

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ННІ/факультет

Кафедра

Спеціальність

Форма навчання

Електричної інженерії та автоматизації

141 «Електроенергетика електротехніка та електромеханіка»

Денна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Бастиль Дмитро Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему «Модернізація асинхронного електроприводу компресора Atlas Copco»

(повна назва теми)

за матеріалами

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник

к.п.н.

(наук. ступінь, вчене звання)

(підпис)

Піроженко А.В.

(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від _____ 20__ р. № _____

Завідувач кафедри

(підпис)

Є.О. Модло

Наук. ступінь, вчене звання

Ініціали, прізвище

Кривий Ріг – 2026

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації

Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

– (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Модло Є.О.

« » 20 року

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ(КИ)

Бастиль Дмитро Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи «Модернізація асинхронного електроприводу компресора Atlas Copco»

керівник випускної роботи Пироженко Андрій Володимирович, доцент, к.т.н.

,

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від « » 20 року №

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи Вугільна шихта для отримання формованого коксу повинна містити 60 - 70% газового і довгополуменевого вугілля, до 20% слабоспікаючого і 15 - 40% худого вугілля.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналітична частина; Основна частина; Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Загальний вигляд коксової печі; Аналіз факторів що впливають на ККД; Загальний вигляд; Функціональна схема; Структурна схема САУ; Структурна схема; Алгоритм; Техніко-економічні показники

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Частина 1	<u>Пироженко А.В.</u>		
Частина 2	<u>Пироженко А.В.</u>		
Частина 3	<u>Пироженко А.В.</u>		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1	Аналітична частина		
2	Основна частина		
3	Охорона праці		
4	Здача роботи на кафедрі		
5	Захист випускної роботи		

Студент _____ Бастиль Д.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи _____ Пироженко А.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення			Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.
1	A3	ВРБ.151.244-см.05.Е2			Схема електрична	1		
2					функціональна			
3								
4	A3	ВРБ.151.244-см.05.Е1.1			Схема електрична	1		
5					структурна джерела			
6					живлення, що реалізує			
7					імпульсно-знакозмінний			
8					режим живлення фільтра			
9								
10	A3	ВРБ.151.244-см.05.Е1.2			Схема електрична	1		
11					структурна			
12					знакозмінного імпульсного			
13					регулятора			
14								
15	A3	ВРБ.151.244-см.05.Е1.3			Схема електрична	1		
16					структурна			
17					знакозмінного			
18					уніполярного регулятора			
19								
20	A3	ВРБ.151.244-см.05.Е1.4			Блок-схема алгоритма	1		
21					роботи			
22					робочої станції			
23								
24	A3	ВРБ.151.244-см.05.ПЗ			Пояснювальна записка	66		
25								
26								
					ВРМ.151.244-см.05.ВР			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Модернізація асинхронного електроприводу компресора Atlas Copco Відомість роботи			
Розроб.		Бастиль Д. О.						
Пров.		Пироженко А.В.						
Н.контр.		Пироженко А.В.						
Затв.		Модло Є.О.			Літера Аркуш Аркушів 4 1 ННТІ ДУЕТ Каф.ЕІА гр. ЕПА-24м			

ВСТУП

В багатьох галузях промисловості широко використовується різноманітне пневматичне устаткування. Саме тому його ефективність є суттєво важливим фактором, що може вплинути на якість вихідної продукції. У більшості випадків робота пневматичного устаткування передбачає використання атмосферного повітря як технологічного середовища, природний стан якого, безумовно, має шкідливі домішки. В даний час раціоналізація виробництва, а зокрема енергозбереження, є однією з основних стратегій технічного розвитку в передових країнах світу. Електродвигуни споживають більше половини всієї виробленої електроенергії, а найчастіше застосовуваним став асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Його популяризація відбулася завдяки відносній простоті і дуже високій надійності.

Одним з основних рішень для енергозбереження, що використовуються в асинхронному двигуні, є впровадження частотного регулювання. Поряд зі зниженням споживання електричної енергії перетворювач частоти дозволяє отримати більш якісні перехідні процеси і знизити динамічні навантаження, що призведе до збільшення експлуатаційного терміну компресора.

Компресори це механізми, що мають поширення на багатьох промислових виробництвах. Компресори використовують для одержання стисненого повітря або іншого газу тиском понад $4 \cdot 10^5$ Па (4 кгс/см^2), для застосування енергії в приводах пневматичних інструментів та в пристроях пневмоавтоматики та ін.

Відомо, що більшість компресорних установок використовує нерегульований електропривод. Це обумовлено тим, що дуже мала кількість пристроїв і агрегатів вимагають підтримки постійного тиску для їх коректної роботи. Але існують такі пристрої, де установка регульованого електроприводу може привести не тільки до зниження споживаної енергії, але і до поліпшення якості продукції, що випускається. Метою роботи є модернізація асинхронного електроприводу компресора Atlas Copco.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Основні відомості про технологічний процес, технологічний механізм, загальний вид, кінематика і режим роботи

Об'єктом дослідження магістерської роботи є асинхронний електропривод компресора Atlas Copco.

Предметом дослідження – система векторного керування асинхронним електродвигуном у складі компресорної установки.

Аналіз технічних характеристик існуючих компресорів

Стиснене повітря потрібне на промислових підприємствах, і це найдорожче джерело енергії. Приблизно 15 % витраченої електроенергії на отримання стисненого повітря перетворюється на потенційну енергію, яка використовується при його розширенні. Значна частина – 85 % – це тепло, яке компресор виділяє під час роботи [4]. Майже всі машини і пристрої, що мають пневматичний привід, використовують компресоване повітря [5]. Багато сучасних виробництв, зокрема тих, що відносяться до сфери важкого машинобудування, використовують повітря для найрізноманітніших верстатів і пристроїв. Їм також необхідне повітря - причому в дуже великих кількостях, переважно, коли установка повинна працювати цілодобово і коли вона має високі показники потужності. А це все говорить про те, що в багатьох випадках стиснене повітря є дійсно необхідним. Використовують стиснене повітря для: роботи систем пневмотранспорту, бурових верстатів тощо; роботи пневматичних інструментів і приводів; роботи систем КВПіА і пневмосистем [6]. На підприємствах для повітряпостачання стиснене повітря має інші характеристики, ніж для характеристик системи технологічних процесів. Стиснене повітря затребуване в нафтогазовій галузі. Висока швидкість розвитку нафтогазової галузі призвела до збільшення виробництва та використання стисненого повітря. Експлуатація стисненого повітря механізує трудомісткі технологічні процеси в технологічних процесах. Широкому використанню стисненого повітря як енергоносія

сприяли його особливі властивості: нешкідливість, прозорість, пружність, необмежений запас повітря в природі та швидка передача тиску [1]. Стиснене повітря на промислі отримують за допомогою спеціального пристрою, який називається компресором (рис.1.1).

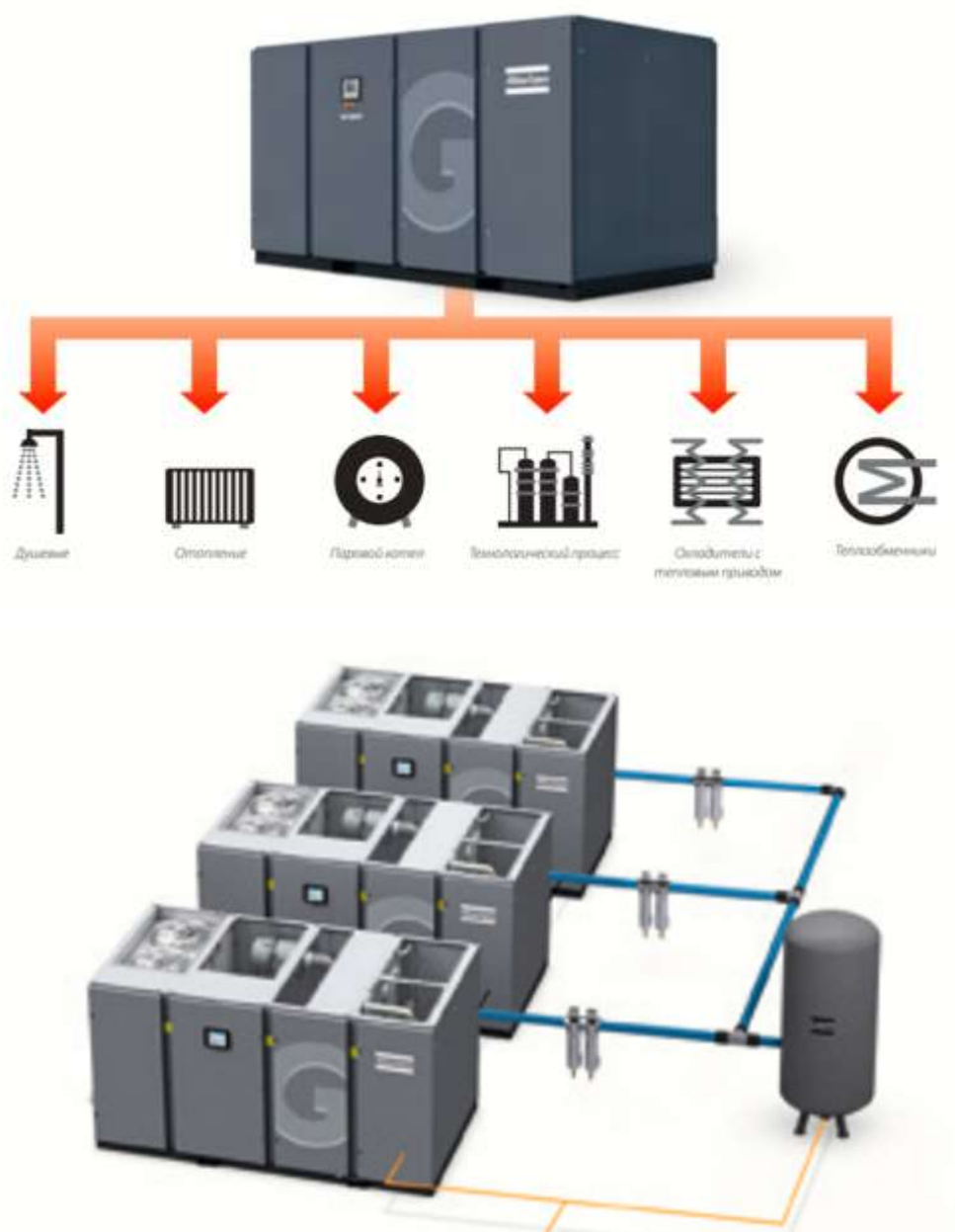


Рис.1.1. Компресорна станція Atlas Copco

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

Компресори – це пристрої для створення направленого потоку газу під тиском. Компресорні установки досить поширені, вони широко використовуються на залізничному транспорті, в холодильних установках, в пневматичних

пристроях [2]. Допоміжні компресори потрібні для наповнення стисненим повітрям пневматичних магістралей, наприклад, головного повітряного вимикача, блокування щитів високовольтної камери і піднімання струмоприймача при відсутності стисненого повітря в головних резервуарах і резервуарі струмоприймача після довгої стоянки рухомого складу в неробочому стані.

За принципом дії та конструктивними особливостями розрізняють наступні основні типи компресорних машин: поршневі, ротаційні, відцентрові і осьові компресори. Компресори також поділяють:

- по створюваному тиску (низького тиску – до 1 МПа, середнього – до 10 МПа, високого – до 100 МПа і надвисокого – більше 100 МПа);
- за родом робочого газу - повітряні, кисневі, аміачні, для природного газу та ін.;
- за умовами експлуатації:
 - а) стаціонарні (з масивним фундаментом і постійним обслуговуванням);
 - б) пересувні (переміщувані при експлуатації, іноді без постійного обслуговування);
 - в) автономні (з власними допоміжними системами, включеними до складу агрегату);
 - по системі охолодження:
 - а) без штучного охолодження;
 - б) з повітряним охолодженням;
 - в) з внутрішнім водяним охолодженням;
 - г) із зовнішнім охолодженням в одному, двох і т. д. проміжних охолоджувачах;
 - е) охолоджувані уприскуванням рідини.

Поршковий компресор (рис.1.2) в основному складається з робочого циліндра і поршня; має всмоктувальний і нагнітальний клапани, розташовані зазвичай в кришці циліндра. Для надання поршню зворотно-поступального руху в більшості поршкових компресорів присутній кривошипно-шатунний механізм з колінчастим валом. При зворотно-поступальному русі поршня

здійснюються фази процесу: розширення, всмоктування, стиснення і виштовхування. Спосіб дії поршневого компресора, заснований на створенні надлишкового тиску, що дозволяє будувати конструкції з малим діаметром і ходом поршня при відносно малій подачі.



Рис.1.2. Поршковий насос Atlas Copco

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

Ротаційні компресори (рис.1.3) здійснюють всмоктування і стиснення газу за допомогою обертального руху пластин. Вони виготовляються у двох варіантах: зі стаціонарними пластинами і з пластинами, що обертаються. У компресорі зі стаціонарними пластинами на роторі двигуна встановлений ексцентрик. При обертанні ротора ексцентрик обкатується по внутрішній поверхні циліндра, стискаючи перед собою чергову порцію газу. У другому варіанті виконання ексцентрично встановлений ротор, дотичний з внутрішньою поверхнею циліндра статора і має на своїй поверхні радіально розташовані щілини (прорізи) з вставленими в них пластинами. Ці пластини можуть вільно ковзати в щілинах під дією відцентрових сил, які притискають їх до внутрішньої поверхні циліндра при обертанні ротора. Пластини поділяють зони високого і низького тиску.



Рис.1.3. Ротаційні гвинтові повітряні компресори Atlas Copco

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

Ротаційні гвинтові компресори призначені для широкого кола користувачів у різних галузях промисловості й сферах застосування. Вони приводяться в дію двома гвинтами, що обертаються в протилежних напрямках, стискаючи повітря під час його проходження через компресор.

Ці агрегати призначені для безперервного використання, здатні працювати 24 години на добу, 7 днів на тиждень. Вони відомі своєю безшумною роботою - з рівнем шуму близько 60 дБА - і продуктивністю у виробництві стисненого повітря. Цей тип компресорів більш ефективний і має довший термін служби в порівнянні з поршневими компресорами, що робить їх відмінною довгостроковою інвестицією в багатьох галузях промисловості.

Доступні дві основні моделі ротаційних повітряних компресорів: оливні й безоливні з приводами з фіксованою швидкістю, двошвидкісними приводами та приводами з регульованою швидкістю.

Оливні компресори (рис.1.4) подають оливу в камеру стискання, де вона охолоджує й змащує елементи компресора, допомагає відводити тепло від процесу стискання та мінімізувати витоки. Ці компресори обирають через

здатність до безперервної роботи, низький рівень витікання оливи й мінімальну втрату потужності з плином часу. Вони підходять для вирішення широкого спектра виробничих завдань.



1.4. Рис. Оливні гвинтові повітряні компресори

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

Відцентровий компресори загалом складається з корпусу і ротора, що має вал з симетрично розташованими робочими колесами. Під час роботи відцентрового компресора часткам газу, що знаходяться між лопатками робочого колеса, надається обертальний рух, завдяки чому на них діють відцентрові сили. Під дією цих сил газ переміщується від осі компресору до периферії робочого колеса, зазнає стискування і набуває швидкості. Осьовий компресор має ротор, що складається зазвичай з декількох рядів робочих лопаток. На внутрішній стінці корпусу розташовуються ряди направляючих лопаток. При роботі осьового компресору обертові робочі лопатки діють на частки газу, що знаходяться між ними, змушуючи їх стискатися, а також переміщуватись паралельно осі компресору. Нерухомі направляючі лопатки забезпечують, головним чином, зміну напрямку швидкості частинок газу, що необхідна для ефективної роботи наступних робочих лопаток. Основними параметрами, що характеризують роботу компресора, є об'ємна подача Q (обчислюється зазвичай

за умов всмоктування), початковий p_1 і кінцевий p_2 тиск або ступінь його підвищення, частота обертання і потужність N на валу компресора.

Орієнтовні значення основних параметрів компресорних машин різних типів, що застосовуються в промисловості, наведені в таблиці 1.1.

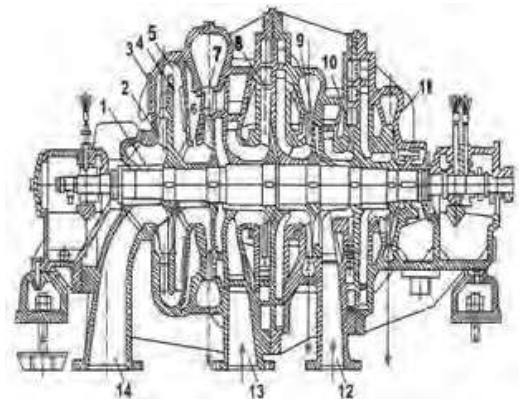
Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика компресорного обладнання AtlasCorpo

Тип	$Q, \text{ м}^3 / \text{хв}$	ε	$n, \text{ об/хв}$	Галузь застосування
Поршневий	0 - 500	2,5 - 1000	100 - 3000	Хімічна промисловість, холодильні установки, пневматичні системи, гаражне господарство
Ротаційний	0 - 500	3 - 12	300 - 15000	Хімічна промисловість, металургійних печах
Відцентровий	100 - 4000	3 - 20	1500 - 45000	Центральні компресорні станції
Осьовий	100 - 15000	2 - 20	500 - 20000	Доменні і сталеливарні заводи

Примітка. Джерело: Розроблено із виконанням [1]

Компресори спрощено складаються з: електродвигуна або приводу; нагнітаючої установки; ємностей для стисненого газу; сполучних шлангів і труб.



1 – вал; 2, 6, 8, 9, 10 і 11 – робочі колеса; 3 і 7 – кільцеві дифузори; 4 – зворотний направляючий канал; 5 – направляючий апарат; 12 і 13 – канали для підведення газу з холодильників; 14 – канал для всмоктування газу

Рис.1.5. Відцентровий компресор

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

Принцип роботи відцентрового компресора.

Прилад відцентрового компресора і принцип роботи базуються на динамічному стисненні газоподібної суміші. Основним вузлом даного обладнання вважається ротор, оснащений валом з робочими колесами, розташування яких симетричне. У процесі роботи обладнання на частинки газу діє сила інерції, яка виникає завдяки переміщенню газу від центру компресора до краю робочого колеса, в результаті чого газ стискається, набуваючи певної швидкості. Далі швидкість газу знижується, подальше стиснення відбувається в круговому дифузорі, при цьому кінетична енергія переходить в потенційну. На наступному етапі газ надходить у зворотний направляючий канал і переходить в наступний ступінь установки.

Важливою відмінністю відцентрових установок від іншого обладнання є відсутність контакту між маслом і газом. У випадку з агрегатами даного типу вимоги до мастила робочих елементів обладнання значно нижчі, ніж в установках об'ємної дії. При цьому мастило повністю захищає від іржі елементи обладнання, а масло, що має слабе окислення, змащує зубчасті колеса, ущільнення і підшипники максимально ефективно. Так, дія відцентрового компресора ґрунтується на обертальному русі лопатей робочого колеса, яке є одним з головних робочих елементів установок відцентрової групи. При цьому даному обладнанню характерне швидке підвищення рівня тиску і досягнення його максимальної величини за короткий період роботи агрегату.

Така особливість компресора дозволяє отримати відразу безліч переваг – можливість тривалої експлуатації при високому рівні результативності роботи. Дане обладнання протягом тривалого періоду часу вимагає мінімального втручання, а в разі поломки, легко піддається ремонту.

Електродвигуни, що використовуються в компресорних установках, можуть бути постійного і змінного струму. Двигуни змінного струму діляться на синхронні і асинхронні (АД). Асинхронні двигуни в свою чергу на АД з короткозамкненим ротором і АД з фазним ротором. Для асинхронні двигунів з короткозамкненим ротором перевагами для їх установки в компресорі є їх

економічність, простота, зручність конструкції і велика надійності роботи. Їх недоліки – це пусковий струм, який в 5-7 разів перевищує номінальний струм двигуна і малий пусковий момент.

Асинхронні двигуни з фазним ротором використовують набагато рідше (в основному у відцентрових насосах). Вони використовуються в малопотужних мережах або якщо потрібен значний пусковий момент (при відносно невеликому пусковому струмі). Але у них складна пускорегулювальна апаратура і потрібен догляд за щітками і кільцями. Синхронні двигуни використовуються в компресорах великої потужності (більше 100 кВт). У них дуже високий коефіцієнт потужності ($\cos\varphi \approx 1$) і вони не дуже сприйнятливі до змін навантаження. Але в той же час вони значно дорожчі за асинхронні двигуни і при пуску у них спостерігаються ті ж недоліки що і у АД з короткозамкненим ротором. Лінійні електроприводи бувають електромагнітними, магнітоелектричними і індукційними. Вони застосовуються здебільшого при невеликих поршневих зусиллях і при малому ході поршня. Нагнітаючі пристрої – це пристрої, які під дією сили, прикладеної від приводу, нагнітають газ в спеціальні ємності, які здатні витримати той тиск, що може створити компресор.

Визначимо сфери застосування компресорів

1. Пневматичні інструменти: Подача повітря для роботи пневматичних інструментів, які використовуються в процесі обслуговування та ремонту обладнання.

2. Технологічні процеси: Забезпечення стисненим повітрям виробничих ліній та процесів, де потрібне стабільне та надійне джерело газу.

3. Системи керування та автоматики: Живлення пневматичних систем, які використовуються для автоматизації та контролю окремих операцій на виробництві.

Компресори Atlas Copco використовуються в коксохімічному виробництві для забезпечення різних технологічних процесів стисненим повітрям, таких як живлення пневматичних інструментів, систем керування та виробничого обладнання. Гвинтові компресори виробництва Atlas Copco ідеально

підходять для цих цілей завдяки своїй здатності працювати безперервно, надаючи стабільний потік стисненого повітря. Сформулюємо відомі переваги використання компресорів Atlas Copco

Безперервна робота: гвинтові компресори Atlas Copco розроблені для безперебійної роботи, що є ключовим фактором у безперервних виробничих циклах, характерних для коксохімії.

Надійність: обладнання Atlas Copco відоме своєю високою надійністю та довговічністю, що знижує ризики простоїв на виробництві.

Ефективність: компресори забезпечують необхідний тиск і витрату повітря з високою енергоефективністю.

Компресор бере участь у виробництві теплоізоляційного матеріалу - кам'яної вати. У технологічному процесі компресор використовується під час видування волокна в камеру осадження, а також у пневматичних установках при нарізанні, транспортуванні та пакуванні килима з кам'яної вати під час руху по виробничій лінії.

1.2 Загальна характеристика об'єкта управління. Пристрій та принцип роботи компресора Atlas Copco

Компресор Atlas Copco GA22-13FF – це модульний винтовий компресор, спроектований для нафтогазової та металургійної промисловості. Усі моделі компресорів Atlas Copco оснащено мікропроцесорним блоком управління MC2, який забезпечує якість управління та контроль усіх компонентів компресорної станції в автоматичному режимі реального часу з виведенням на дисплей параметрів його роботи. Загальний вигляд компресорної установки Atlas Copco представлено на рисунках 1.6-1.9 [5].



Рис.1.6. Загальний вигляд компресорної установки Atlas Copco

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]



Рис. 1.7. Загальний вигляд компресора GA з повітряним охолодженням

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

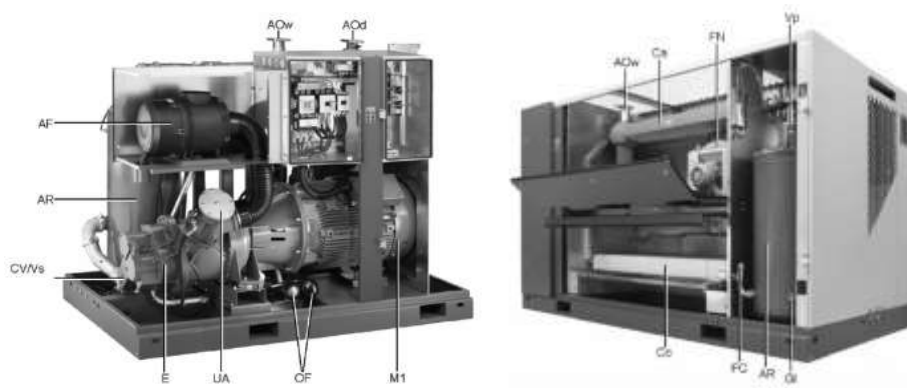
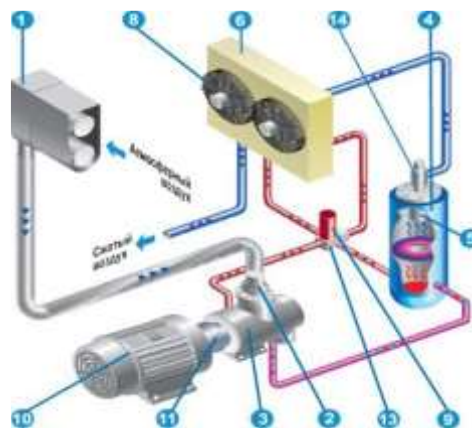


Рис. 1.8. Вид спереду і вид ззаду компресора GA з повітряним охолодженням

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Компресори GA являють собою одноступінчасті гвинтові компресори з уприскуванням оливи та з механічним приводом від електродвигуна, вміщені в корпус, що поглинає звуки [3]. Пристрій гвинтового компресора показано на рисунку 1.9 [4].



1 - повітряний фільтр; 2 - впускний клапан; 3 - гвинтовий блок; 4 - маслобак (первинний сепаратор); 5 - внутрішній сепаратор; 7 - комбінований радіатор; 8 - вентилятор радіатора з електродвигуном; 9 - масляний фільтр; 10 - головний електродвигун; 11 - пряма передача (муфта); 13 – термостатичний клапан; 14 - клапан мінімального тиску

Рис. 1.9. Пристрій компресора GA з повітряним охолодженням

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Через повітряний фільтр 1 та впускний клапан 2 атмосферне повітря поступає до гвинтового блоку 3 компресора, де змішується з маслом. Далі повітряно-масляна суміш нагнітається за допомогою гвинтового блоку в пневмосистему. Розподілення масла і повітря проходить в маслобаку 4. Попередньо очищене повітря від масла, проходить доочистку у внутрішньому сепараторі 5. Потім через охолоджуючий комбінований радіатор 6 зжате повітря поступає на вихід компресора. Основний потік масла з маслобака повертається у гвинтовий блок через масляний фільтр 9. Масло, залежно від температури, проходить або по малому колі, або по великому колу через комбінований радіатор 6. Регулювання виконується за допомогою термостата, який встановлено в комбінований блок 12 або термостатичним клапаном 13. Масло, яке відділилося в сепараторі тонкого очищення відводиться у гвинтовий блок 3. Гвинтовий блок 3 приводиться в рух головним електродвигуном 10 за рахунок ремінної прямої передачі 11. Комбінований радіатор 6 обдувається повітрям за допомогою вентилятора 8. Головний елемент гвинтового компресора – це гвинтовий блок рис. 1.10, який складається з двох черв'ячних роторів, що знаходяться в зчепленні. Один з роторів – ведучий, другий – відомий.

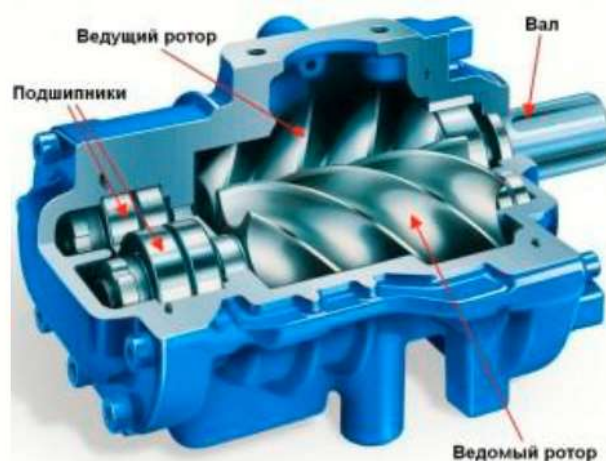


Рис. 1.10. Гвинтовий блок компресора ГА

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Двигун обертає гвинтову пару через систему привода. Попередньо очищене, у впускному повітряному фільтрі, повітря попадає до гвинтової пари,

змішується з маслом, що подається в ємність стискання. Масло забезпечує масляний клин між зубцями роторів гвинтової пари (відсутнє торкання гвинтів). Зазор між роторами та корпусом ущільнюється, повітря стискається, при цьому масло відводить тепло, яке виділяється, а механізми змазуються. Повітряно-масляна суміш стискається у гвинтовому блоці та поступає у повітряно-масляну ємність, до проходить сепарація (відділення) масла від повітря. Повітря після охолодження поступає на вихід гвинтового компресора, а масло після охолодження у масляному радіаторі та додатковій фільтрації у масляному фільтрі знову повертається у гвинтовий блок. Після процесу всмоктування, простір між поверхнею вінтів роторів, корпусом гвинтового блоку зменшується, при цьому не має відтоку повітря з міжзубчастого простору. Цей процес називається стисненням. Роторі продовжують обертатися та своїми зубцями, переміщують даний об'єм до випускного отвору. Так виглядає процес переміщення. В процесі переміщення зменшується простір та переміщуються до випускного отвору, у середині знаходиться повітря, яке стискується та тиск швидко зростає. Так виконується процес стискання, в ході якого речовина, яка змазує шляхом всприскування до полости стискання. Потім переміщується з повітрям під тиском.

1.3 Коротка технічна характеристика електропривода повітряного компресора

Асинхронний електропривод компресора Atlas Copco.

Тип компресора – гвинтовий компресор Atlas Copco; характеристика електропривода: $U_n = 380$ В – номінальна напруга; $P_n = 160$ кВт – номінальна потужність; $n_n = 1500$ об/хв – синхронна частота обертання; тип охолодження – IC411; спосіб збудження – асинхронний (з короткозамкненим ротором); ступінь захисту – IP55; тип привода – електропривод з частотним регулюванням.

На рис. 1.11 представлена схема електричних підключень компресора, а на рис. 1.12 схема потоків компресора.

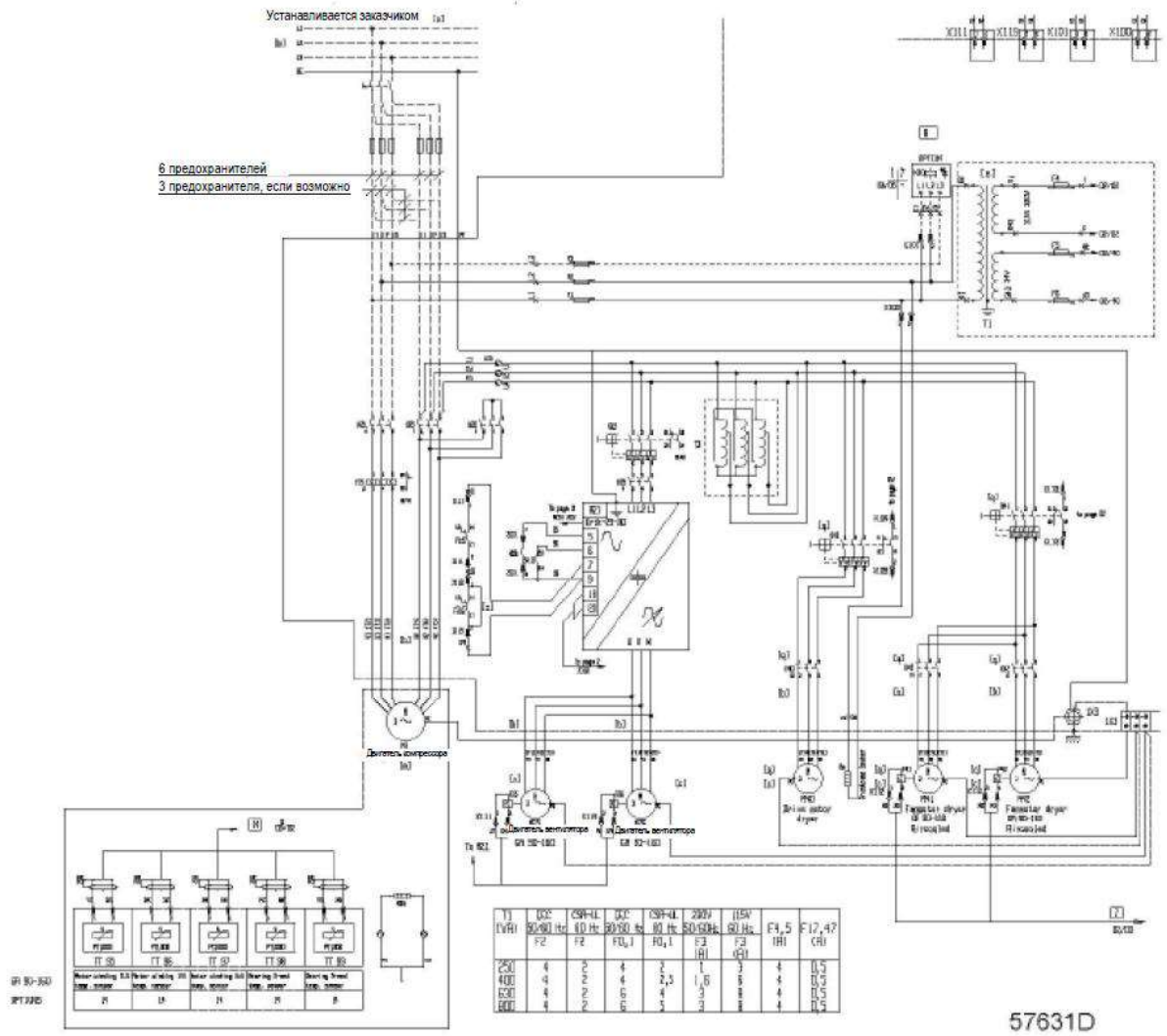
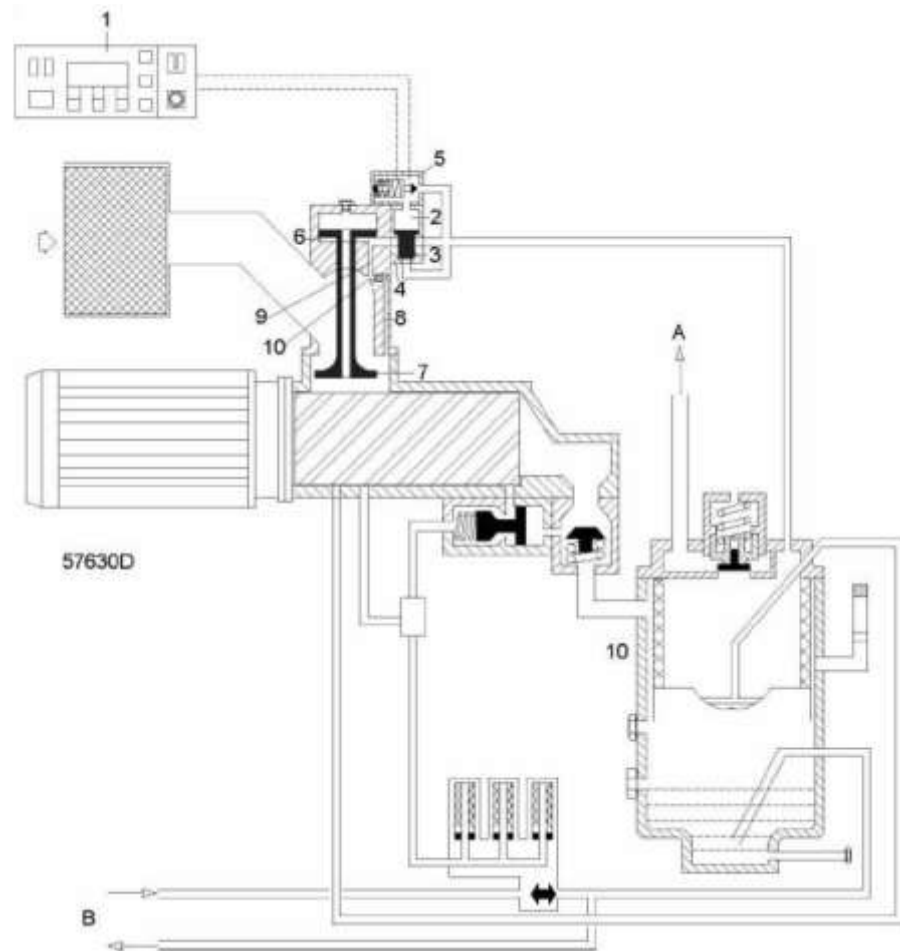


Рис. 1.11. Схема електричних підключень компресора

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]



А - до повітроохолоджувача; В - до маслоохолоджувача/від маслоохолоджувача

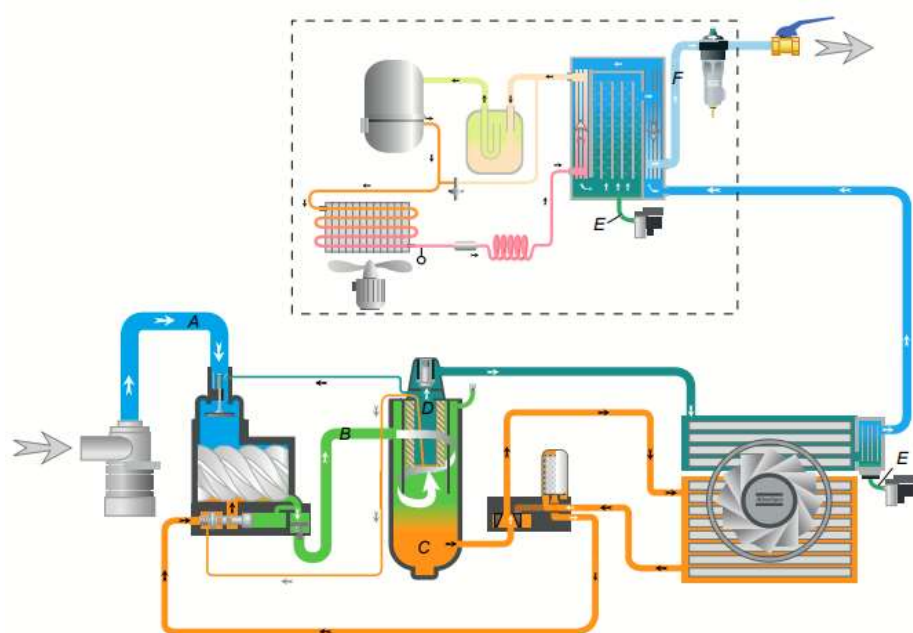


Рис. 1.12. Схема потоків компресора

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Робоче місце GA

Робоче місце GA розташоване в звукоізовлюваному корпусі. Компресорами керує регулятор Atlas Copco Elektronikon. Електронний модуль керування встановлений на дверцятах з правого боку. За цією панеллю розташована електрична шафа з пускатчем двигуна. Передбачено конденсатозбірник з електронним зливом води (EWD).



AV - випускний клапан повітря; Ca - повітряний охолоджувач; Co - масляний охолоджувач; CV/Vs - зворотний клапан/запірний клапан оливи; Da - автоматичний випуск конденсату; E - компресорний елемент; ER - Графічний контролер Elektronikon; FN - вентилятор охолодження; HC - система рекуперації енергії; M1 - привідний двигун; S3 - кнопка аварійної зупинки; UA – розвантажувач; VP - вентиляційна пробка

Рис. 1.13. Схема компресора GA 37+ up to GA 75

Примітка. Джерело: Розроблено із виконанням [3]

1.4 Режим роботи

Навантаження – змінне, залежно від режиму споживання стисненого повітря. Компресор Atlas Copco призначений для тривалої експлуатації з частими циклами навантаження і розвантаження в залежності від споживання стисненого повітря, тому режим роботи електроприводу є тривалим зі змінним

навантаженням, близьким до безперервного режиму S1. Електропривод повинен забезпечувати стійку роботу при частих пусках, плавне регулювання продуктивності і мінімальні динамічні навантаження на механічну частину компресора. При роботі компресора основний час привід функціонує в усталеному режимі, а перехідні процеси виникають при пуску, зупинці і зміні частоти обертання. Інтенсивність перехідних процесів визначає рівень пускових струмів, теплове навантаження двигуна і ресурс обладнання. Для зниження пускових струмів і забезпечення плавної зміни швидкості потрібен регульований електропривод. З усього вищезазначеного впливає вибір структури системи управління електроприводом - частотний перетворювач - асинхронний електродвигун, що дозволяє реалізувати плавний пуск, регулювання швидкості обертання компресора в широкому діапазоні та енергоефективну роботу установки в цілому.

1.5 Вимоги до електроприводу

Визначено ключові вимоги до сучасного електропривода гвинтового компресора Atlas Copco [2]:

- висока точність регулювання;
- енергоефективність;
- зниження експлуатаційних витрат і забезпечення тривалої безвідмовної роботи

Аналіз механізму проектування дає змогу сформулювати вимоги до його електроприводу.

Приймаючи до уваги, наявність кривошипа і маховика у складі кінематики компресора цей механізм слід характеризувати наступними особливостями:

- пульсуючий характер навантажувального моменту;
- залежність пульсацій від швидкості привода;
- підвищений момент інерції, який затягує пуск;

- підвищений пусковий момент.

З огляду на те, що компресор працює на ресивер, який надає змогу накопичення надлишкового тиску і роботи з підвищеною продуктивністю, у безперервній номінальній роботі компресора немає сенсу. Тобто ця електромеханічна система повинна працювати у режимі змінної продуктивності, і як наслідок електропривод має бути регульованим.

До складу кінематики компресорної установки входять зубцеві та балануючі елементи. Це спонукає до побудови системи керування із спеціальними вимогами до забезпечення її динаміки. Тобто, має сенс у отриманні експоненціальних форм перехідних процесів, що накладає обмеження на швидкодію системи керування приводом. При цьому продуктивність і енергетичні якості електропривода можуть бути забезпечені дотриманням необхідної якості перехідних процесів, які реалізуються при налаштуванні системи автоматичного регулювання за модульним оптимумом. Наявність великого пускового і середнього сталого моменту, що прикладається до валу двигуна, передбачає введення у конструкцію електроприводу механічного передатного механізму, призначення якого – узгодження силових і швидкісних невідповідностей двигуна та робочої машини. Робота механізму проектування не вимагає реверсування робочого органу, оскільки в цьому немає потреби. Виробничі умови, в яких ймовірно буде експлуатуватись дане обладнання повинно мати можливість захисту від шкідливого впливу виробничого навколишнього середовища. Для цього слід передбачити винос апаратури управління у окремі приміщення, де надаються нормальні і безпечні умови їх експлуатації. Обладнання, що проектується не вимагає приводу великої потужності. Тому потужність мережі особливого значення не має.

Переваги компресорів

Середнє енергозбереження становить 50% у широкому діапазоні продуктивності (20-100%). Вбудований графічний контролер Elektronikon® управляє швидкістю обертання електродвигуна та високоефективним частотним перетворювачем. Під час експлуатації відсутні період холостого ходу та

втрати при продуванні. Особливості електродвигуна VSD+ дозволяють здійснювати запуск та зупинку компресора при повному тиску в системі без необхідності розвантаження. Виключаються кидки струму під час запуску. Найменша кількість деталей – вища надійність.

1.6 Мета та призначення розробки

Головна мета роботи: це розробка електропривода компресора з застосуванням системи автоматичного керування з векторним принципом регулювання бездатчикових алгоритмів. Це забезпечить зростання енергоефективності та покращення експлуатаційних характеристик.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування і вибір системи електроприводу

Вибираємо електродвигун (рис.2.1), компанії АВВ, марка двигуна M2CA 315 MB, в сталевому корпусі, має стандарти захисту IP55, IC 411; клас ізоляції F, клас нагрівостійкості В. M2CA 315 MB: Серія двигуна (M2CA – асинхронний двигун), типорозмір (315), «В» – блоковий (зменшення габаритів для монтажу на фланці або лапах), «М» – може вказувати на монтажний фланець (якщо це M2BA315SMB4), або «В» означає, що двигун має корпус з чавуну.



Рис. 2.1. Загальний вигляд асинхронного двигуна

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Технічна характеристика трифазного електродвигуна з короткозамкненим ротором (рис.2.2): $P_n = 160 \text{ кВт}$ – номінальна потужність

двигуна; $U_{1н} = 380 В$ – номінальна лінійна напруга; $n_o = 1500 об/хв$ – синхронна частота обертання; $s_n = 0,93 \%$ – номінальне ковзання двигуна; $\eta_n = 0,955$ – ККД у режимі номінальної потужності (100 %-е навантаження); синхронна кутова частота обертання двигуна: $\omega_o = \pi \cdot n_o = 157,08 \text{ рад/с}$, $\cos \varphi_n$ – коефіцієнт потужності = 0,86.

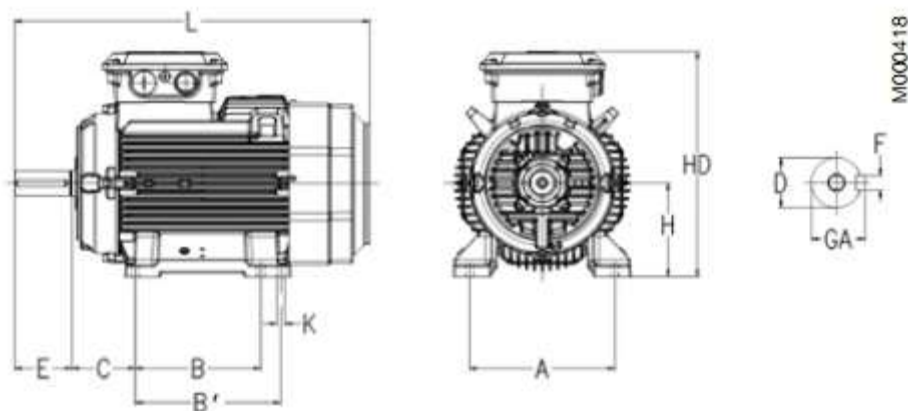
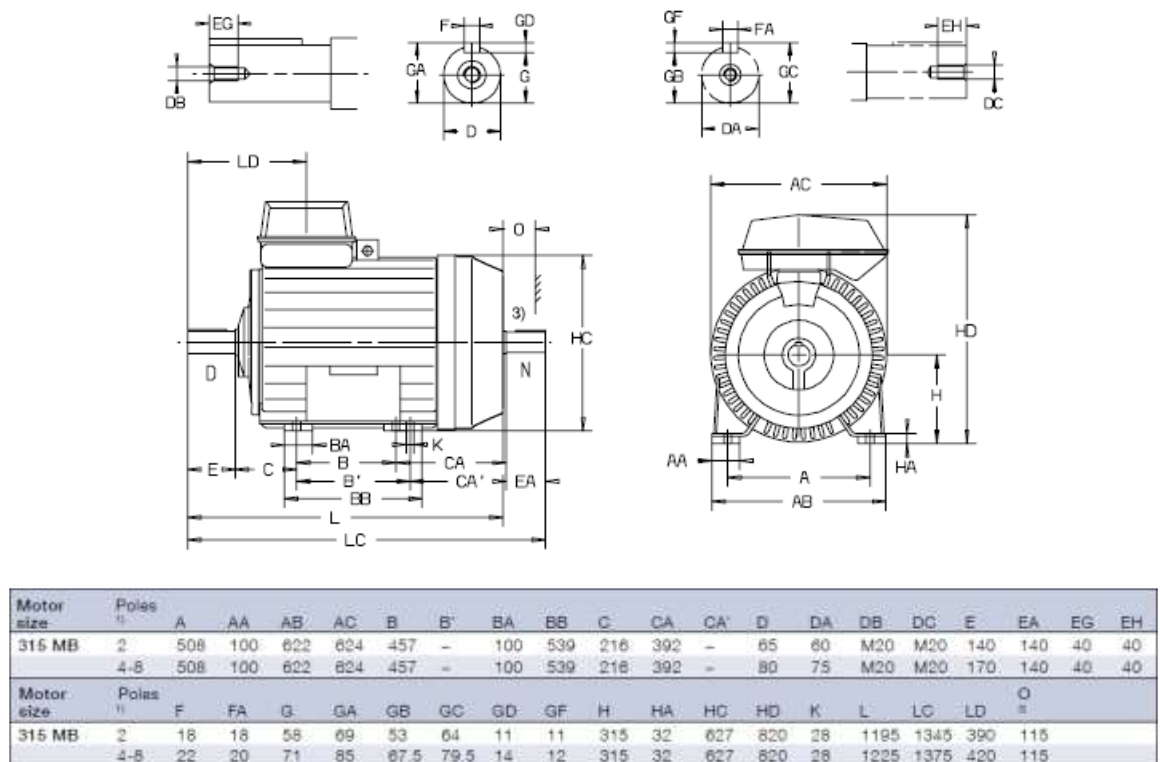


Рис. 2.2. Габаритні креслення електродвигуна M2CA 315 MB

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Одним із ключових рішень для підвищення енергоефективності асинхронного електропривода є впровадження частотного регулювання. Окрім зменшення споживання електроенергії, використання перетворювача частоти забезпечує кращу якість перехідних процесів та знижує динамічні навантаження, що сприяє збільшенню строку експлуатації компресорного обладнання. Наразі більшість компресорних установок у світі оснащено нерегульованими електроприводами. Це пояснюється тим, що лише незначна частина споживчих систем потребує стабільного тиску для коректної роботи. Водночас існують випадки, коли впровадження регульованого привода не лише дозволяє зменшити енергоспоживання, а й покращує якість кінцевої продукції.

Визначимо кратність пускового струму:

$$k_i = \frac{I_n}{I_n} = 7,2 \text{ о.е.} \quad (2.1)$$

Визначимо кратність пускового моменту:

$$k_n = \frac{M_n}{M_n} = 2,4 \text{ о.е.} \quad (2.2)$$

Визначимо кратність максимального моменту:

$$k_{\max} = \frac{M_k}{M_n} = 2,9 \text{ о.е.} \quad (2.3)$$

Динамічний момент інерції складає $J_{\text{дв.}} = 2,9 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Число полюсів – 4.

2.2 Розрахунок характеристик двигуна

Розрахуємо синхронну кутову частоту обертання двигуна:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = 157,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.4)$$

Розрахуємо номінальну частоту обертання двигуна:

$$n_{\text{дв.ном}} = (1 - s_H) \cdot n_0 = (1 - 0,0093) \cdot 1500 = 1486 \cdot \text{об/хв.} \quad (2.5)$$

або

$$\omega_{\text{дв.ном}} = (1 - s_H) \cdot \omega_0 = (1 - 0,0093) \cdot 157,08 = 155,61 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.6)$$

Розрахуємо номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{дв.ном}} = \frac{P_{\text{дв.ном}}}{\omega_{\text{дв.ном}}} = \frac{160000}{155,61} = 1028,21 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.7)$$

Розрахуємо номінальну фазну напругу і лінійний струм статора (при з'єднанні "зіркою"):

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}; \quad (2.8)$$

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.ном}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}} = \frac{160000}{3 \cdot 220 \cdot 0,86 \cdot 0,955} = 295,17 \text{ А}.$$

Розрахуємо максимальний струм двигуна при прямому пуску:

$$I_{1\text{max}} = k_{\text{идв}} \cdot I_{1\text{лн}} = 7,2 \cdot 295,17 = 2125,22 \text{ А}. \quad (2.9)$$

Розрахуємо критичесний момент двигуна на природній характеристиці:

$$M_K = m_K \cdot M_{\text{дв.ном}} = 2,9 \cdot 1028,21 = 2981,8 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.10)$$

Розрахуємо пусковий момент двигуна при прямому пуску:

$$M_{\text{дв.пуск}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{дв.ном}} = 2,4 \cdot 1028,21 = 2467,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.11)$$

Розрахуємо струм холостого ходу асинхронного двигуна:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_* \cdot I_{1H} \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}{1 - (p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}} = 71,49 \text{ A}, \quad (2.12)$$

де I_{11} - струм статора двигуна при частковому навантаженні;

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = 225,89 \text{ A} \quad (2.13)$$

ККД при частковому завантаженні:

$$\eta_{p_*} = \eta_H$$

Коефіцієнт потужності при частковому завантаженні дорівнює:

$$\cos \varphi_{p_*} = 0,98 \cdot \cos \varphi_H$$

Коефіцієнт завантаження двигуна дорівнює:

$$p_* = P / P_H = 0,75$$

З формули Клосса визначимо співвідношення для розрахунку критичного ковзання. У першому наближенні приймаємо $\beta=1$ (коефіцієнт, що характеризує співвідношення активних опорів статора і ротора):

$$s_k = s_H \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} = 0,054. \quad (2.14)$$

Розрахуємо проміжні коефіцієнти:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{71,49}{2 \cdot 7,2 \cdot 295,17} = 1,017; \quad (2.15)$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = 0,152. \quad (2.16)$$

Розрахуємо активний опір ротора, приведений до обмотки статора:

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K}\right) \cdot C_1} = 0,0077 \text{ Ом.} \quad (2.17)$$

Розрахуємо активний опір статорної обмотки:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 0,0078 \text{ Ом.} \quad (2.18)$$

Розрахуємо параметр γ , який дозволяє знайти індуктивний опір короткого замикання:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = 18,4. \quad (2.19)$$

Розрахуємо опір короткого замикання:

$$X_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 0,144 \text{ Ом.} \quad (2.20)$$

Розрахуємо індуктивний опір розсіювання роторної обмотки, приведений до статорної:

$$X_{2H}' = \frac{0,58 \cdot X_{KH}}{C_1} = 0,082 \text{ Ом.} \quad (2.21)$$

Розрахуємо індуктивний опір розсіювання статорної обмотки:

$$X_{1H} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,061 \text{ Ом.} \quad (2.22)$$

Розрахуємо ЕРС гілки намагнічування, що наведена потоком повітряного зазору в обмотці статора в номінальному режимі:

$$E_m = \sqrt{\left(U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_H - R_1 \cdot I_{1H}\right)^2 + \left(U_{1\phi} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} - X_{1H} \cdot I_{1H}\right)^2} = 209,35 \text{ В.} \quad (2.23)$$

Тоді індуктивний опір намагнічування визначається як:

$$X_{\mu H} = \frac{E_m}{I_0} = 2,928 \text{ Ом.} \quad (2.24)$$

За знайденими значеннями C_1 , R'_2 і $X_{кн}$ розрахуємо критичне ковзання:

$$s_{к1} = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}} = \frac{1,017 \cdot 0,0077}{\sqrt{0,0078^2 + 0,144^2}} = 0,054. \quad (2.25)$$

Розрахуємо індуктивність розсіювання статорної обмотки:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1н}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = 1,94 \cdot 10^{-4}, \text{ Гн.} \quad (2.26)$$

Індуктивність розсіювання роторної обмотки, приведена до статорної:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2н}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = 2,61 \cdot 10^{-4}, \text{ Гн.} \quad (2.27)$$

Розрахуємо індуктивність гілки намагнічування:

$$L_{\mu н} = \frac{X_{\mu н}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = 0,009 \text{ Гн.} \quad (2.28)$$

Розрахуємо номінальне потокозчеплення двигуна:

$$\Psi_{2н} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = 0,9 \text{ Вб.} \quad (2.29)$$

Розрахуємо номінальний електромагнітний момент двигуна:

$$M_{эм.н} = M_{эм.н}(s_n) = \frac{3 \cdot U_{1фн}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_n \cdot \left[(X_{кн})^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_n} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_n \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = 1062 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.30)$$

Розрахуємо момент тертя на валу двигуна:

$$M_{с.дв} = M_{эм.н} - M_{дв.н} = 33,79 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.31)$$

Розрахуємо момент інерції механізму, приведений до валу двигуна:

$$J_m = 0,5 \cdot J_{дв} = 1,45 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.32)$$

Розрахуємо еквівалентний момент інерції приводу:

$$J_{\Sigma} = J_{дв} + J_m = 4,35 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.33)$$

2.2.1 Побудова області роботи електропривода

Область роботи електроприводу задана в першому квадранті площини координат:

- область тривалої роботи обмежена максимальною швидкістю електроприводу $\omega_{\text{еп.макс}}$, рад/с і інтервалом зміни моменту корисного навантаження в тривалому режимі $M_{\text{с.макс}} \div M_{\text{с.мін}}$, Нм;
- область короткочасної роботи обмежена максимальною швидкістю електроприводу $\omega_{\text{еп.макс}}$, рад/с і значенням максимального моменту електроприводу в пуско-гальмівних режимах $M_{\text{еп.макс}}$, Нм

Розрахуємо максимальну швидкість електроприводу:

$$\omega_{\text{еп.макс.}} = 0,95 \cdot \omega_{\text{дв.ном.}} = 147,82 \frac{\text{рад}}{\text{сек}} \quad (2.34)$$

Розрахуємо максимальний момент навантаження електроприводу:

$$M_{\text{с.макс}} = 1000 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.35)$$

Розрахуємо мінімальний момент навантаження електроприводу:

$$M_{\text{с.мін}} = 0,1 \cdot M_{\text{с.макс}} = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.36)$$

Розрахуємо максимальний момент електроприводу:

$$M_{\text{еп.макс}} = 2 \cdot M_{\text{с.макс}} = 2000 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.37)$$

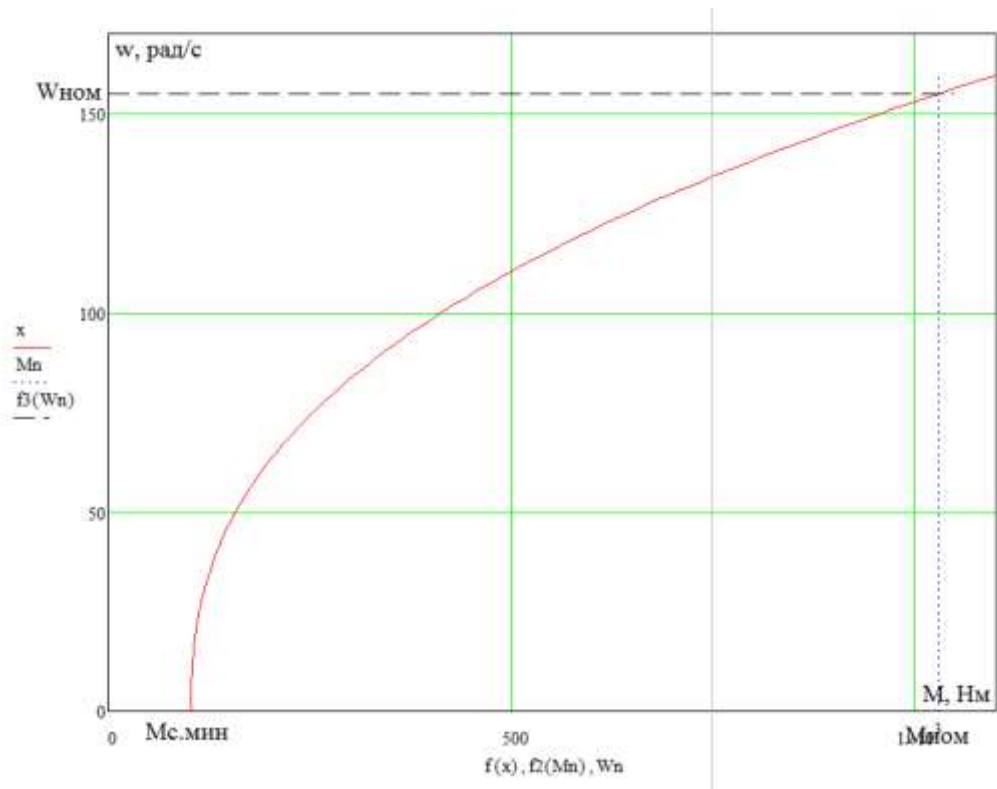


Рис. 2.3. Область работы электроприводу

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

2.2.2 Розрахунок природної механічної характеристики

Розрахуємо механічну характеристику $M(s)$ асинхронного двигуна розраховується для частоти $f_{1H} = 50$ Гц за формулою:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(X_{KH})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]}. \quad (2.38)$$

За результатами проведеного розрахунку будується механічна характеристика $\omega(M)$, де $\omega = \omega_0 \cdot (1-s)$.

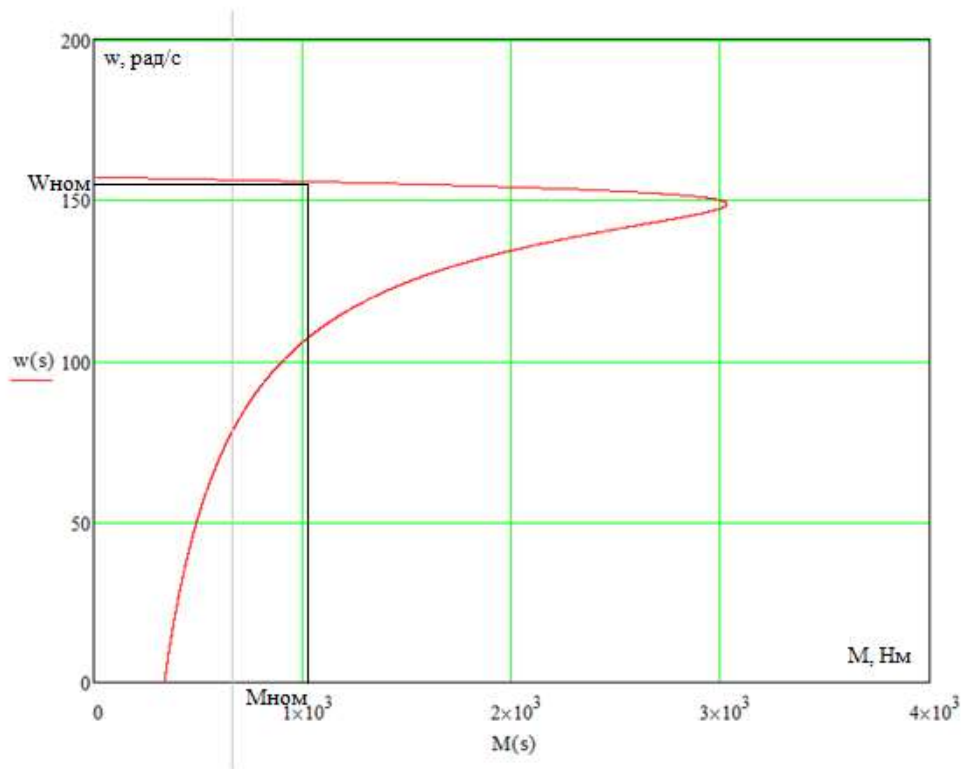


Рис. 2.4. Механічна характеристика $\omega(M)$

Примітка. Джерело: Розроблено автором

2.2.3 Розрахунок природної електромеханічної характеристики

Електромеханічна характеристика $I_1(s)$ асинхронного двигуна розраховується для значення частоти $f_{1H}=50$ Гц за формулою:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)}, \quad (2.39)$$

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{(X_{KH})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2}}, \quad \sin \varphi_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{(X_{KH})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2}} \quad (2.40)$$

За результатами розрахунку будемо електромеханічну характеристику $\omega(I_1)$:

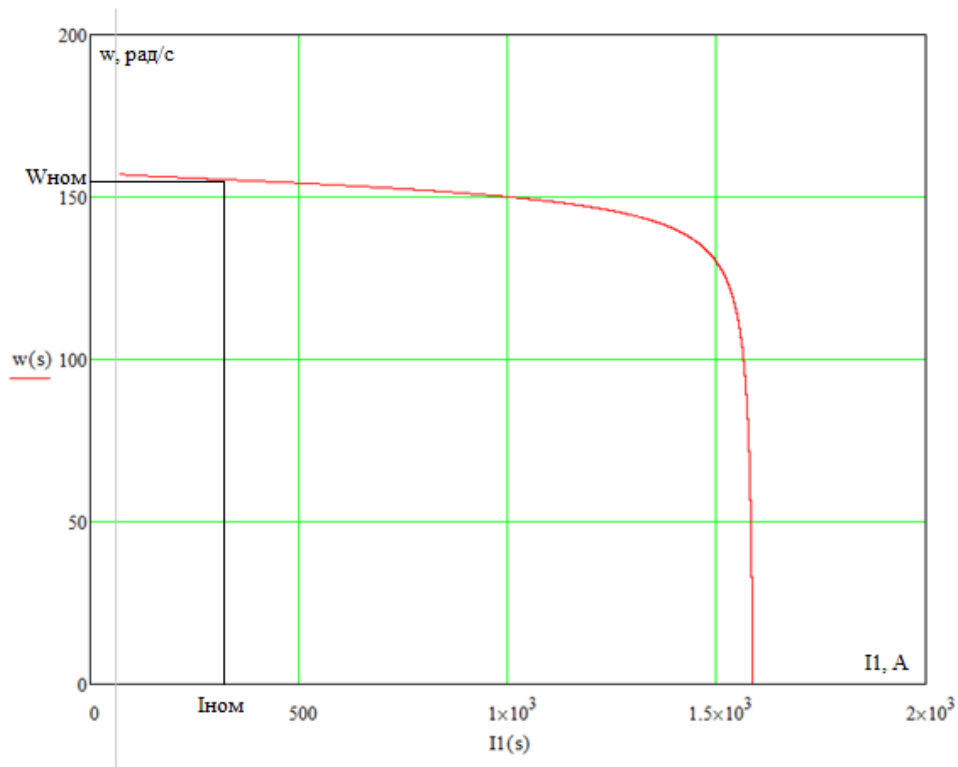


Рис. 2.5. Електромеханічна характеристика $\omega(I_1)$

Примітка. Джерело: Розроблено автором

2.2.4 Вибір перетворювача

Вибір перетворювача частоти проводимо за наступними даними:

1. Параметри мережі живлення: 3-фазна мережа 380/220 В, 50 Гц.

2. Вихідні параметри перетворювача частоти:

- 3 фази;
- максимальна вихідна (лінійна) напруга 380 В;
- максимальна вихідна частота перетворювача

$$f_{\text{п.макс}} > 50 \cdot \frac{\omega_{\text{еп.макс}}}{\omega_0 \cdot (1 - s_K)}, \text{ Гц}; \quad (2.41)$$

$$f_{\text{п.макс}} > 49,75 \text{ Гц};$$

Розрахуємо мінімальну вихідну частоту перетворювача за формулою:

$$f_{п.мін} < 50 \cdot \frac{\omega_{еп.мін.}}{\omega_0}, \text{ Гц}$$

$$f_{п.мін} < 9,91 \text{ Гц}$$

$$\omega_{еп.мін} = 0,2 \cdot \omega_{дв.ном.} \text{ Гц}$$
(2.42)

Маємо на увазі, що перетворювач обирається за номінальним (тривало допустимим) струмом $I_{ін}$ і максимальним (короткочасно допустимим) струмом $I_{і.макс}$ за такими умовами:

$$I_{ін} \geq I_{1лн} \cdot \frac{M_{с.макс.}}{M_{дв.ном.}}, \text{ А}$$

$$I_{ін} \geq 287,13 \text{ А;}$$

$$I_{і.макс.} \geq I_{1лн} \cdot \frac{M_{еп.макс.}}{M_{дв.ном.}}, \text{ А}$$

$$I_{ін} \geq 574,26 \text{ А;}$$
(2.43)

Таблиця 2.1

Данні перетворювача частоти

Тип	Параметри живильної мережі		Вихідна напруга $U_i, \text{ В}$	Вихідна частота $f_i, \text{ Гц}$	Вихідний струм		Рекомендова на потужність двигуна $P_2, \text{ кВт}$
	$U_{(1) (в)}, \text{ В}$	$f_c, \text{ Гц}$			$I_{ін}, \text{ А}$	$I_{і.макс.}, \text{ А}$	
Danfoss VLT 5302 FLUX [1]	380÷500	50	380	1÷300	395	593	200

Вибір частоти інвертора

Виконуємо вибір частоти інвертора $f_{шм}$ відповідно до характеристик фірми виробника з урахуванням фактичного струму завантаження або можна скористатися наведеними на рис. 2.6. залежностями частоти для перетворювачів малої та середньої потужності фірми Siemens.

Беремо до уваги, що максимальне значення несучої частоти залежить від номінальної вихідної потужності перетворювача і фактичного струму завантаження інвертора за максимального навантаження приводу.

Приймаємо несучу частоту інвертора $f_{\text{ШИМ}} = 6 \text{ кГц}$.

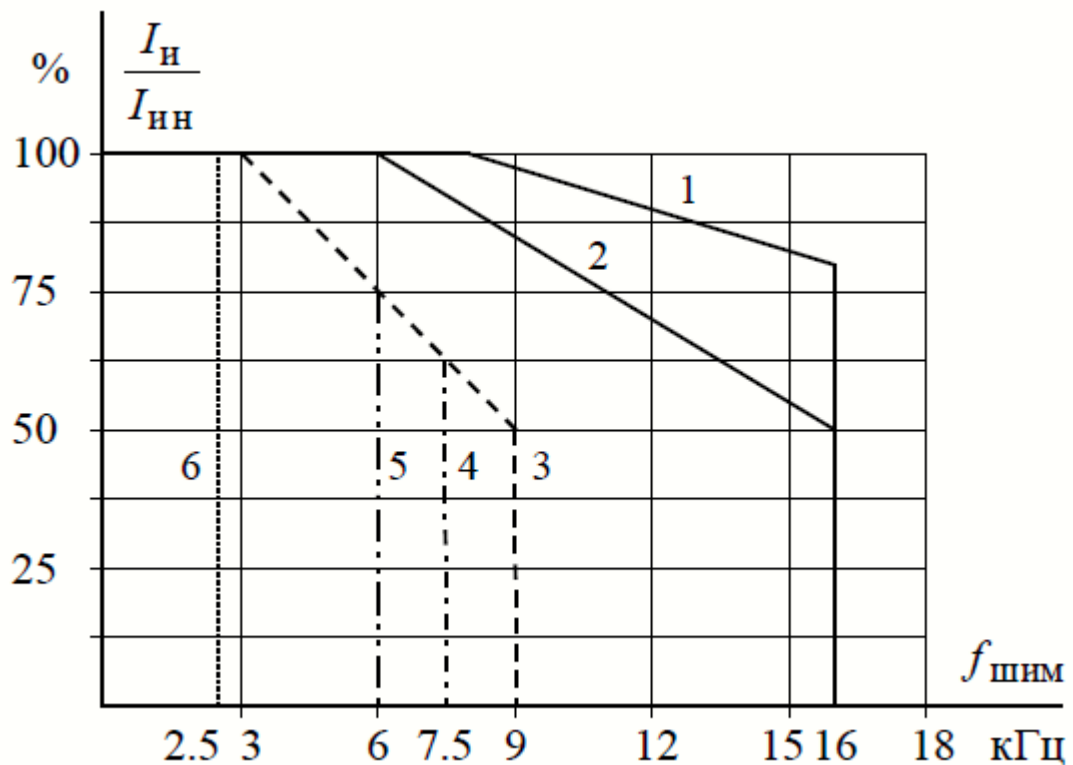


Рис. 2.6. Залежності максимального значення несучої частоти інвертора від номінальної вихідної потужності та завантаження перетворювача:
 1 - до 3 кВт; 2 - до 55 кВт; 3 - до 90 кВт; 4 - до 132 кВт; 5 - до 250 кВт; 6 - до 900 кВт

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [5]

Визначаємо несучу частоту інвертора $f_{\text{ШИМ}} = 6 \text{ кГц}$.

2.2.5 Розрахунок граничних статичних характеристик

У площині механічних характеристик $\omega(M)$ (рис.2.7) будуємо граничні характеристики для тривалого і короткочасного режимів роботи:

$$\begin{aligned}
 M_{\text{с.мін}}(\omega) &= 100 \text{ Нм (т. 1 – 2 – 3);} \\
 M_{\text{с.мак.}}(\omega) &= 1000 \text{ Нм (т. 4 – 5 – 6);} \\
 M_{\text{еп.мак.}}(\omega) &= 2000 \text{ Нм (т. 13 – 14 – 15);}
 \end{aligned}
 \tag{2.44}$$

Далі визначимо залежність тривало-допустимого моменту електродвигуна

$M_{\text{дв.трив.доп.}}(\omega)$ (м.8-9-10-11) для частоти $f_i = f_{1H} = 50$ Гц:

$$M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}} \cdot \left(0,5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right) \text{ при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}; \quad (2.45)$$

$$M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}} \text{ при } 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} < \omega \leq \omega_{\text{дв.н}}. \quad (2.46)$$

Результати розрахунків наведені в табл.2.2.

Таблиця 2.2

Залежність тривало-допустимого моменту електродвигуна $M_{\text{дв.трив.доп.}}(\omega)$

$\omega, \text{ рад/с}$	0	$\omega_{\text{ЕП.хв.}}$	$0,5\omega(\text{дв}) (.) (H)$	$\omega_{\text{ЕП.макс}}$	$\omega_{\text{дв.н}}$
$M_{\text{дв.доп.}}$ Hm	514,1	719,74	1028,21	1028,21	1028,21

Далі визначимо залежність максимально-допустимого моменту електродвигуна $M_{\text{дв.макс.}}(\omega)$ (м.8-9-10-11) для частоти $f_i = f_{1H} = 50$ Гц:

$$M_{\text{дв.макс}}(\omega) = M_K = 3024 Hm, \quad (2.47)$$

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\kappa H}^2) \left[1 + \left(\frac{R'_1}{X_\mu} \right)^2 \right]} \right\}} = 3024 Hm. \quad (2.48)$$

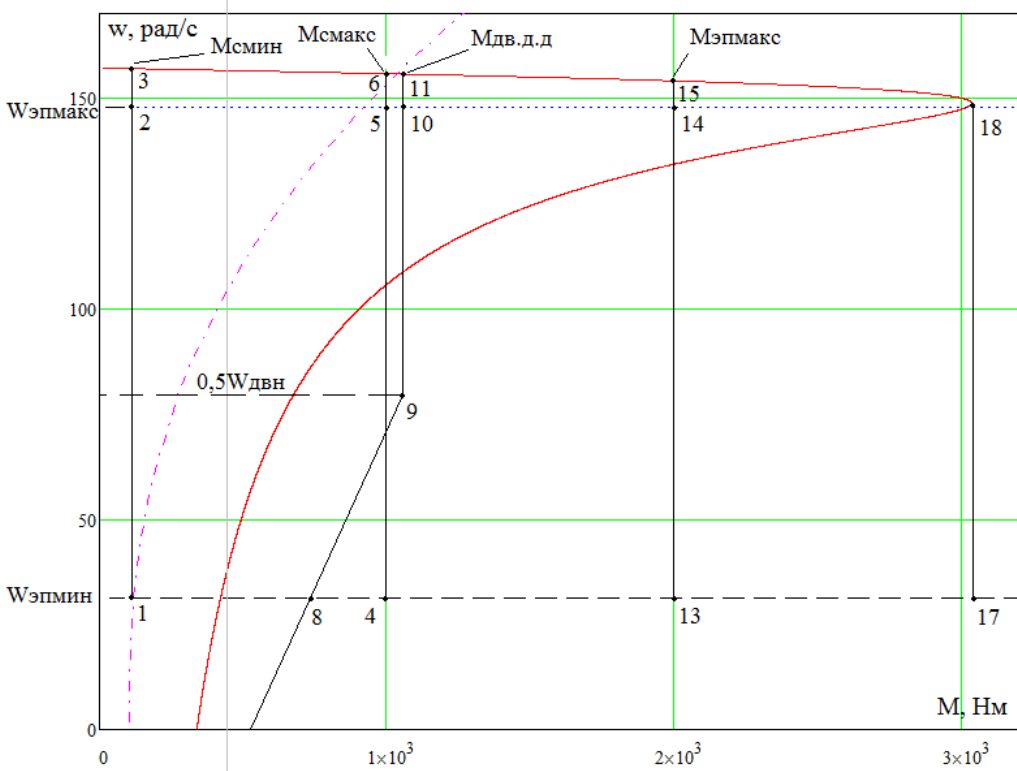


Рис. 2.7. Механічні характеристики електроприводу і навантаження
Примітка. Джерело: Розроблено автором

Проведемо розрахунок та побудуємо у площині електромеханічних характеристик $\omega(I_1)$ (рис.2.8) залежність тривало-допустимого струму електродвигуна $I_{дв.трив.доп.}(\omega)$ (m.8-9-10-11):

$$I_{дв.длит.доп}(\omega) = I_{дв.н} \cdot \left(0,5 + \frac{\omega}{\omega_{дв.н}} \right) \text{ при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{дв.н} ; \tag{2.49}$$

$$I_{дв.длит.доп}(\omega) = I_{дв.н} \text{ при } 0,5 \cdot \omega_{дв.н} < \omega \leq \omega_{дв.н} . \tag{2.50}$$

Отримані результати розрахунку наведені в таблиці 2.3.

Таблица 2.3.

Результати розрахунку

$\omega, рад / с$	0	$\omega_{ЭП.мин}$	$0,5\omega_{дв.н}$	$\omega_{ЭП.макс}$	$\omega_{дв.н}$
$I_{дв.длит.доп}, А$	147,58	206,61	295,17	295,17	295,17

Далі необхідно визначити залежність $I_c(\omega)$ (м.4-5-6), яка відповідає навантаженню $M_c(\omega)$. Для цього на природній характеристиці $M(\omega)$ визначаємо відповідні M_c значення ковзання s , вирішивши відносно s наступне рівняння:

$$\frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(X_{KH})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = M_c. \quad (2.51)$$

Отримали наступні результати розрахунку: $S_{\omega max} = 0,00872$; $S_{0,5\omega max} = 0,0021$; $S_{\omega max} = 0,00837$.

Далі розраховуємо силу струму I_c :

$$I_C = I_1(s_{wmax}) = 264,27 \text{ A.}$$

$$I_C = I_1(s_{0,5wmax}) = 94,92 \text{ A.} \quad (2.52)$$

$$I_C = I_1(s_{min}) = 75,72 \text{ A.}$$

Визначимо залежність $I_{en.max}(\omega)$ (м.13-14-15), для короткодіючого максимального навантаження $M_{en.max}(\omega) = 2000 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Для цього на природній характеристиці $M(\omega)$ визначаємо відповідне $M_{en.max}$ значення ковзання s_{m15} , вирішивши відносно s рівняння:

$$\frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(X_{KH})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = M_{ЭП.макс}. \quad (2.53)$$

Отримали наступні результати розрахунку: $S_{m15} = 0,01962$.

Розрахуємо величину швидкості $\omega_{m15} = \omega_0 \cdot (1 - s_{m15}) = 153,9 \text{ рад/с}$ та силу струму $I_{en.max}$:

$$I_{en.max} = I_1(\omega_{m15}) = 544,39 \text{ A.}$$

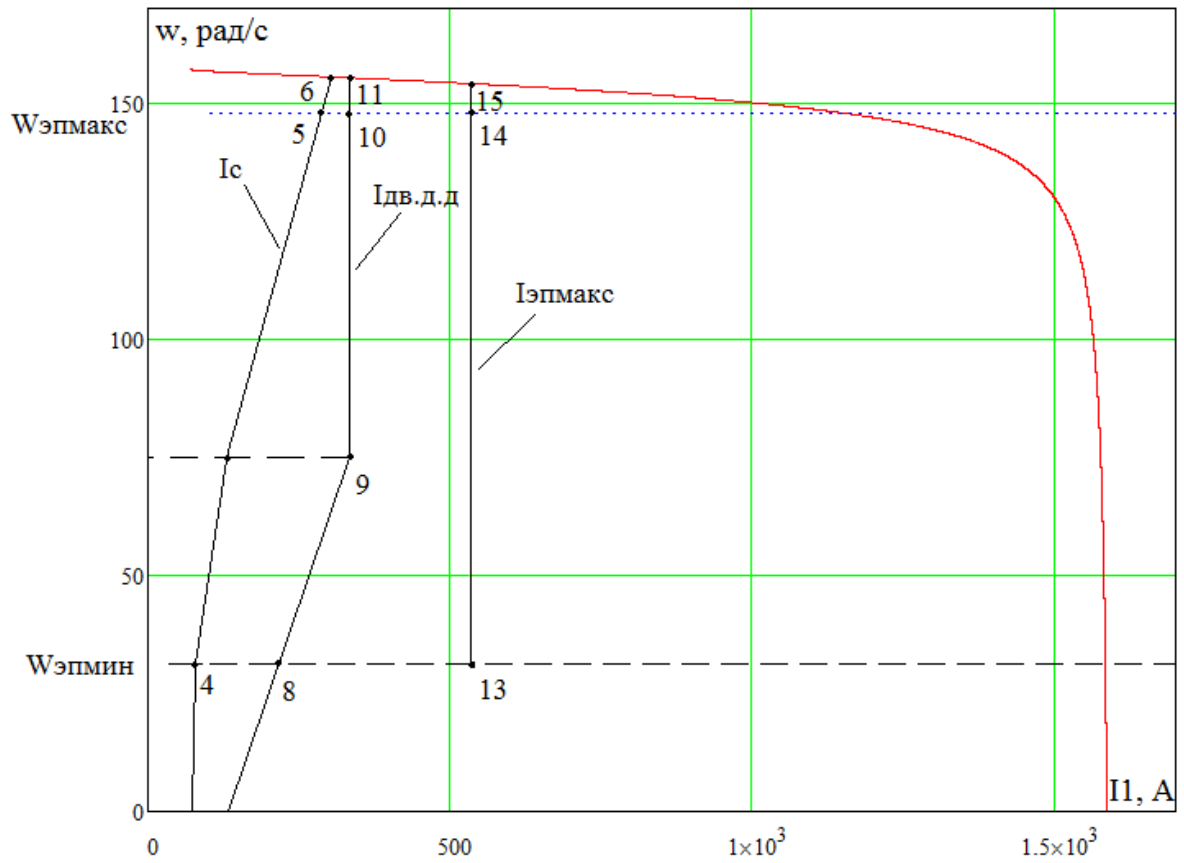


Рис. 2.8. Електромеханічні характеристики електроприводу та навантаження

Примітка. Джерело: Розроблено автором

2.2.6 Перевірка правильності вибору двигуна

За результатами побудови механічних характеристик електроприводу і навантаження перевіряємо правильність вибору двигуна за моментом. У всьому діапазоні регулювання повинні виконуватися умови:

$$\left. \begin{aligned} M_{дв.тр.доп.}(\omega) &\geq M_{с.макс.} \\ M_{дв.макс.}(\omega) &\geq M_{еп.макс.} \end{aligned} \right\} \quad (2.55)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{T.8} &\geq M_{C.МАКС} \\ M_{T.9} &\geq M_{C.МАКС} \\ M_{T.10} &\geq M_{C.МАКС} \\ M_{T.11} &\geq M_{C.МАКС} \\ M_K &\geq M_{ЭП.МАКС} \end{aligned} \right\} \quad (2.56)$$

За результатами побудови електромеханічних характеристик електроприводу і навантаження перевіряється правильність вибору двигуна за струмом. У всьому діапазоні регулювання швидкості повинна виконуватися умова: $I_{ДВ.ТР.ДОП.}(\omega) \geq I_{C.МАКС}$

$$\left. \begin{aligned} I_{T.8} &\geq I_{C.МАКС} \\ I_{T.9} &\geq I_{C.МАКС} \\ I_{T.10} &\geq I_{C.МАКС} \\ I_{T.11} &\geq I_{C.МАКС} \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

2.7 Перевірка правильності вибору перетворювача

За результатами побудови електромеханічних характеристик електроприводу і навантаження перевіряється правильність вибору перетворювача. У всьому діапазоні регулювання повинні виконуватися умови:

$$\left. \begin{aligned} I_{C.МАКС.}(\omega) &\geq I_{IH.} \\ I_{ЭП.МАКС.}(\omega) &\geq I_{i.МАКС.} \end{aligned} \right\} \quad (2.58)$$

Аналізуючи отримані характеристики (рис. 2.7-2.8) визначаємо:

Система перетворювач частоти – асинхронний двигун з векторним управлінням, забезпечує тривалу роботу у інтервалі змінення навантаження від $M_{C.min} = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ до $M_{C.МАКС.} = 1000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ та заданий короткочасний максимальний момент $M_{ЭП.МАКС.} = 2000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ у всьому діапазоні регулювання швидкості від $\omega_{ЭП.МІН.} = 33,1 \text{ рад/с}$ до $\omega_{ЭП.МАКС.} = 147,8 \text{ рад/с}$.

2.3 Математичне моделювання асинхронного електродвигуна

2.3.1 Моделювання прямого пуску електродвигуна в нерухомій системі координат

При побудові векторних систем управління асинхронними електроприводами використовується, в основному, математичний опис АД щодо векторів струму статора і потокозчеплення ротора. Для аналізу динаміки доцільніше замінити нерухомою (стаціонарною), яка найбільш адекватно відповідає процесам у реальному двигуні. Математичний опис АД у нерухомій системі координат α – β [1]:

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha}(t)}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot [U_{s\alpha}(t) - R_e \cdot i_{s\alpha}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\alpha}(t) + K_r \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\beta}(t)] \\ \frac{di_{s\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot [U_{s\beta}(t) - R_e \cdot i_{s\beta}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\beta}(t) - K_r \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\alpha}(t)] \\ \frac{d\psi_{r\alpha}(t)}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot i_{s\alpha}(t) - A_r \cdot \psi_{r\alpha}(t) - z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\beta}(t) \\ \frac{d\psi_{r\beta}(t)}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot i_{s\beta}(t) - A_r \cdot \psi_{r\beta}(t) + z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\alpha}(t) \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot \{K_m \cdot [\psi_{r\alpha}(t) \cdot i_{s\beta}(t) - \psi_{r\beta}(t) \cdot i_{s\alpha}(t)] - M_c\} \end{cases} \quad (2.59)$$

де $i_{s\alpha}(t)$, $i_{s\beta}(t)$, $U_{s\alpha}(t)$, $U_{s\beta}(t)$, – компоненти просторових векторів струму і напруги статора;

$\psi_{r\alpha}(t)$, $\psi_{r\beta}(t)$ – компоненти просторового вектора потокозчеплення ротора;

коефіцієнти, що враховують параметри АД:

$$R_e = R_s + R_r \cdot K_r^2, \quad L_e = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}, \quad K_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad A_r = \frac{R_r}{L_r}, \quad K_m = 1,5 \cdot K_r \cdot z_p$$

повні індуктивності обмоток статора і ротора:

$$L_s = L_{s\sigma} + L_m, \quad L_r = L_{r\sigma} + L_m$$

$L_{s\sigma}$, $L_{r\sigma}$ – індуктивності розсіювання обмоток статора і ротора

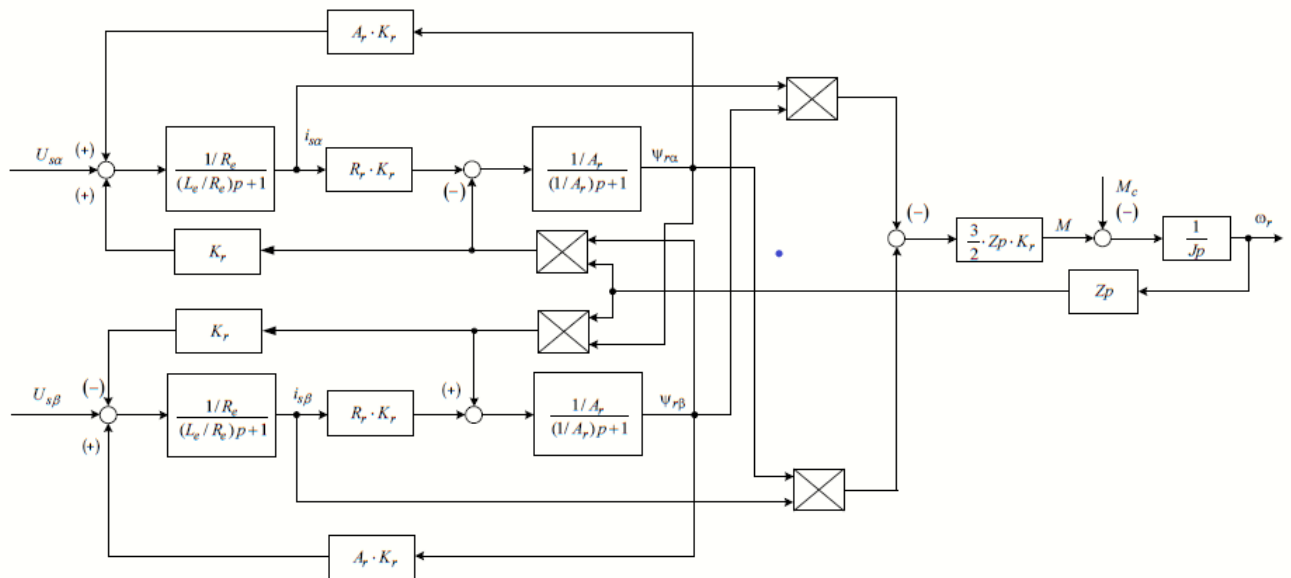


Рис. 2.9. Структурна схема асинхронного двигуна у нерухомій системі координат α - β

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

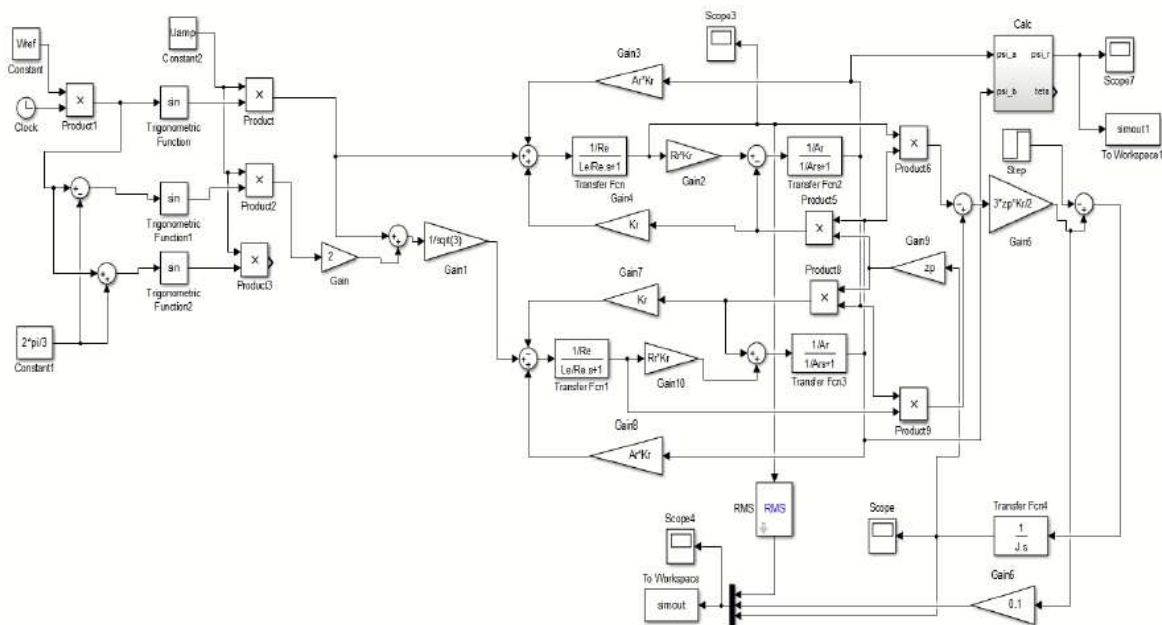


Рис. 2.10. Імітаційна модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат у програмному середовищі MATLAB Simulink

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Проведемо розрахунок повної індуктивності ланцюга статора:

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_{\mu} = 1,94 \cdot 10^{-4} + 0,009 = 0,009194 \text{ Гн.} \quad (2.60)$$

Проведемо розрахунок повної індуктивності ланцюга ротора:

$$L'_2 = L'_{\sigma 2} + L_{\mu} = 2,61 \cdot 10^{-4} + 0,009 = 0,009261 \text{ Гн.} \quad (2.61)$$

Далі проведемо розрахунок коефіцієнтів структурної схеми:

$$K_r = \frac{L_{\mu}}{L'_2} = \frac{0,009}{0,009261} = 0,971; \quad (2.62)$$

$$L_e = L_1 - \frac{L_{\mu}^2}{L'_2} = 0,009194 - \frac{0,009^2}{0,009261} = 0,00044 \text{ Гн;} \quad (2.63)$$

$$R_e = R_1 + R'_2 \cdot K_r^2 = 0,0078 + 0,0077 \cdot 0,971^2 = 0,015 \text{ Ом;} \quad (2.64)$$

$$A_r = \frac{R'_2}{L'_2} = \frac{0,0077}{0,009261} = 0,831. \quad (2.65)$$

На рис.2.11 представлені перехідні процеси в АД при прямому пуску вхолосту і навантаженні номінального навантаження.

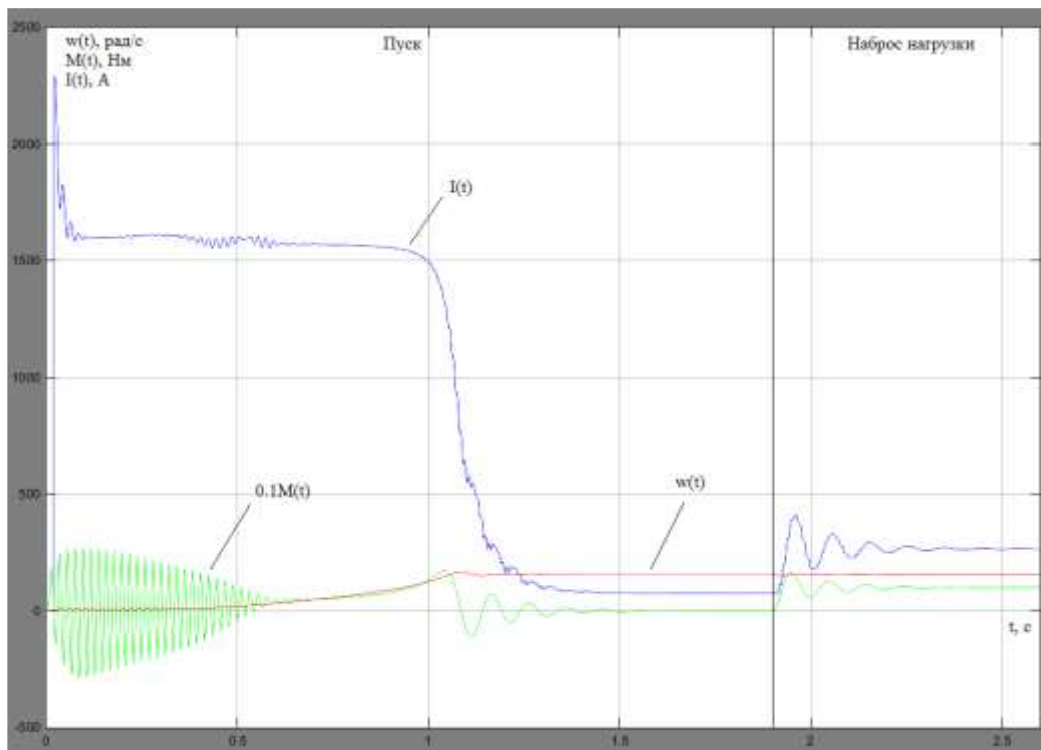


Рис. 2.11. Перехідні процеси в АД при прямому пуску вхолосту і подальшому навантаженні номінального навантаження

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

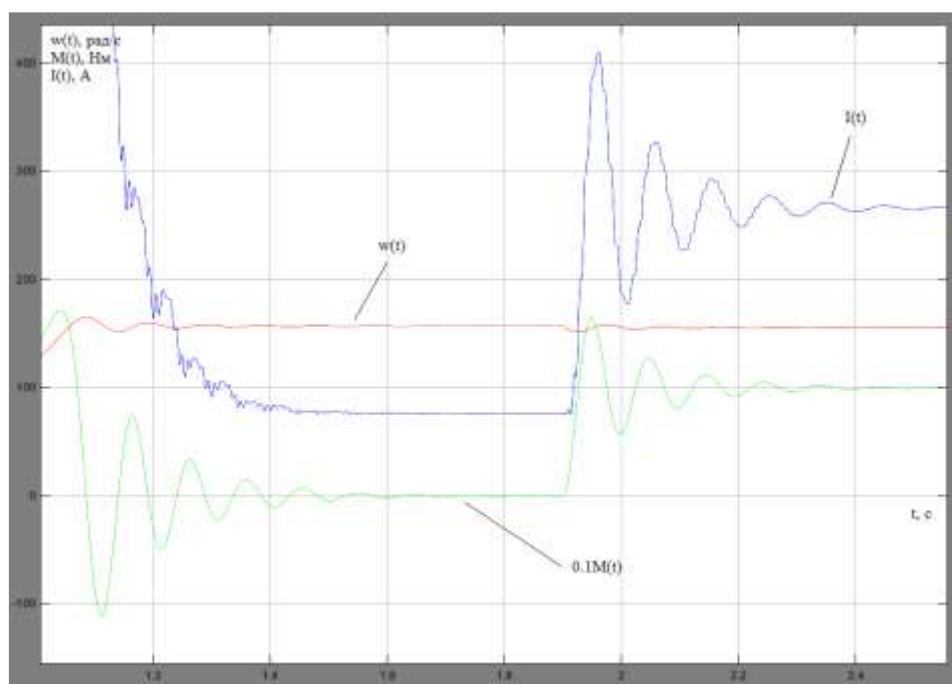


Рис. 2.12. Встановлені значення струму і швидкості в АД при прямому пуску вхолосту і навантаженні номінального навантаження

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Розрахуємо отримані значення струму холостого ходу, номінального струму і ковзання АД:

$$s_H = 1 - \frac{\omega_{\text{дв.ном}}}{\omega_0} = 1 - \frac{155,66}{157,08} = 0,009 = 0,9\%, \quad (2.66)$$

$$I_0 = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{108}{\sqrt{2}} = 76,24 \text{ А}, \quad (2.67)$$

$$I_1 = \frac{I_1}{\sqrt{2}} = \frac{380}{\sqrt{2}} = 268,7 \text{ А}. \quad (2.68)$$

Як бачимо з наведених графіків і результатів розрахунків можна визначити, що імітаційна модель адекватна. Числові значення координат електроприводу в усталеному режимі практично відповідають теоретично розрахованим значенням.

2.3.2 Моделювання прямого пуску електродвигуна в обертовій системі координат

Необхідно створити модель двигуна в обертовій системі координат для побудови векторної системи управління. Далі зробимо математичний опис АД в обертовій системі координат x – y :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dI_{sx}}{dt} &= \frac{1}{L_e} \cdot \left[U_{sx} - R_e \cdot I_{sx} + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{rx} + K_r \cdot z_p \cdot \omega_r \cdot \psi_{ry} \right] + \omega_k \cdot I_{sy} \\ \frac{dI_{sy}}{dt} &= \frac{1}{L_e} \cdot \left[U_{sy} - R_e \cdot I_{sy} + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{ry} - K_r \cdot z_p \cdot \omega_r \cdot \psi_{rx} \right] - \omega_k \cdot I_{sx} \\ \frac{d\psi_{rx}}{dt} &= R_r \cdot K_r \cdot I_{sx} - A_r \cdot \psi_{rx} + \omega_k \cdot \psi_{ry} - z_p \cdot \omega_r \cdot \psi_{ry} \\ \frac{d\psi_{ry}}{dt} &= R_r \cdot K_r \cdot I_{sy} - A_r \cdot \psi_{ry} - \omega_k \cdot \psi_{rx} + z_p \cdot \omega_r \cdot \psi_{rx} \\ M &= \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot K_r \cdot \left[\psi_{rx} \cdot I_{sy} - \psi_{ry} \cdot I_{sx} \right] \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot \left[M - M_{нагр} \right] \end{aligned} \right.$$

де $I_{sx}, I_{sy}, U_{sx}, U_{sy}$ – компоненти просторових векторів струму і напруги статора;

ψ_{rx}, ψ_{ry} – компоненти просторового вектора потоку зв'язку ротора;

повні індуктивності обмоток статора і ротора:

$$R_e = R_s + R_r \cdot K_r^2, \quad L_e = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}, \quad K_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad A_r = \frac{R_r}{L_r},$$

$$L_s = L_{s\sigma} + L_m, \quad L_r = L_{r\sigma} + L_m$$

$L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – індуктивності розсіювання обмоток статора і ротора.

Структурна схема двигуна, що відповідає наведеним рівнянням у системі координат x – y , представлена на рисунку 2.13. Імітаційна модель асинхронного двигуна в програмному середовищі MATLAB Simulink наведена на рисунку 2.14 [1].

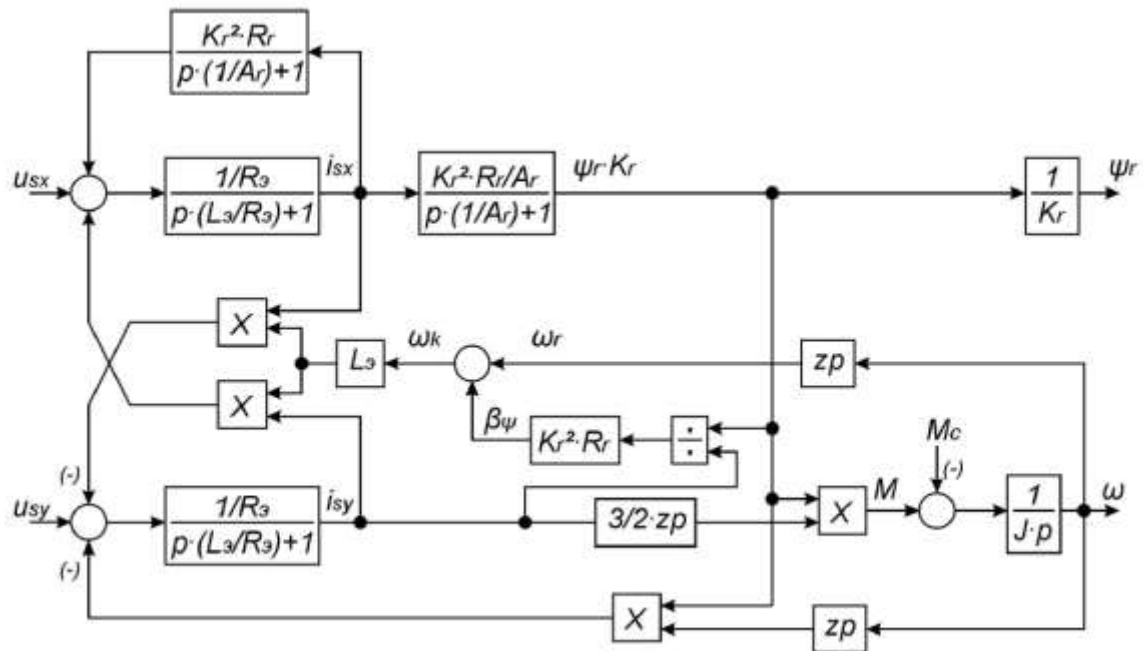


Рис. 2.13. Структурна схема асинхронного двигуна в обертівій системі координат х–у

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

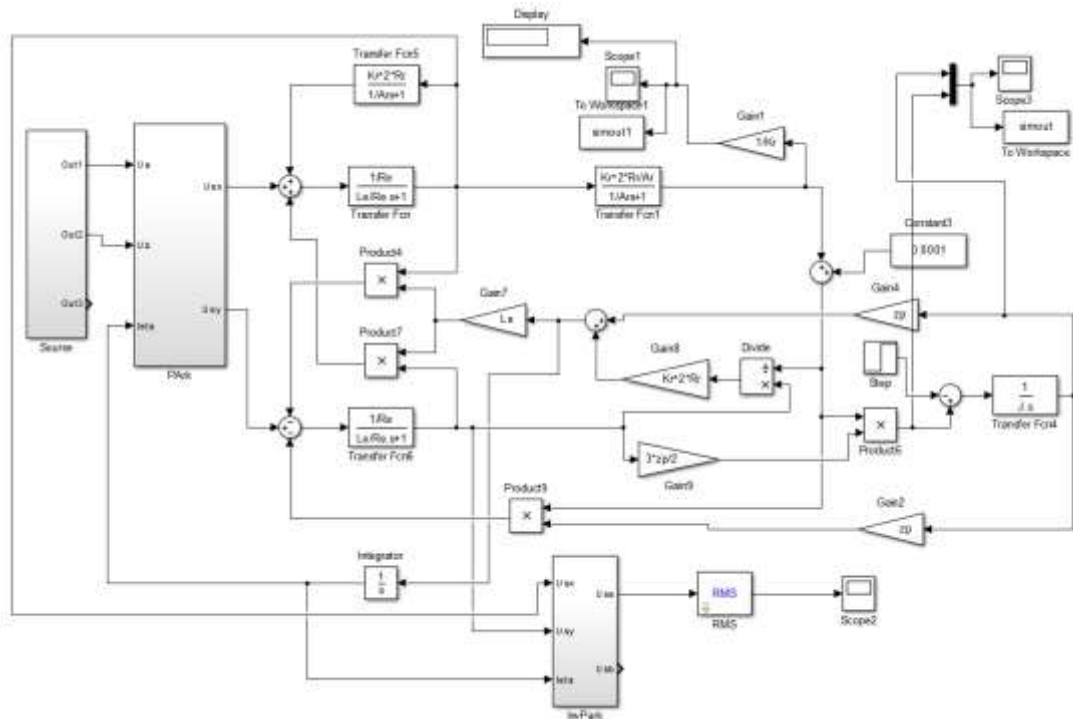


Рис. 2.14. Імітаційна модель асинхронного двигуна в обертовій системі координат у програмному середовищі MATLAB Simulink

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Перехідні процеси в АД при прямому пуску вхолосту і навантаженні номінального навантаження представлені на рисунку 2.15.

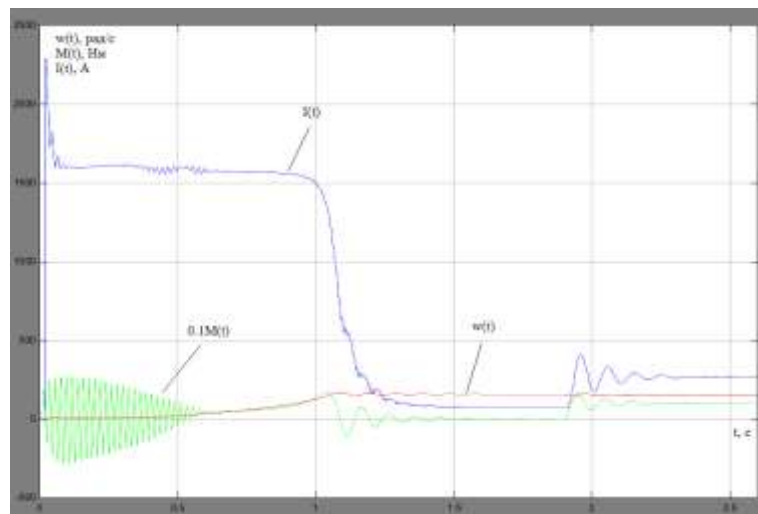


Рис. 2.15. Перехідні процеси в АД при прямому пуску вхолосту і навантаженні номінального навантаження

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Зведемо значення параметрів АД при моделюванні в обертовій і нерухомій системах координат в таблицю 2.4

Таблиця 2.4

Порівняння параметрів АД при проектуванні в різних системах координат

I_0 , А	I_1 , А	S_H , %
Нерухома система		
76,24	268,7	0,9
Обертова система		
76,23	265,6	0,91

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Порівнюючи моделі двигунів у нерухомій і обертовій системах координат, можна зробити висновок, що вони практично ідентичні. Отже, у подальшій розробці системи управління доречно використовувати модель двигуна в обертовій системі координат.

2.3.4. Розробка системи векторного керування асинхронним електроприводом

На рисунку 2.16 представлена структурна схема САУ асинхронного електроприводу з векторним керуванням [1].

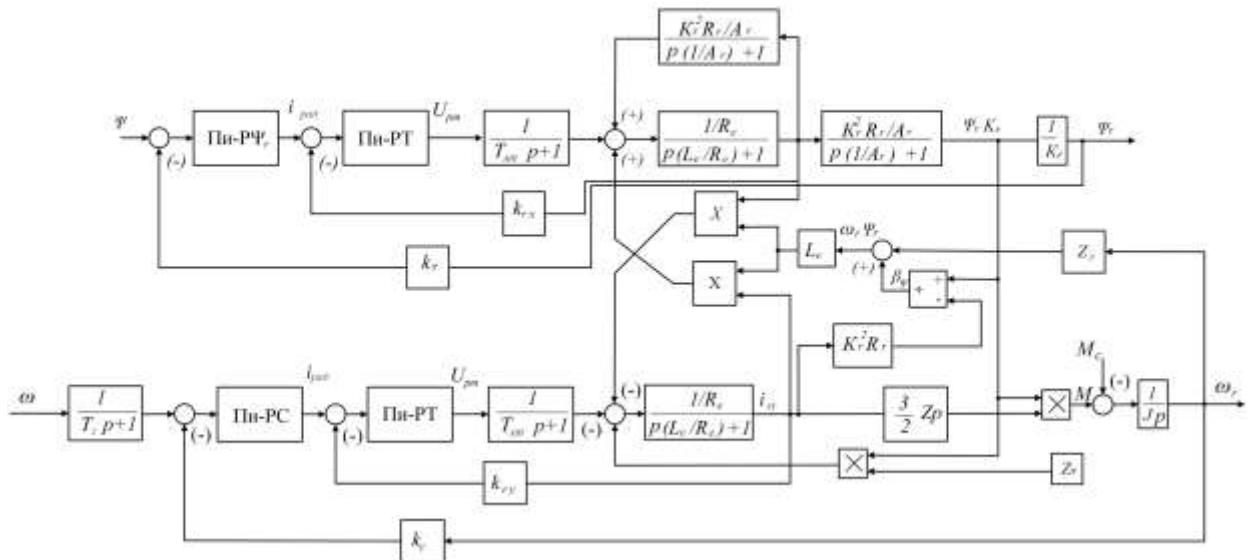


Рис. 2.16. Структурна схема САУ асинхронного електроприводу з векторним керуванням

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

2.3.5 Оптимізація контурів регулювання. Оптимізація контуру струму

Структурна схема контуру регулювання складової струму статора I_{sx} представлена на рисунку 2.19. Перетворювач частоти в системі електроприводу є аперіодичною ланкою першого порядку. Приймаємо значення коефіцієнта підсилення перетворювача рівним одиниці: $K_{\text{ан}} = 1$.

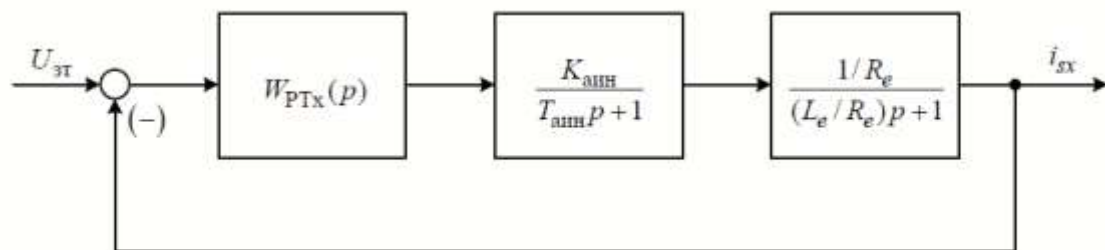


Рис. 2.16. Структурна схема контуру регулювання складової струму статора I_{sx}

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Проведемо розрахунок еквівалентної постійної часу перетворювача:

$$T_{\text{анн}} = \frac{0,5}{f_{\text{шм}}} = \frac{0,5}{6000} = 83,33 \cdot 10^{-6} \text{ с.} \quad (2.69)$$

Контур струму налаштовуємо на модульний оптимум. У цьому випадку приймаємо ПІ-регулятор з передавальною функцією:

$$W_{\text{рт}}(p) = k_{\text{рт}} \cdot \frac{T_{\text{рт}} \cdot p + 1}{T_{\text{рт}} \cdot p}. \quad (2.70)$$

Приймаємо малу некомпенсовану постійну часу контуру струму, рівну постійній часу автономного інвертора напруги:

$$T_{\text{мт}} = T_{\text{анн}} = 83,33 \cdot 10^{-6}. \quad (2.71)$$

Розрахуємо коефіцієнт передачі регулятора струму:

$$k_{\text{рт}} = \frac{L_e}{K_{\text{анн}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\text{анн}}} = \frac{0,00044}{1 \cdot 2 \cdot 83,33 \cdot 10^{-6}} = 2,64. \quad (2.72)$$

Очікувані показники роботи замкнутого контуру струму:

- усталена похибка: $\Delta I_{\text{уст}} = 0$;
- перерегулювання: $\sigma = 4,3\%$;
- час першого узгодження: $t_{\text{ру1}}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\text{мт}} = 0,00033 \text{ с}$;
- час перехідного процесу при відпрацюванні ступінчастого керуючого впливу: $t_{\text{ру2}}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\text{мт}} = 0,00033 \text{ с}$;
- смуга пропускання за модулем і фазою:

$$\omega_{\text{п}}^{(\Phi)} = \omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{0,71}{T_{\text{мт}}} = 8520,34 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.73)$$

На рис.2.17 представлена імітаційна модель замкнутого контуру струму

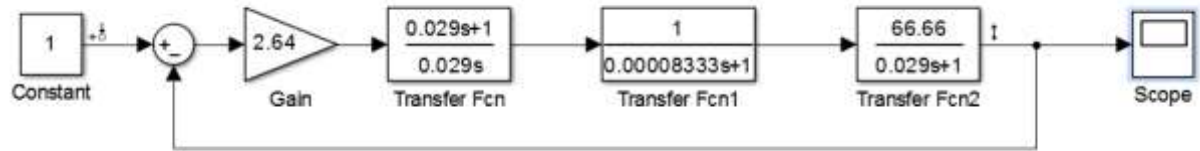


Рис. 2.17. Імітаційна модель замкнутого контуру струму

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

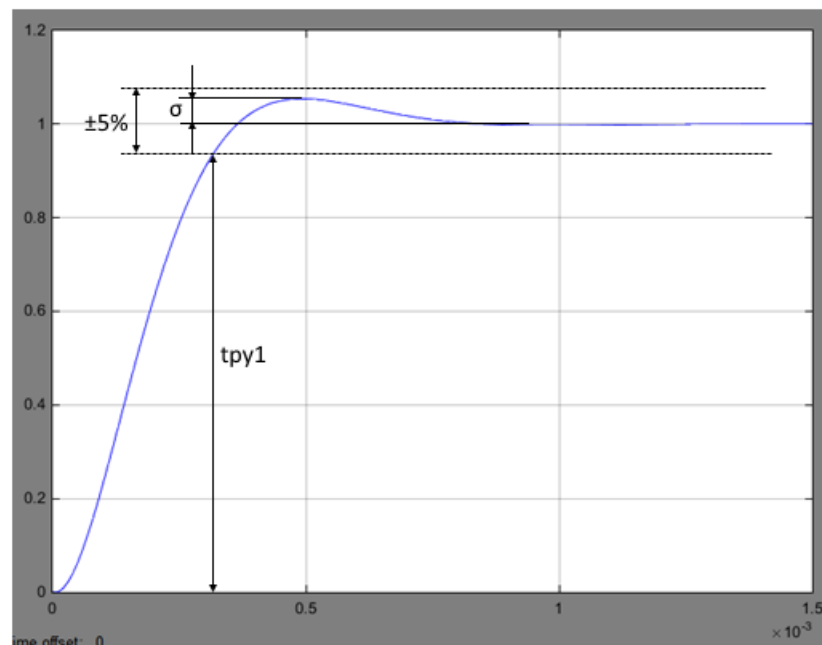


Рис. 2.18. Перехідний процес в контурі струму

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

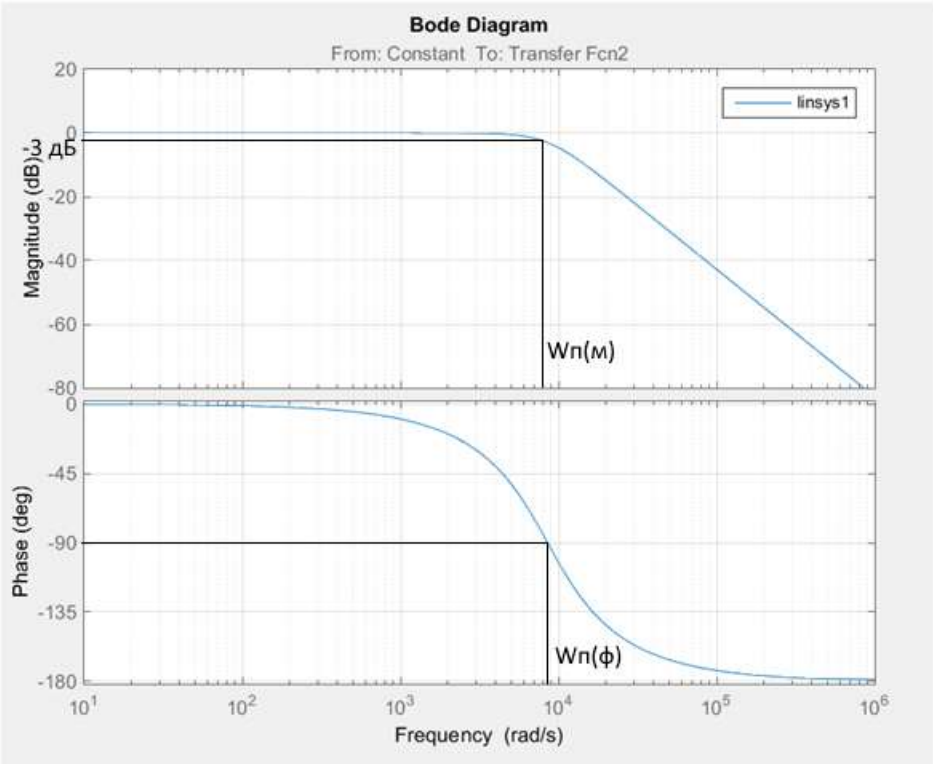


Рис. 2.19. ЛЧХ замкнутого контуру струму

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Якісні показники роботи лінеаризованого контуру струму наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

**Показники якості перехідних процесів з управління
лінеаризованого контуру струму**

$t_{py1}^{(s)}, c$	$t_{py2}^{(s)}, c$	$\sigma, \%$	$\Delta I_{ycr}, A$	$\omega_n^{(\phi)}, \frac{рад}{c}$	$\omega_n^{(m)}, \frac{рад}{c}$
Очікувані показники					
0,00033	-	4,3	0	8520	8520
Результати моделювання					
0,0003	-	4	0	8300	8000

Таким чином, теоретичні значення практично зійшлися з отриманими. Контур регулювання складової струму статора i_{sy} аналогічний за своєю структурою контуру, отриманому в результаті вище наведеної оптимізації.

2.3.6 Оптимізація контуру потокозчеплення ротора

Структурну схему контуру потокозчеплення ротора представлено на рис. 2.20

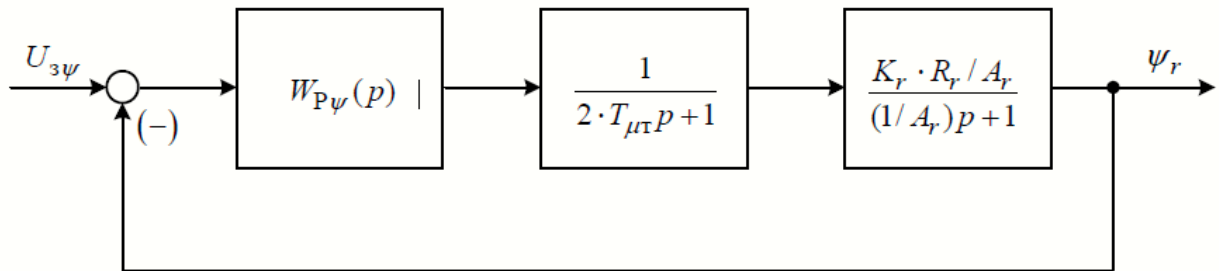


Рис. 2.20. Структурна схема контуру потокозчеплення ротора

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Внутрішній оптимізований контур струму:

$$W_{з.к.т.}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu T} \cdot p + 1}. \quad (2.74)$$

Контур потокозчеплення ротора налаштовуємо на модульний оптимум. У цьому випадку приймаємо ПІ-регулятор з передавальною функцією:

$$W_{p\psi}(p) = k_{p\psi} \cdot \frac{T_{p\psi} \cdot p + 1}{T_{p\psi} \cdot p}. \quad (2.75)$$

Розрахуємо коефіцієнт передачі регулятора потокозчеплення ротора:

$$k_{p\psi} = \frac{1}{K_r \cdot R_r \cdot a_{\pi} \cdot a_{\tau} \cdot T_{\mu T}} = \frac{1}{0,971 \cdot 0,0077 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 83,33 \cdot 10^{-6}} = 401262, \quad (2.76)$$

де $a_{\psi} = a_{\tau} = 2$ - коефіцієнти оптимізації.

Розрахуємо постійну часу регулятора потокозчеплення ротора:

$$T_{\text{пр}} = \frac{1}{A_r} = \frac{1}{0,831} = 1,2 \text{ с.} \quad (2.77)$$

Очікувані показники роботи замкнутого контуру потокозчеплення ротора:

- усталена похибка: $\Delta\psi_{\text{уст.}} = 0$;
- перерегулювання: $\sigma = 8,14\%$;
- час першого узгодження: $t_{\text{py1}}^{(5)} = 7 \cdot T_{\mu\Gamma} = 0,00058 \text{ с}$;
- час перехідного процесу при відпрацюванні ступінчастого керуючого впливу: $t_{\text{py2}}^{(5)} = 12 \cdot T_{\mu\Gamma} = 0,00099 \text{ с}$;
- розрахуємо смугу пропускання за модулем:

$$\omega_{\pi}^{(\text{м})} = \frac{0,5}{T_{\mu\Gamma}} = 6000 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.78)$$

- розрахуємо смугу пропускання по фазі:

$$\omega_{\pi}^{(\Phi)} = \frac{0,35}{T_{\mu\Gamma}} = 4200 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.79)$$

На рис. 2.21 надано імітаційну модель замкнутого контуру потокозчеплення ротора.

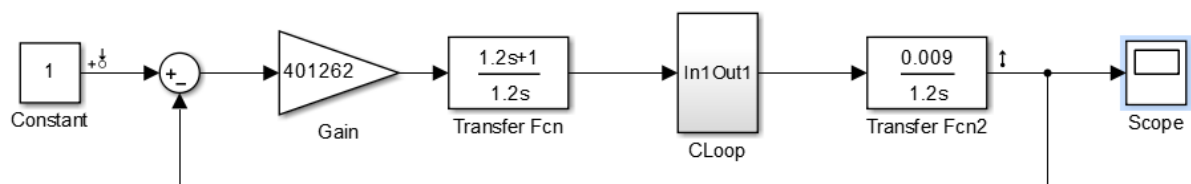


Рис. 2.21. Імітаційна модель замкнутого контуру потокозчеплення ротора

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]



Рис. 2.22. Імітаційна модель підсистеми «Current Loop»

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

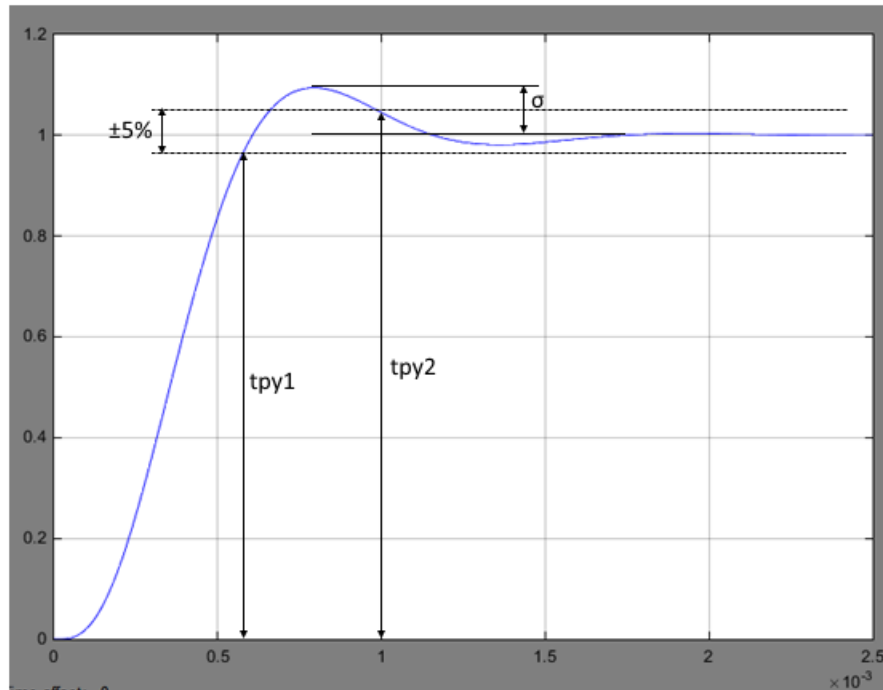


Рис. 2.23. Перехідний процес в контурі потокозчеплення ротора

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

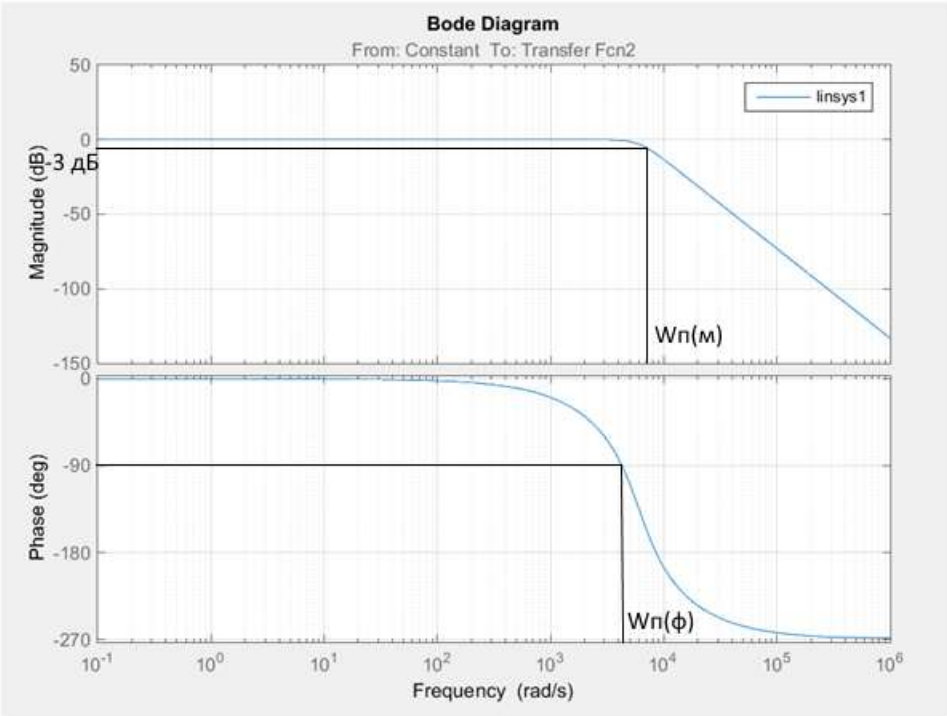


Рис. 2.24. ЛЧХ замкнутого контуру потокозчеплення ротора

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Таблиця 2.6
Показники якості перехідних процесів з керування лінеаризованого контуру потокозчеплення, оптимізованого за МО

$t_{py1}^{(5)}, c$	$t_{py2}^{(5)}, c$	$\sigma, \%$	$\Delta \psi_{уст}, Bб$	$\omega_n^{(\phi)}, \frac{рад}{c}$	$\omega_n^{(m)}, \frac{рад}{c}$
Очікування показники					
0,00058	0,00099	8,1	0	4200	6000
Результати моделювання					
0,0006	0,001	8	0	3700	6000

2.3.7 Оптимізація контуру швидкості

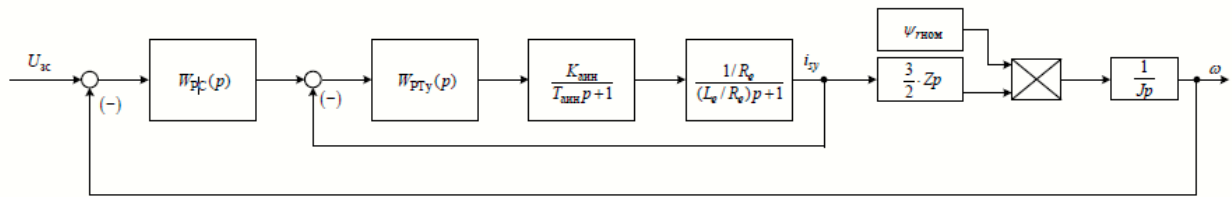


Рис. 2.25. Структурна схема контуру швидкості

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Далі необхідно контур швидкості налаштувати на симетричний оптимум (приймаємо ПІ-регулятор з передавальною функцією):

$$W_{pc}(p) = k_{pc} \cdot \frac{T_{pc} \cdot p + 1}{T_{pc} \cdot p} \quad (2.80)$$

Далі необхідно прийняти малу некомпенсовану постійну часу контуру швидкості:

$$T_{\mu c} = 32 \cdot T_{\mu t} = 32 \cdot 83,33 \cdot 10^{-6} \quad (2.81)$$

Мала некомпенсована постійна часу в контурі швидкості - $T_{\mu c} = 32T_{\mu t}$. Це більше ніж при оптимізації контуру керування потокозчепленням. Це положення призводить до зниження швидкодії в контурі швидкості з одного боку, при цьому дає змогу зменшити взаємний вплив між контурами швидкості та потокозчеплення з іншого.

Проведемо розрахунок коефіцієнту передачі регулятора швидкості:

$$k_{pc} = \frac{J \cdot 98}{1,5 \cdot z_p \cdot \psi_{2H} \cdot a_c \cdot 1024 \cdot T_{\mu t}} = \frac{2,9 \cdot 98}{1,5 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 8 \cdot 1024 \cdot 83,33 \cdot 10^{-6}} = 154,19, \quad (2.82)$$

де a_c – коефіцієнт оптимізації.

Проведемо розрахунок сталої часу регулятора швидкості:

$$T_{pc} = 98 \cdot T_{\mu t} = 0,0081 \text{ с.} \quad (2.83)$$

Нам необхідно на вхід контуру встановити фільтр (аперіодичну ланку першого порядку) з постійною часу.

$$T_{\text{вх.ф}} = 32 \cdot 4 \cdot T_{\mu\Gamma} = 0,01 \text{ с.} \quad (2.84)$$

Отримані показники роботи замкнутого контуру швидкості з фільтром на вході:

- усталена похибка: $\Delta\omega_{\text{уст}} = 0$;
- перерегулювання: $\sigma = 8,1\%$;
- час першого узгодження: $t_{\text{py1}}^{(5)} = 7 \cdot T_{\mu\Gamma} = 0,0182 \text{ с}$;
- час перехідного процесу при відпрацюванні ступінчастого керуючого впливу: $t_{\text{py2}}^{(5)} = 12 \cdot T_{\mu\text{с}} = 0,0312 \text{ с}$;

– смуга пропускання по модулю:

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{0,5}{T_{\mu\text{с}}} = 192,3 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.85)$$

– смуга пропускання по фазі:

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{0,36}{T_{\mu\text{с}}} = 138,46 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.86)$$

На рисунку 2.26 приведена імітаційна модель замкнутого контуру швидкості.

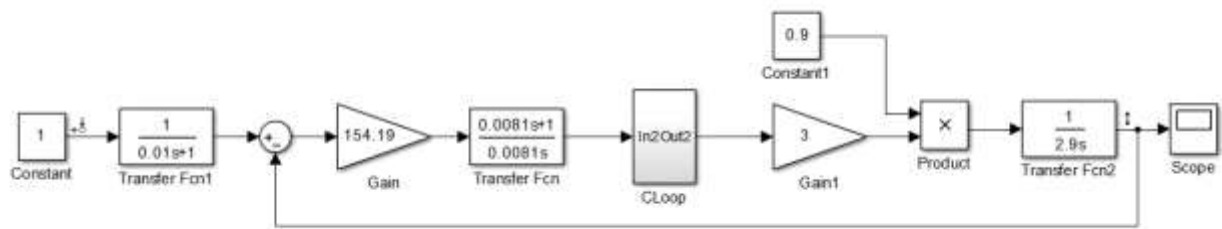


Рис. 2.26. Імітаційна модель замкнутого контуру швидкості

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

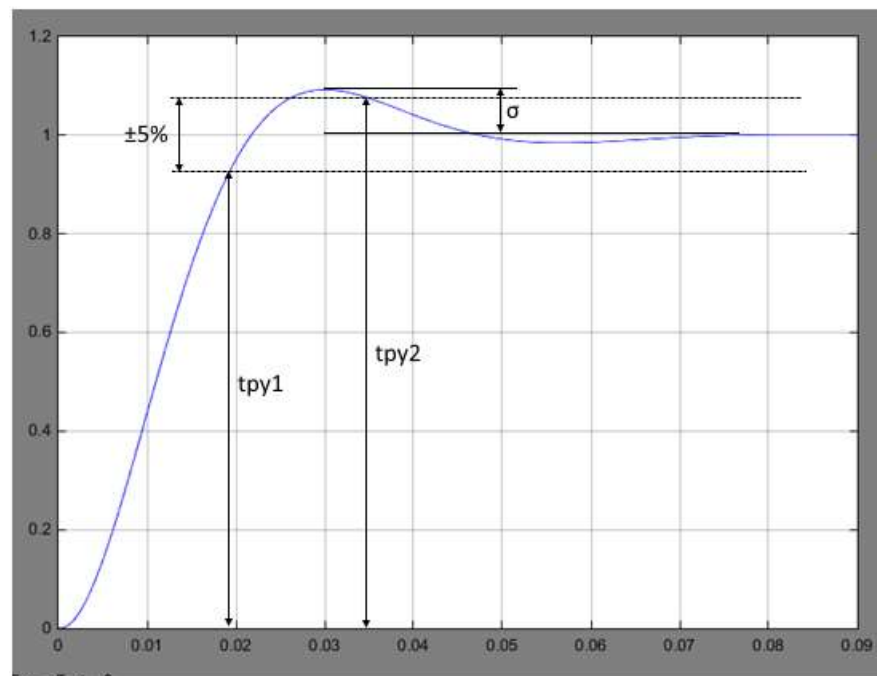


Рис. 2.27. Перехідний процес в контурі швидкості

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

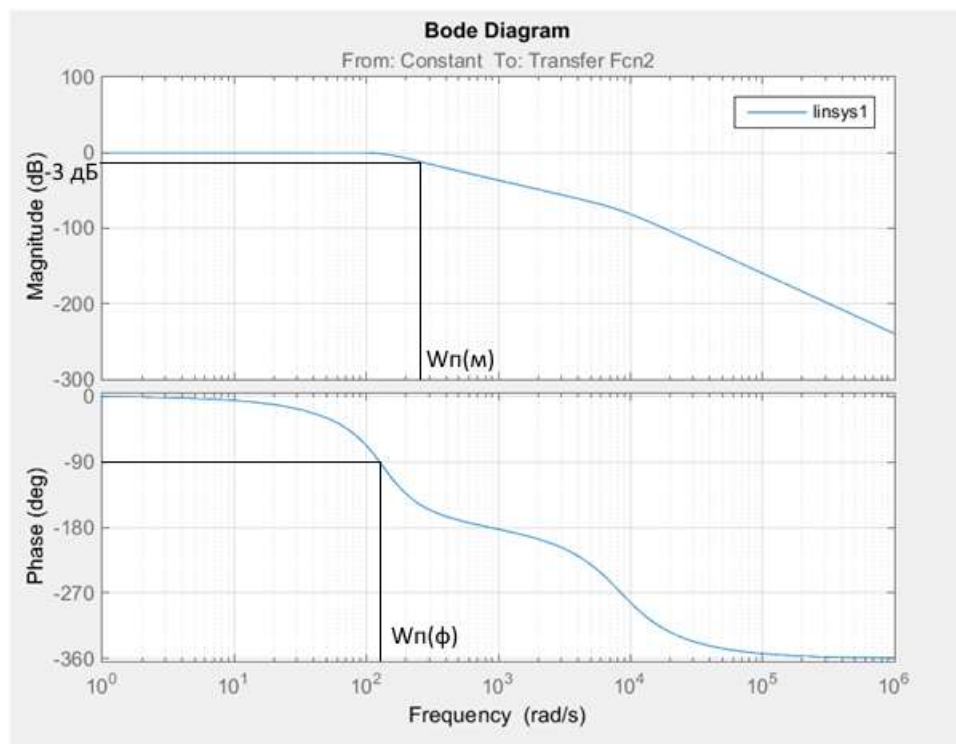


Рис. 2.28. ЛЧХ замкнутого контуру швидкості

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Таблиця 2.7.

Показники якості перехідних процесів з керування лінеаризованого контуру швидкості, оптимізованого за СО

$t_{py1}^{(5)}$, с	$t_{py2}^{(5)}$, с	σ , %	$\Delta\omega_{уст}$, рад/с	$\omega_n^{(\phi)}$, $\frac{рад}{с}$	$\omega_n^{(M)}$, $\frac{рад}{с}$
Очікувані показники					
0,0182	0,0312	8,1	0	138,46	192,3
Результат моделювання					
0,019	0,034	9,2	0	94	170

2.3.8 Загальна модель електроприводу в обертовій системі координат

Загальний вигляд моделі двигуна в обертовій системі координат з оптимізованими контурами в середовищі Matlab Simulink представлений на рисунку 2.29.

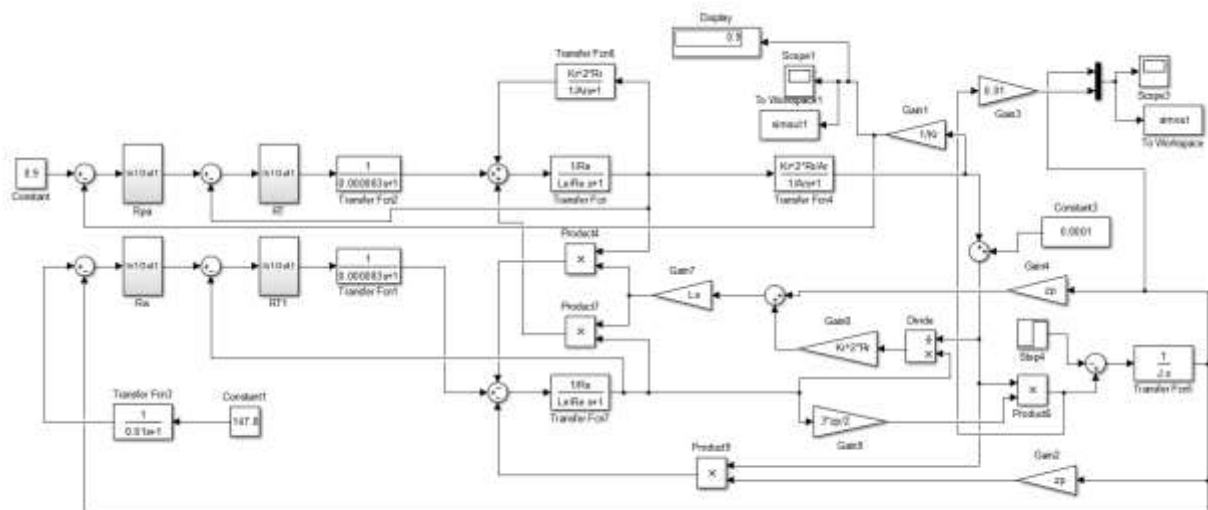


Рис. 2.29. Загальний вигляд моделі двигуна в обертовій системі координат з оптимізованими контурами в середовищі Matlab Simulink

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

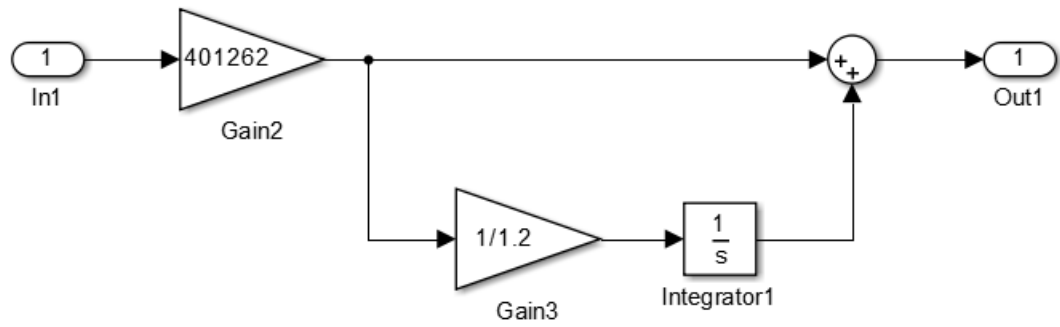


Рис. 2.30. Підсистема «Rpsi»

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

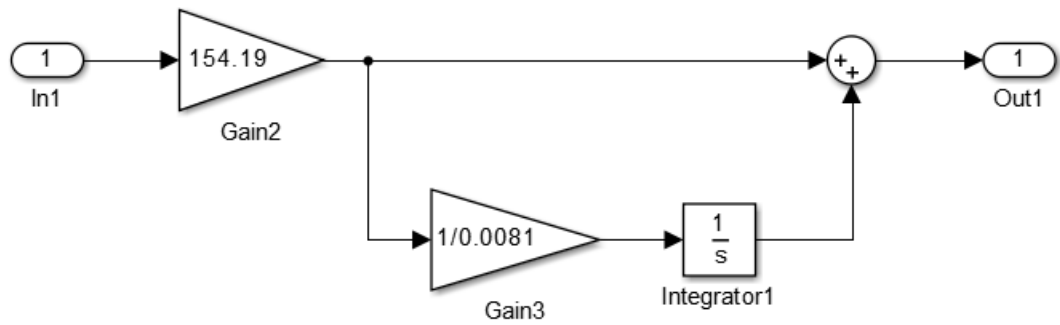


Рис. 2.31. Підсистема «Rw»

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

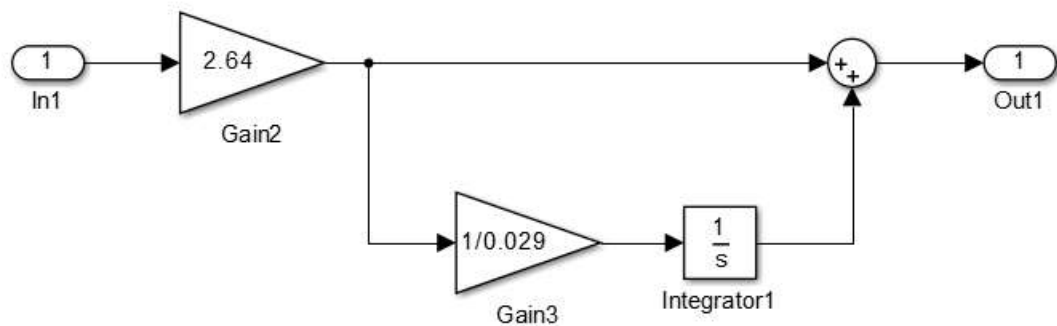


Рис. 2.32. Підсистема «RT»

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Далі за допомогою цієї моделі отримуємо перехідні процеси за швидкістю і потокозчепленням. Необхідно порівняти їх з перехідними процесами в ідеальних оптимізованих контурах.

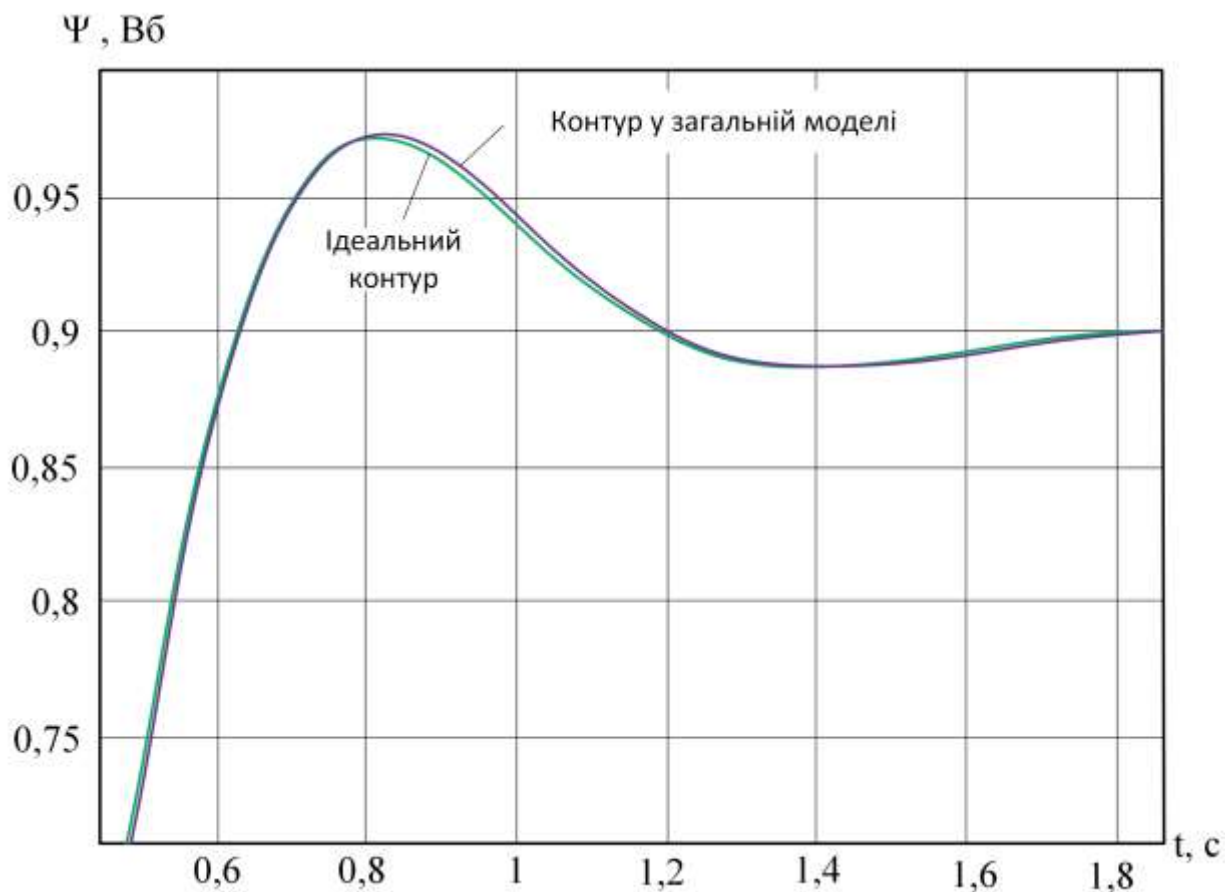


Рис. 2.33. Перехідні процеси потокозчеплення в ідеальному контурі та в загальній моделі

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Таблиця 2.8.

Порівняння перехідних процесів

Потокозчеплення		Швидкість	
$\Psi_{уст.}, Вб$	$\sigma, \%$	$\omega_{уст.}, Вб$	$\sigma, \%$
Ідеальний контур			
0,9	8	147,8	9,2
Контур в загальній моделі			
0,8998	8,2	147,8	9,7

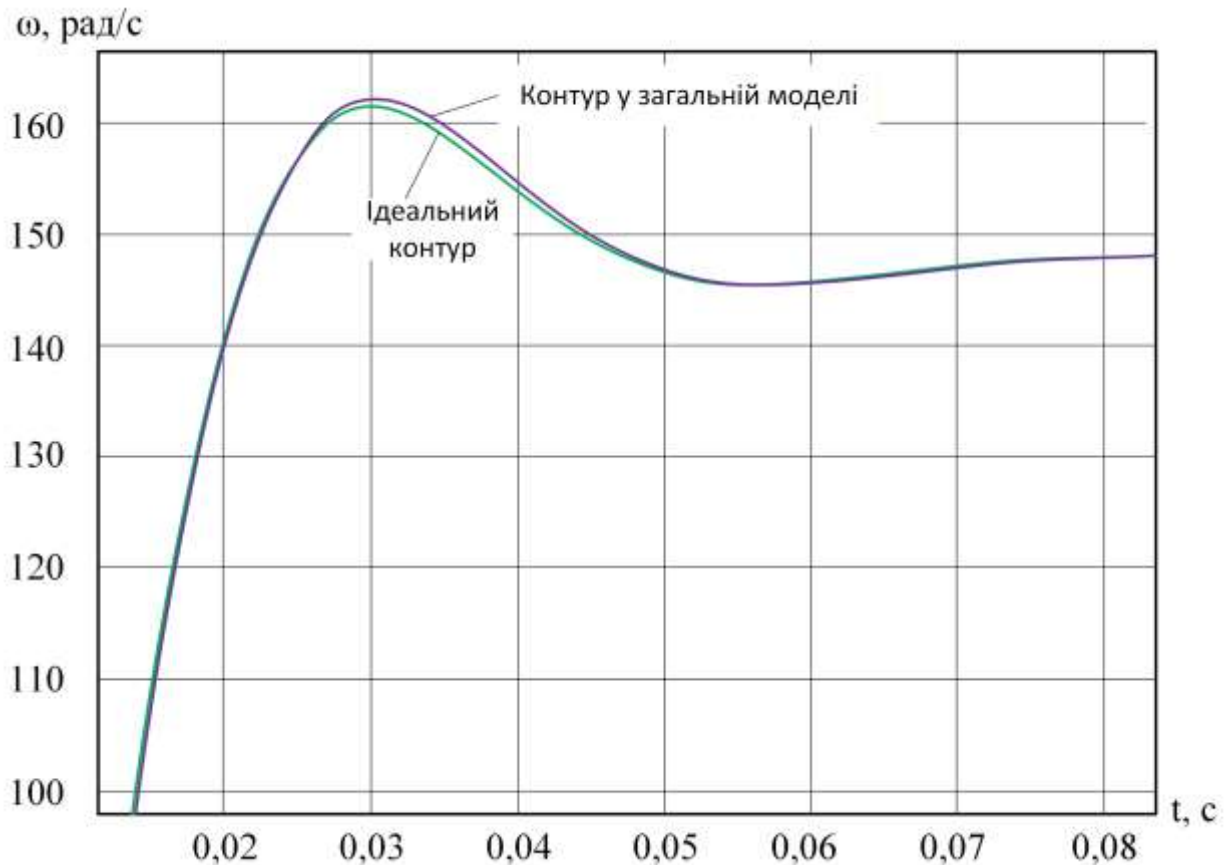


Рис. 2.33. Перехідні процеси швидкості в ідеальному контурі та в загальній моделі

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Аналізуючи даний перехідний процес, можна визначити, що контур швидкості має безпосередній вплив на контур потокозчеплення. Незначно зменшилося встановлене значення потокозчеплення, а також збільшилося перерегулювання. Але ці зміни настільки незначні, що ними можна сміливо знехтувати. У контурі швидкості також спостерігається зміна перерегулювання, але відсутня зміна в усталеному значенні швидкості.

2.3.9 Загальна модель електроприводу в нерухомій системі координат

Оскільки система управління може бути створена тільки в обертовій системі координат, а реальні струми і напруги – це струми і напруги в нерухомій системі координат, то в зв'язку з цим регулятори координат електроприводу і модель

двигуна в нерухомій системі координат необхідно узгодити за допомогою координатних перетворювачів. Перетворення координат з нерухомої системи координат в обертову і навпаки здійснюють шляхом застосування прямого і зворотного перетворень Парка відповідно:

$$\left. \begin{aligned} i_x &= i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta \\ i_y &= -i_\alpha \sin \theta + i_\beta \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (2.87)$$

$$\left. \begin{aligned} i_\alpha &= i_x \cos \theta - i_y \sin \theta \\ i_\beta &= i_x \sin \theta + i_y \cos \theta \end{aligned} \right\}$$

На структурній схемі (рис.2.25) ці перетворення здійснюються блоками ПКП (прямий перетворювач координат) і ОКП (зворотний перетворювач координат). Блок ВП (обчислювач потоку) розраховує модуль і кут повороту вектора потокозчеплення ротора, використовуючи інформацію про проєкції вектора потокозчеплення на осі α і β нерухомої системи координат.

$$|\psi_2| = \sqrt{\psi_{2\alpha}^2 + \psi_{2\beta}^2} \quad (2.88)$$

$$\theta_{\psi_2} = \arctg \left(\frac{\psi_{2\beta}}{\psi_{2\alpha}} \right)$$

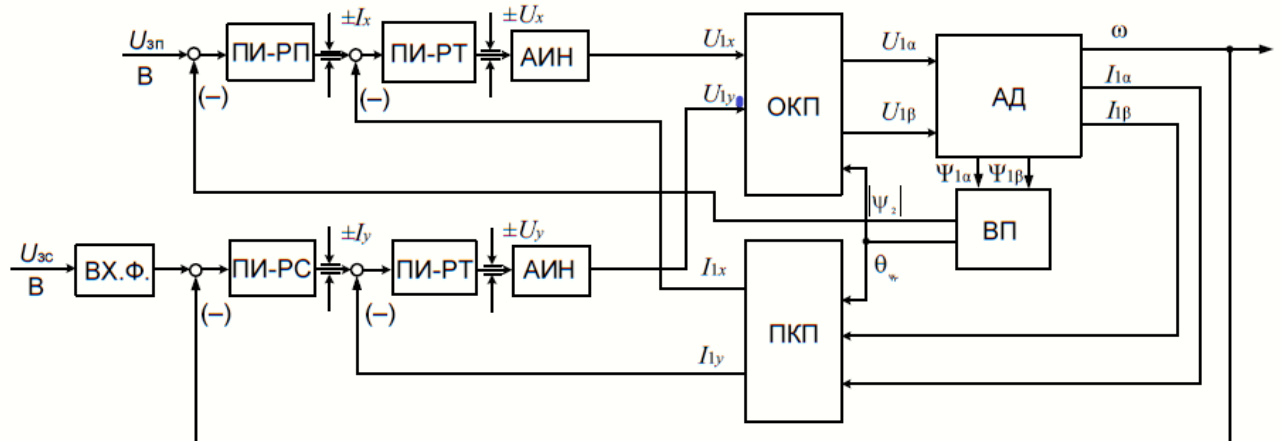


Рис. 2.34. Функціональна схема нелінійної САУ РЕП

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Імітаційна модель САУ РЕП з використанням моделі двигуна в нерухомій системі координат представлена на рис.2.35.

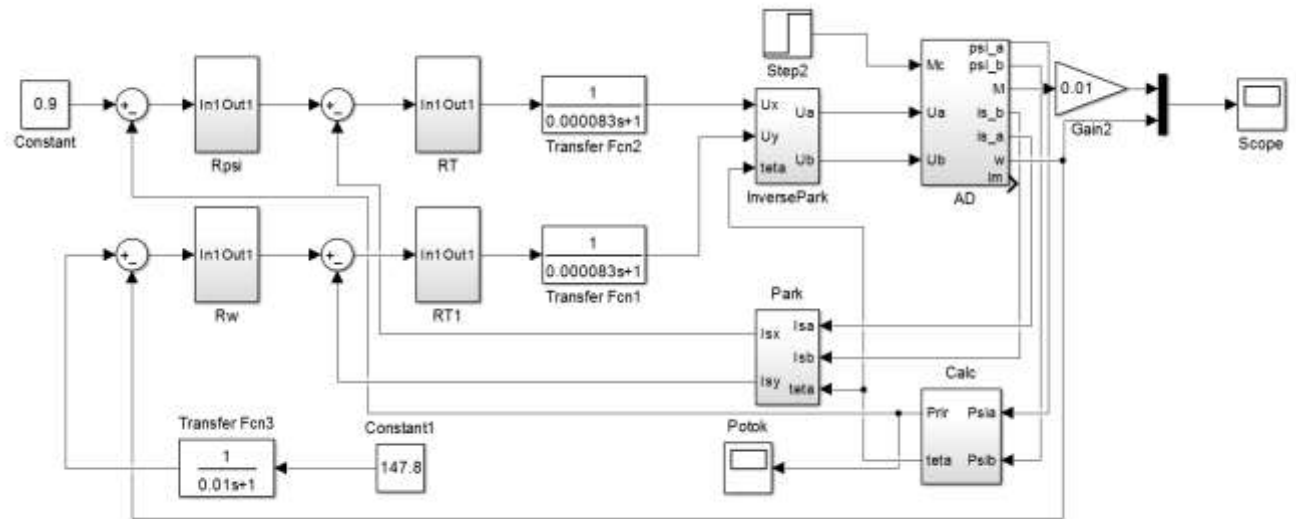


Рис. 2.35. Імітаційна модель нелінійної САУ РЕП у програмному середовищі MATLAB Simulink

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

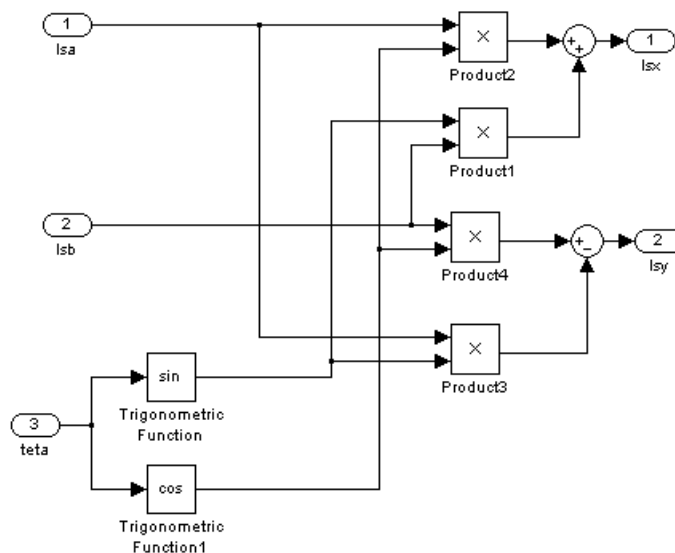


Рис. 2.36. Підсистема «Park»

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

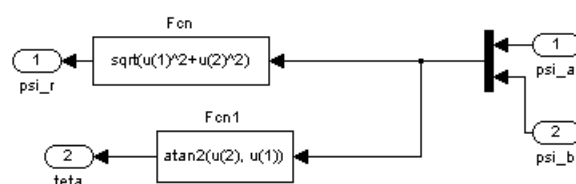


Рис. 2.37. Підсистема «Calc»

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

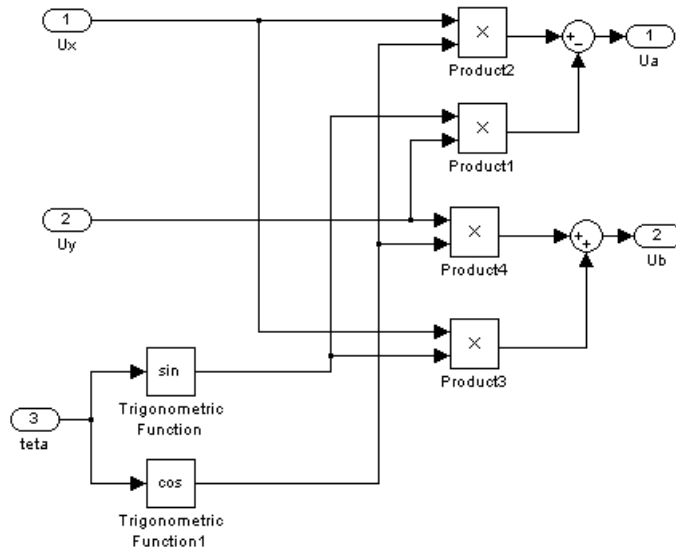


Рис. 2.38. Підсистема «Inverse Park»

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Перевіряємо працездатність лінеаризованої системи управління з моделлю двигуна в нерухомій системі координат – здійснюємо пуск і навантаження, знімаємо перехідні процеси моменту і швидкості.

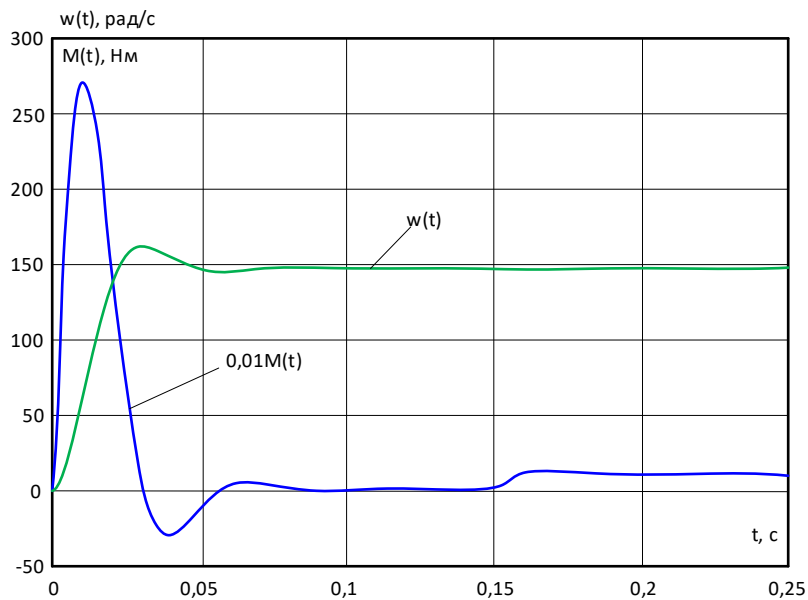


Рис. 2.39. Перехідні процеси моменту і швидкості

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Виходячи з отриманих графіків можна зробити висновок, що модель поводить адекватно і її можна використовувати в подальшому моделюванні нелінійної системи управління.

2.3.10 Моделювання нелінійної системи векторного керування

Нелінійностями в представленому електроприводі є вентиляторне навантаження та обмеження на виході регуляторів. Введення обмежень обумовлено необхідністю обмеження максимальної амплітуди напруги обмоток АД, обмеження струмів в статорних обмотках АД, а також обмеження моменту на валу двигуна. Оптимальні обмеження регуляторів мають наступні значення:

$$\begin{aligned} U_X &= 0,312 \cdot U_{\max} = 0,312 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1\phi\pi} = 97,07; \\ U_Y &= 0,95 \cdot U_{\max} = 0,95 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1\phi\pi} = 295,57; \\ I_X &= 1,5 \cdot I_{\text{нпр}} = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\phi\pi} = 626,15; \\ I_Y &= 2 \cdot I_{\text{нпр}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\phi\pi} = 834,86. \end{aligned} \quad (2.89)$$

У моделі електроприводу з системою векторного керування блоки регуляторів замінюємо на підсистеми регуляторів з обмеженнями вихідних сигналів.

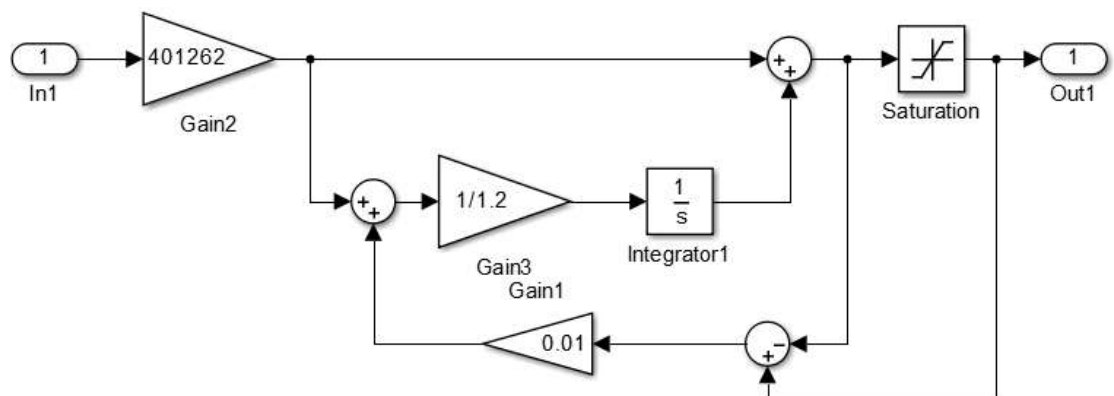


Рис. 2.40. Підсистема «Rpsi» нелінійного регулятора потокозчеплення ротора

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

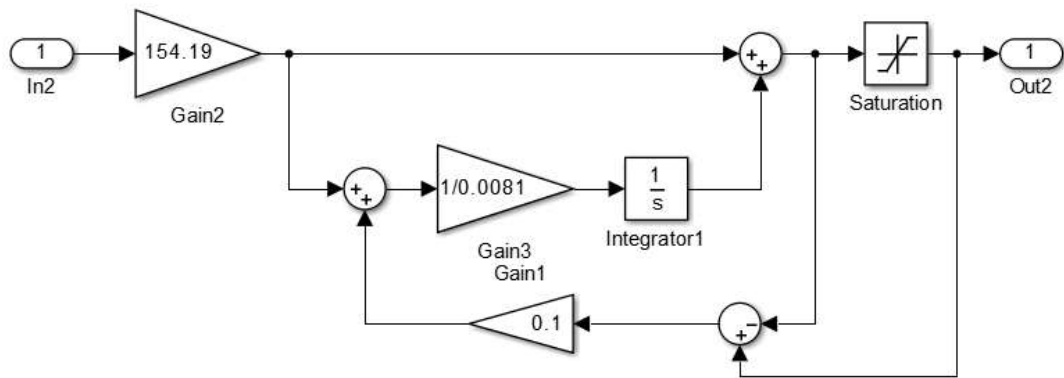


Рис. 2.41. Підсистема «Rw» нелінійного регулятора потокозчеплення швидкості

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

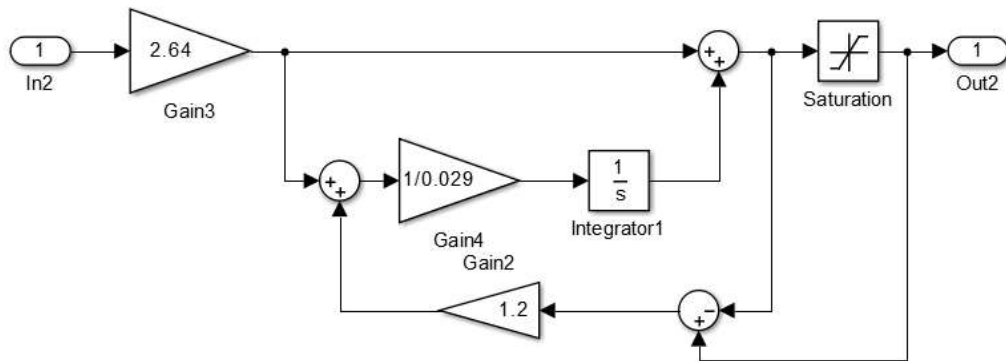


Рис. 2.42. Підсистема «RT» нелінійного регулятора струму статора

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

У системі з обмеженнями вихідних сигналів регуляторів векторної системи управління здійснюємо пуск і навантаження, знімаємо перехідні процеси моменту і швидкості двигуна.

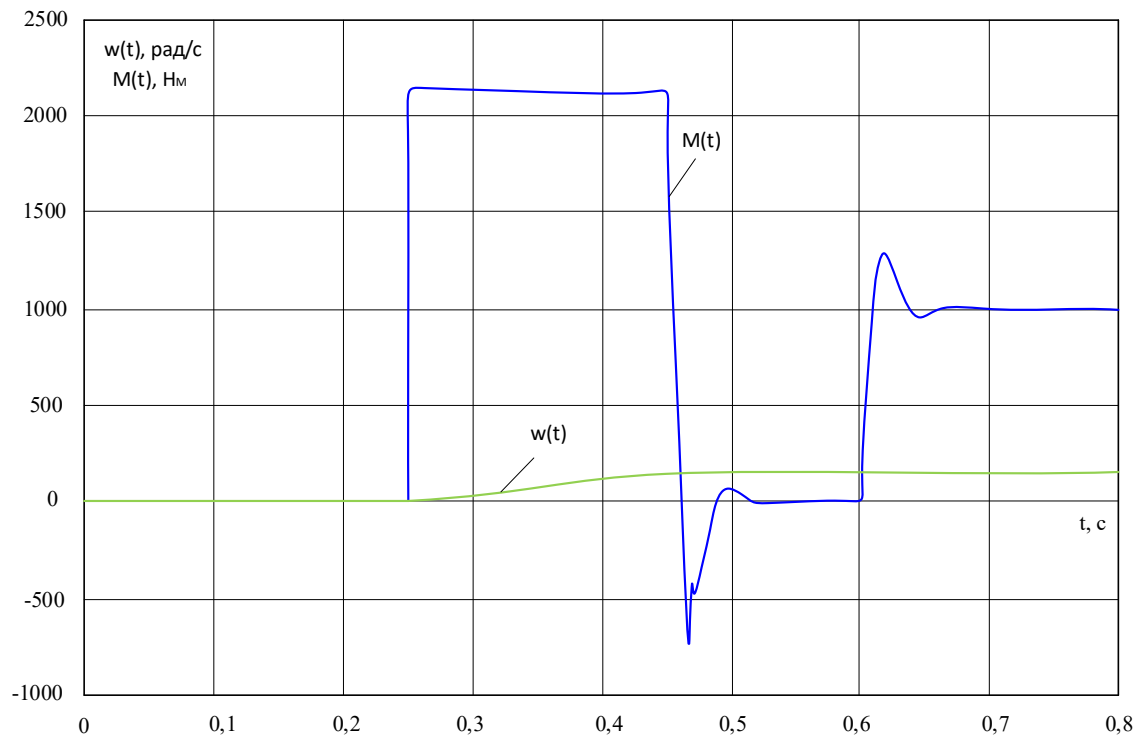


Рис. 2.43. Перехідні процеси моменту і швидкості при миттєвому заданні значення швидкості

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

На отриманих графіках видно, що модель працює прийнятно, але пусковий момент при миттєвому заданні значення швидкості досягає майже 2100 Нм. Порівнюючи цей момент з пусковим моментом АД при прямому пуску $M_{\text{дв.пуск}} = 2467,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$, можна зробити висновок, що всі переваги регуляторів нівелюються. Тому замість миттєвого задавання значення швидкості доцільно поставити задавач.

$$U_X = 0,312 \cdot U_{\text{max}} = 0,312 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1\phi\text{н}} = 97,07;$$

$$U_Y = 0,95 \cdot U_{\text{max}} = 0,95 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1\phi\text{н}} = 295,57;$$

$$I_X = 1,5 \cdot I_{\text{нпр}} = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\phi\text{н}} = 626,15;$$

$$I_Y = 2 \cdot I_{\text{нпр}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\phi\text{н}} = 834,86.$$

(2.90)

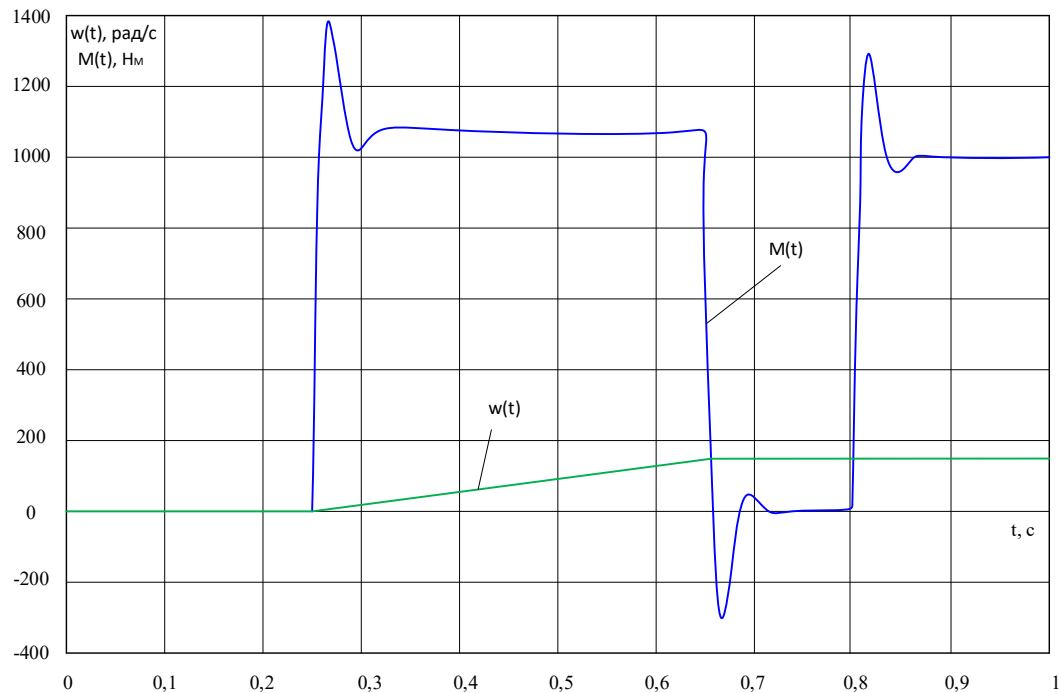


Рис. 2.44. Перехідні процеси моменту і швидкості при використанні задавача інтенсивності

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

При використанні задавача інтенсивності трохи зменшується швидкодія, зате вдалося значно знизити пусковий момент. Тепер потрібно перевірити на графіках струмів і напруг, чи правильно відпрацьовують регулятори задані в них обмеження.

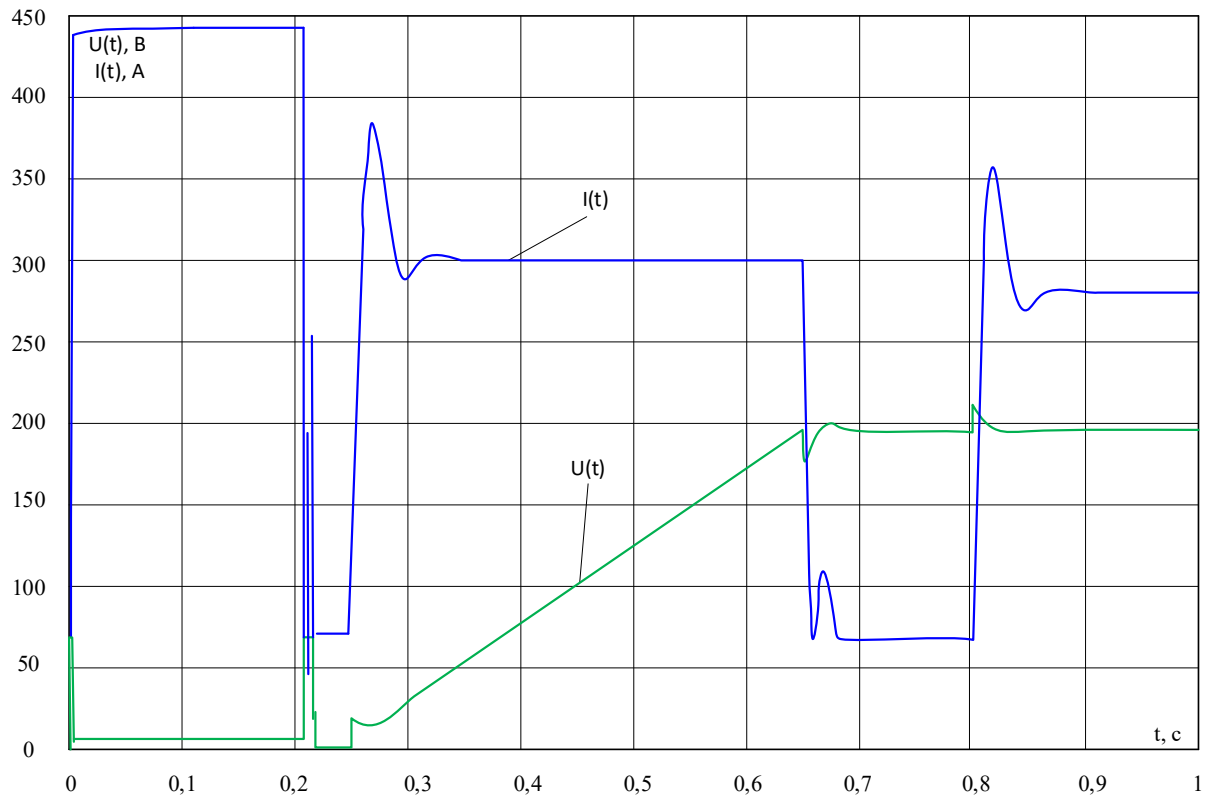


Рис. 2.45. Перехідні процеси струму і напруги при використанні задавача інтенсивності

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Аналізуючи графіки, робимо висновок, що ні струм, ні напруга не перевищують заданих обмежень, отже система працює адекватно.

2.3.11 Моделювання нелінійної системи з вентиляторним навантаженням

Заключним етапом є заміна ступінчастого накидання моменту на нелінійну характеристику, побудовану раніше.

Розрахунок навантаження буде проводитися за формулою:

$$M_{\Sigma}(\omega) = 0,1 \cdot M_{де.ном} + 0,00308 \cdot (\omega)^{2,5} \quad (2.91)$$

Зведемо значення навантажувальної характеристики в таблицю 2.9.

Таблиця 2.9

Значення навантажувальної характеристики

$M_{\Sigma}, \text{Нм}$	0	102,8	108,3	133,9	188,6	279,1	410,8	588,6	817	1100
$\omega, \text{рад/с}$	0	0,001	20	40	60	80	100	120	140	160

Імітаційна модель САУ РЕП при використанні нелінійної навантажувальної характеристики в програмному середовищі MATLAB Simulink представлена на рисунку 2.46.

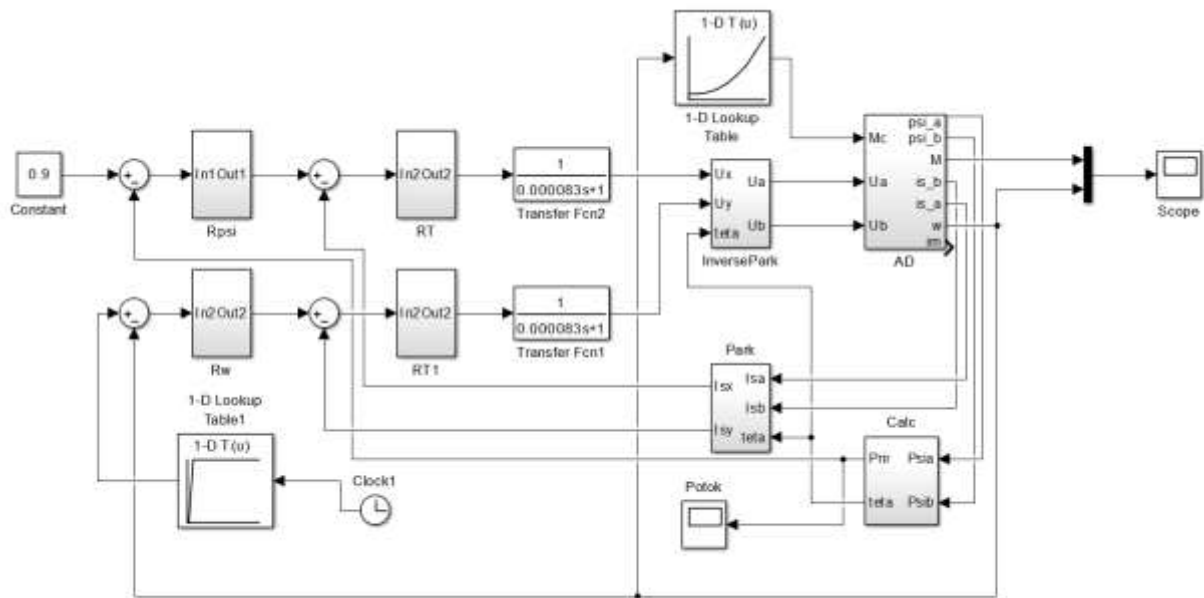


Рис. 2.46. Імітаційна модель САУ РЕП при використанні нелінійної навантажувальної характеристики в програмному середовищі MATLAB Simulink

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

У системі з нелінійною навантажувальною характеристикою здійснюємо пуск, знімаємо перехідні процеси моменту і швидкості двигуна.

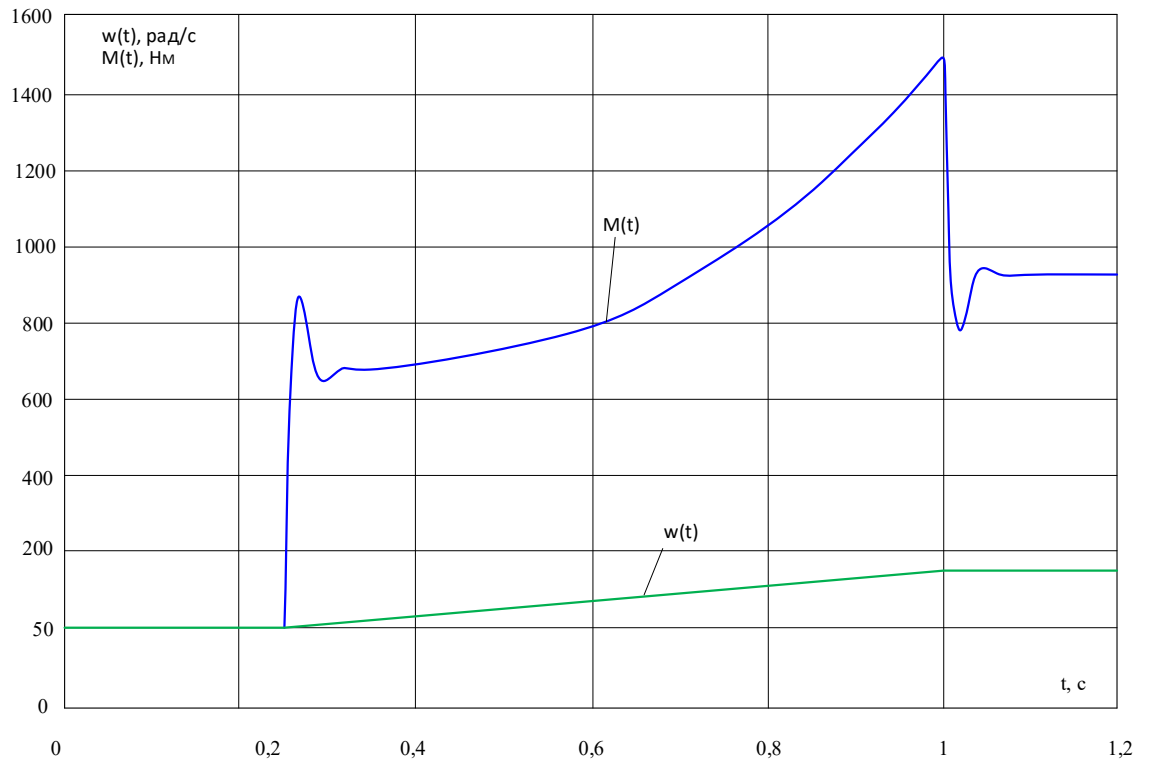


Рис. 2.47. Перехідні процеси моменту і швидкості при використанні нелінійного навантаження

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

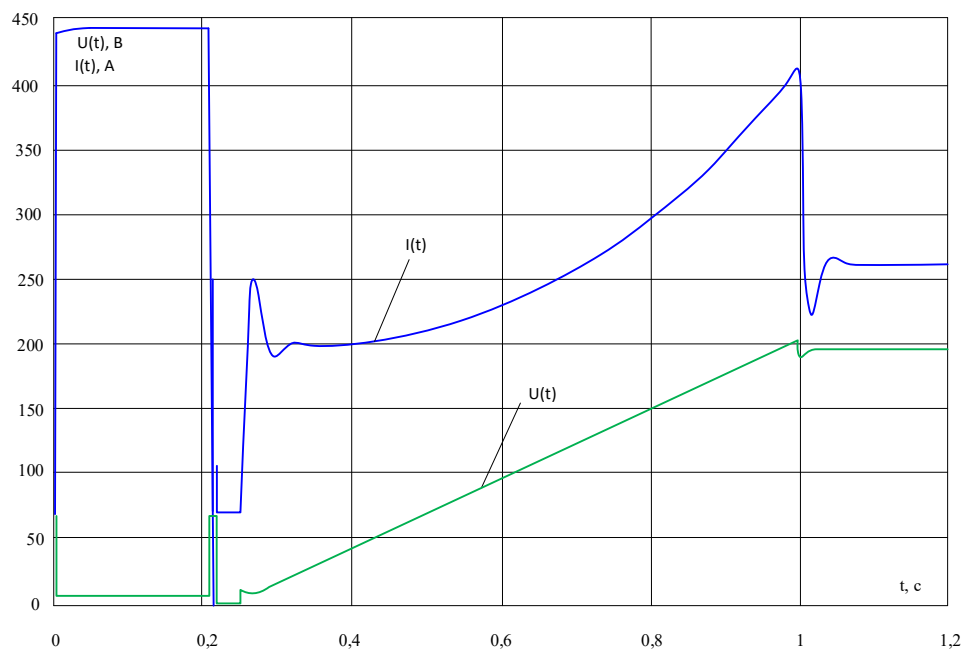


Рис. 2.48. Перехідні процеси струму і напруги при використанні нелінійного навантаження

Примітка. Джерело: Розроблено з використанням [6]

Аналізуючи отримані дані, бачимо, що система точно відпрацьовує завдання по швидкості, а також має прийнятний момент і швидкодію при розгоні двигуна. Напруги і струми при роботі системи управління не перевищують заданих нами меж. Робимо висновок, що система працює справно і виконує поставлені нами завдання.

2.4 Економічне обґрунтування розроблених технологічних рішень

Одним з основних рішень для енергозбереження, що використовуються в асинхронному двигуні, є впровадження частотного регулювання. Поряд зі зниженням споживання електричної енергії перетворювач частоти дозволяє отримати більш якісні перехідні процеси і знизити динамічні навантаження, що призведе до збільшення експлуатаційного терміну компресора. Більшість компресорних установок у світі використовує нерегульований електропривод. Це обумовлено тим, що дуже мала кількість пристроїв і агрегатів вимагають підтримки постійного тиску для їх коректної роботи. Але існують такі пристрої, де установка регульованого електроприводу може привести не тільки до зниження споживаної енергії, але і до поліпшення якості продукції, що випускається.

Темою дослідницької роботи є модернізація електроприводу компресора Atlas Copco. Даний компресор бере участь у виробництві кам'яної вати. У технологічному процесі компресор використовується при видуванні волокна в камеру осадження, а також в пневматичних установках при нарізці, транспортуванні та пакуванні килима кам'яної вати в міру руху по виробничій лінії. У модернізації системи управління асинхронного електроприводу компресора Atlas Copco використовується векторне управління. Під час проектування системи управління було змодельовано асинхронний електродвигун у нерухомій та обертовій системах координат. Було проведено

оптимізацію контурів регулювання, а також моделювання системи під час пуску та навантаження ступінчастого та нелінійного навантаження.

В результаті застосування системи векторного управління дозволило підвищити енергоефективність і надійність компресора. Висока плавність перехідних процесів і точність регулювання швидкості також є важливими перевагами спроектованої системи.

Механізм компресора приводиться в дію електроприводом змінного струму ABB M2CA 315 MB. Цей електропривод було обрано на підставі високої надійності роботи, надійності системи захистів і сигналізації.

2.5 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації компресора

Компресори використовують для одержання стисненого повітря або іншого газу тиском, для застосування енергії в приводах пневматичних інструментів та в пристроях пневмоавтоматики та ін. Досліджений Компресор Atlas Copco бере участь у виробництві теплоізоляційного матеріалу. Він використовується під час видування волокна в камеру осадження. Крім того використовується у пневматичних установках при нарізанні, транспортуванні та пакуванні килима з кам'яної вати під час руху по виробничій лінії.

Для роботи, регулювання, технічного обслуговування та ремонту обладнання Atlas Copco повинен допускатися тільки персонал, що має відповідну кваліфікацію. У процесі переміщення, роботи, перебирання або виконання технічного обслуговування та ремонту обладнання Atlas Copco механіки повинні застосовувати безпечні методи роботи та дотримуватися всіх відповідних місцевих вимог безпеки та нормативних актів. Ці заходи безпеки стосуються обладнання, яке забезпечує подачу повітря або його споживає. Використання будь-якого іншого газу вимагає додаткових заходів безпеки, характерних для відповідного застосування, які тут не враховуються.

Нехтування цими заходами забезпечення безпеки може становити небезпеку для людей, а також навколишнього середовища та обладнання:

- становити небезпеку для людей внаслідок електричного, механічного або хімічного впливу,
- становити небезпеку для навколишнього середовища внаслідок витоку масла, розчинників або інших речовин,
- становити небезпеку для обладнання внаслідок порушення функціонування.

Таблиця 2.10

Небезпечні та шкідливі фактори під час експлуатації компресора

Найменування виду робіт	Шкідливі фактори	Нормативний документ
Робота з компресором у виробництві	Підвищений рівень шуму на робочому місці	ДСТУ 23941-94 (ГОСТ 12.1.003-83)
	Вплив електромагнітного випромінювання	ДСТУ EN 62233:2016
	Підвищена або знижена температура повітря робочої зони	ДСанПіН 3.3.6.042-99
	Ураження електричним струмом	ДСТУ EN 50110-1:2014 (ГОСТ 12.1.038-82)

Є особа необхідність утримання установки в безпечному робочому стані. Компоненти та приладдя установки необхідно замінювати в разі їх відсутності або невідповідності безпечній роботі.

Необхідно постійно стежити за тим, щоб суворо дотримувалися всі інструкції по роботі та обслуговуванню установки та обладнання, а також щоб обладнання разом з усіма приналежностями та захисними пристроями і всі споживаючі пристрої перебували в справному стані, без підвищеного зносу або пошкодження. У разі появи будь-яких ознак або припущення про перегрів всередині обладнання, установку необхідно зупинити, але ніякі кришки не відкривати, поки не пройде достатньо часу для охолодження; це виключить ризик самовільного займання парів масла при контакті з повітрям.

Номінальні паспортні дані (величина тиску, температури, швидкості тощо) повинні мати довговічне маркування.

Використовувати установку строго за призначенням і в межах номінальних меж (тиску, температури, швидкості тощо).

Машину потрібно утримувати в чистоті, не допускати забруднення маслом, пилом та іншими речовинами. Для запобігання підвищення робочої температури регулярно перевіряти і чистити поверхні теплопередачі.

Всі регулюючі та захисні пристрої повинні мати належний догляд, що забезпечує їх відповідне функціонування. Вони не повинні відключатися або блокуватися. Слід бути уважними, щоб виключити пошкодження запобіжних клапанів та інших пристроїв розвантаження тиску, особливо запобігати засміченню фарбою, масляним осадом або накопиченням бруду, які можуть порушити функціонування пристроїв. Необхідно регулярно перевіряти точність датчиків тиску і температури. У разі перевищення допустимих меж вони повинні бути замінені. Для визначення того, що запобіжні та захисні пристрої знаходяться в справному робочому стані, вони повинні перевірятися відповідно до опису в графіку технічного обслуговування даного керівництва з експлуатації. Необхідно слідкувати за станом маркувань та інформаційних бірок на установці. У разі пошкодження або руйнування попереджувальних бірок їх необхідно замінити, щоб забезпечити безпеку оператора. Необхідно підтримувати робочу зону в чистоті. Відсутність порядку підвищує ризик нещасних випадків.

При роботі на установці необхідно користуватися засобами захисту. Залежно від застосування це можуть бути: захисні окуляри, навушники, захисний шолом (включаючи забрало), захисні рукавички, захисний спецодяг, захисне взуття. Не працювати з неприбраним довгим волоссям, у незастебнутому та вільному одязі та з ювелірними виробами.

Буди обережними з вогнем. Обережно поводитися з паливом, маслом і антифризом, оскільки це легкозаймисті речовини. Забороняється курити або наближатися з відкритим полум'ям при поводженні з подібними речовинами. Необхідно тримати поблизу вогнегасник.

Техніка безпеки при обробці та роботі

Установка працює в пожежонебезпечному середовищі, тому на всіх вихлопних трубах двигуна повинен бути встановлений іскроуловлювач для

захоплення запальних іскор. У стандартній комплектації установка обладнана SCR, сертифікованим як глушник.

У вихлопних газах міститься чадний газ, який може викликати смертельне отруєння. При експлуатації установки в обмеженому просторі для відведення відпрацьованих газів необхідно використовувати відвідну трубу достатнього діаметру. Це необхідно зробити таким чином, щоб уникнути впливу зворотного тиску на двигун. При необхідності встановіть витяжний вентилятор. Дотримуйтесь всіх діючих місцевих положень і норм.

Необхідно переконайтеся, що установка має достатній забір повітря для роботи. При необхідності встановлюють додаткові повітрозабірники.

При роботі в запиленому середовищі розміщують установку так, щоб на неї не потрапляв пил від вітру. Експлуатація в чистому середовищі значно збільшує періодичність чищення фільтрів повітрозабірника.

Перед підключенням або відключенням шланга необхідно закривати на компресорі кран випуску повітря. Перед відключенням шланга необхідно переконатися в тому, що з нього повністю стравлено тиск. Розподільні трубопроводи та повітряні шланги повинні мати відповідний діаметр і відповідати робочому тиску. Експлуатація пошкоджених і зношених шлангів заборонена. Всі компоненти, що здійснюють обертальний або зворотно-поступальний рух, мають стаціонарні захисні кожухи. Двері дозволено відкривати тільки на короткий проміжок часу, наприклад для виконання перевірок і регулювань. Для всіх обертових і поршневих деталей призначені спеціальні захисні кожухи, відсутність яких створює небезпеку для персоналу. Забороняється приступати до роботи з обладнанням при знятих захисних кожухах, поки вони не будуть надійно встановлені на місце.

Навіть помірні рівні шуму можуть викликати роздратування і розлад. При тривалому впливі це може привести до серйозних порушень нервової системи людей. Якщо в місцях звичайного перебування персоналу рівень звукового тиску:

- нижче 70 дБ (А): ніяких заходів вживати не потрібно,

- вище 70 дБ (А): люди, які постійно перебувають у цьому приміщенні, повинні мати звукоізолюючі засоби,

- нижче 85 дБ (А): ніяких заходів вживати не потрібно для людей, які перебувають у цьому місці обмежений час,

- вище 85 дБ (А): приміщення класифікується як зона підвищеного рівня шуму, тому на кожному вході на видному місці має розміщуватися попередження, що повідомляє людям, які входять, про необхідність мати засоби захисту слуху, навіть якщо вони входять на короткий час,

- вище 95 дБ (А): попереджувальні написи біля входу в робочу зону повинні бути доповнені рекомендаціями про необхідність використання засобів захисту органів слуху особами, які перебувають у цьому місці обмежений час,

- вище 105 дБ (А): повинні бути спеціальні засоби захисту слуху, що відповідають рівню і спектральному складу шуму, а також спеціальне попередження на кожному вході про вплив цього шуму.

Цей пристрій містить деталі в зоні досяжності, температура яких може перевищувати 80 °C (176 °F). Забороняється знімати теплоізоляцію та захисні кожухи з цих компонентів, поки вони не охолонуть до кімнатної температури. Оскільки неможливо ізолювати або захистити всі гарячі деталі захисними пристроями оператор повинен дотримуватися обережності і не торкатися гарячих компонентів при відкритті дверей машини. Забороняється експлуатувати пристрій у місцях, де можливий забір займистих або токсичних парів.

Якщо в процесі роботи утворюються небезпечні пари, пил або вібрація, необхідно вжити необхідних заходів для виключення ризику травмування персоналу.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено дослідження асинхронного електроприводу компресора Atlas Copco GA22-13 FF та розроблено пропозиції щодо його модернізації. Основними результатами роботи є:

1. Виявлено недоліки існуючого приводу, зокрема високі енергетичні витрати при частковому навантаженні та нестабільність тиску.
2. Запропоновано впровадження частотного перетворювача для регулювання швидкості асинхронного двигуна, що забезпечує плавну роботу та економію енергії.
3. Проведене моделювання та експериментальні дослідження підтвердили ефективність модернізації: зниження споживання електроенергії на 15–20 %, підвищення стабільності тиску та зменшення зносу механізмів.

4. Оцінено економічну доцільність модернізації, що включає скорочення витрат на електроенергію та обслуговування, а також позитивний вплив на екологію.
5. Розроблені рекомендації можуть бути використані для модернізації аналогічних компресорних установок із асинхронним приводом.

Таким чином, проведена робота підтвердила доцільність і ефективність модернізації асинхронного електроприводу компресора Atlas Copco, що забезпечує підвищення енергоефективності, надійності та тривалості експлуатації обладнання.

У роботі розглянуто питання охорони праці та промислової безпеки.

ЗГОДА здобувача(чки) освіти Державного університету економіки і технологій
про перевірку кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії ДУЕТ

Я, *Бастиль Дмитро Олегович*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна магістерська (бакалаврська) робота (назва роботи повністю) виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений(а). Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований(на), що відповідно до пункту 5.8 «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» згадана робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ) та ознайомлений(на) з умовами такого розміщення.

01.06. 2025