізується на рівні заданої. Похибка при накиданні навантаження визначається в перехідному процесі тривалість якої триває не більше 0,2 секунди.

### Висновки до розділу

Аналіз результатів показує, що в діапазоні коливання рівнів сталої швидкості конвеєра від  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_n$  до  $\omega^* = \omega_n$  та зміни моменту навантаження від  $0.5 M_n$  до  $1.1 M_n$ , похибка по швидкості змінюється від 0.26% та 0.6% від заданої швидкості. Після відпрацювання похибки протягом 0,2 секунди швидкість руху конвеєрної стрічки відновлюється до величини заданого значення.

## Висновки до роботи

На основі аналітичного огляду науково-технічного огляду літератури, вивчення режимів роботи конвеєрних систем, а також з урахування вимог до електроприводів систем безперервного транспорту з гнучким тяговим елементом виконано обґрунтування та вибір в якості електроприводу системи ПЧ-АД як найбільш раціональною.

Отримані результати дозволяють, визначити структуру електромеханічної системи конвеєра та забезпечити розрахунок та вибір його елементів.

В результаті тягового розрахунку визначені основні елементи стрічкового конвеєра, отримана навантажувальна діаграма на основі якої проведений вибір електродвигуна типу 4A355S6УЗ, потужністю 160 кВт.

Отримані результати дозволяють в подальшому виконати розрахунок та вибір елементів електромеханічної системи.

Далі була представлена функціональна схема керування, надано опис принципів її побудови. Виконано вибір перетворювача (ABBACS580), здійснено синтез регулятора швидкості.

Отримані результати дають можливість отримати математичні моделі електромеханічної системи.

У наступному пункті була наведена структурна схема непрямого векторного керування, надано алгоритм керування наведена структурна схеми відпрацювання моменту та потокозчеплення для обраного принципу керування. Отримані результати сумісно з попередніми, дозволяють сформулювати модель в пакеті прикладних програм MATLAB Simulink, для дослідження електромеханічної системи конвеєра.

Та у останній частині даної роботи було зроблено аналіз який показує, що в діапазоні коливання рівнів сталої швидкості конвеєра від  $\omega^* = 0.4 \cdot \omega_n$  до  $\omega^* = \omega_n$  та зміни моменту навантаження від  $0.5 M_n$  до  $1.1 M_n$ . похибка по швидкості змінюється від 0.26% та 0.6% від заданої швидкості. Після відпрацювання похибки протягом 0,2 секунди швидкість руху конвеєрної стрічки відновлюється до величини заданого значення

### Перелік використаної літератури

1. Ромакин, Н. Е. Машины непрерывного транспорта: справочник / Н.Е. Ромакин. – Москва: ООО "Академия", 2008.
2. Дослідження управління енергозберігаючими стрічковими конвеєрами зі змінною швидкістю стрічки відносно швидкості потоку матеріалу. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0227992>
3. Дослідження видів і причин ушкоджень стрічки в процесі експлуатації стрічкових конвеєрів URL: <http://eir.pstu.edu/bitstream/handle/123456789/13391/c.%2059-65.pdf?sequence=1>
4. Стрічкові конвеєри уникаючі розсипання. URL: <https://mining-media.ru/ru/article/transport/1254-besprosyynye-lentochnye-konvejery>
5. Функціональна схема та спрощений розрахунок перетворювача електропривода змінного струму. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційних робіт для студентів напрямку підготовки 6.050702 – “Електромеханіка” спеціальності 7.05070204 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Ковбаса. –К.: НТУУ “КПІ”, 2013 р. –22 с.
6. Теорія мехатронних систем – 1: Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання напряму підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. –К.: НТУУ “КПІ”, 2011 р. –96 с.
7. Пересада С. М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть I. Проблемы векторного управления в асинхронном электроприводе: краткий обзор и формулировка проблемы // Техн. електродинаміка. –1999. –№ 2. –С. 27–32.
8. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник.-К.:Либідь,1997.-554 с.;

9. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателя в электроприводе. Изд. 6-е, исправленное. М., Энергия, 1977. - 432 с
10. Копылов И.П. – Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1987. – 248 с.
11. Копылов И.П. – Справочник по электротехническим машинам: 1988г.
12. Справочное пособие – Горные машины для очистных работ: 1978г.
13. Топорков А.А. - Машинист горных выемочных машин. – М.: Недра 1991 – 334 с.
14. Сайт виробника силових модулів і систем URL: <http://www.semikron.com>;
15. Електронні компоненти URL: <http://catalogplus.distrelec.de>;
16. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателя в электроприводе. Изд. 6-е, исправленное. М., Энергия, 1977. - 432 с.
17. Методичні вказівки до виконання курсової роботи для студентів денної форми навчання з дисципліни «Електромеханічні системи автоматизації загальнопромислових механізмів-2», 2013р. ;
18. Каталог продукції АВВ URL: <https://new.abb.com/drives/ru/nv-privody/standartnie-privody/acs580>;
19. Киркач Н.Ф. Расчет и проектирование деталей машин – X: «Высшая школа»,1988.
20. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин. – М.:«Высшая школа»,1985.
21. Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. Машины непрерывного транспорта. – М.:«Машиностроение».