

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації,
електроінженерії та радіоелектроніки

(повне найменування інституту, назва факультету)

кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

О.Ю. Колларов

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 2021 р.

Дипломна робота

магістра

(освітній ступінь)

на тему Моделювання процесів у системах керування асинхронними
двигунами

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕЛКЗМ-19

(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Понкратов О.С.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник Тімошенко С. М., д.т.н, проф.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент:

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Нормоконтроль:

Засвідчую, що у цій випускній
 кваліфікаційній роботі немає
 запозичень з праць інших авторів
 без відповідних посилань.

Любименко О. М.

Студент

(підпис)

(підпис)

(дата)

(дата)

Покровськ – 2021 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації,
 електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (Колларов О. Ю.)

« ____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Понкратову Олексію Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Моделювання процесів у системах керування
асинхронними двигунами

керівник роботи Тімошенко С. М., д.т.н, проф.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ №

2. Строк подання студентом роботи 05 травня 2021 року

3. Вихідні дані до роботи: Номинальна потужність двигуна –
400 кВт, напруга живлення – 6000 В, активний опір обмотки статора –
0,00955 Ом, реактивний опір обмотки статора – 0,0555+0,035i Ом,
активні опори обмоток ротора – 0,0222 і 0,268 Ом, реактивні опори обмоток
ротора – 0,2155 і 0,357 Ом, коефіцієнт потужності – 0,85, ККД – 0,94.
Інші параметри обрати довільно або за таблицями.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Огляд загальних принципів функціонування трифазних асинхронних електроприводів та способів їх керування

2. Огляд принципів частотного регулювання електроприводів технологічних об'єктів.

3. Огляд методології перетворювачів потужності для регульованих приводів.

4. Моделювання процесів у приводах з асинхронними двигунами.

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

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Біла Н. С.		
Розділи 1, 2	Колларов О. Ю.		
Нормоконтроль	Любименко О. М.		

7. Дата видачі завдання 15 лютого 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд загальних принципів функціонування трифазних асинхронних електроприводів	15.02.2021 – 28.02.2021	
2.	Огляд принципів керування роботою асинхронних приводів	01.03.2021 – 09.03.2021	
3.	Принципи частотного регулювання електроприводів технологічних об'єктів	10.03.2021 – 19.03.2021	
4.	Огляд методології перетворювачів потужності для регульованих приводів	20.03.2021 – 31.03.2021	
5.	Моделювання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у програмному середовищі Mathcad	01.04.2021 – 09.04.2021	
6.	Моделювання роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у програмному середовищі Matlab	10.04.2021 – 19.04.2021	
7.	Огляд питань охорони праці	20.04.2021 – 30.04.2021	

Студент

Понкратов О.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Тімошенко С.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Понкратов О.С. Моделювання процесів у системах керування асинхронними двигунами / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

Дипломна робота складається із вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі наведено загальні відомості про асинхронні приводи та системи їх керування.

У другому розділі було визначені принципи частотного регулювання електроприводів технологічних об'єктів.

У третьому розділі здійснено огляд методології перетворювачів потужності для регульованих приводів.

У четвертому розділі виконано моделювання процесів у приводах з асинхронними двигунами.

Ключові слова: асинхронний двигун, перетворювач частоти, частотне регулювання, природна характеристика, штучна характеристика, програмне середовище, векторного керування, інвертор, моделювання

SUMMARY

Ponkratov O.S. Modeling of processes in control systems of induction motors / Graduation qualifying work for obtaining an educational level "master" in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Pokrovsk, 2021.

Thesis consists of an introduction, the main part, which includes four sections, conclusions, list of references and appendices.

The first section provides general information about asynchronous drives and their control systems.

The second section defines the principles of frequency control of electric drives of technological objects.

The third section reviews the methodology of power converters for adjustable drives.

In the fourth section, modeling of processes in drives with induction motors is performed.

Keywords: induction motor, frequency converter, frequency control, natural characteristic, artificial characteristic, software environment, vector control, inverter, modeling

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АСИНХРОННІ ПРИВОДИ ТА СИСТЕМИ ЇХ КЕРУВАННЯ	9
1.1 Огляд загальних принципів функціонування трифазних асинхронних електроприводів	9
1.2 Огляд принципів керування роботою асинхронних приводів	13
1.2.1 Пряме керування частотою обертання асинхронного двигуна	13
1.2.2 Керування частотою обертання асинхронного двигуна за допомогою перетворювачів частоти	15
2 ПРИНЦИПИ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ	21
2.1 Поняття про природні та штучні характеристики асинхронного двигуна	21
2.2 Огляд проблемних питань при прямому пуску асинхронного двигуна	26
3 ОГЛЯД МЕТОДОЛОГІЇ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ РЕГУЛЬОВАНИХ ПРИВОДІВ	31
4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ПРИВОДАХ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ	37
4.1 Моделювання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у програмному середовищі Mathcad	37

4.2 Моделювання роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у програмному середовищі Matlab	46
4.2.1 Моделювання системи векторного керування асинхронним двигуном за законом постійності потокозчеплення	46
4.2.2 Моделювання роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, що живиться від перетворювача частоти з автономним інвертором	58
ВИСНОВКИ	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	68
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	72
ДОДАТОК Б. ТЕХНІЧНІ УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ (ВИТЯГ)	83
ДОДАТОК В. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	90

ВСТУП

Асинхронний двигун, що входить до складу регульованого приводу на основі силових напівпровідникових перетворювачів, отримав найширше розповсюдження у царині технологічних об'єктів.

Загальною характеристикою силових перетворювачів частоти є їхня відносна простота і тому надійність конструкції електричних ланцюгів. Цьому також сприяє використання цифрових систем, що забезпечують задані параметри і дозволяють знизити витрати електричної енергії та підвищити продуктивність праці й знизити собівартість.

Покращення параметрів роботи електроприводів можливо досягти або розробкою прогресивних конструкцій перетворювачів і приводних двигунів, або застосуванням новітніх алгоритмів, направлених на мінімізацію втрат енергії.

Будь-який технологічний процес вимагає від електроприводу підтримки заданих параметрів частоти обертання і крутного моменту у залежності від визначеного технологічного процесу.

Задачами керування є розробка заходів та способів поєднання значень амплітуди і частоти напруги живлення при регулюванні і, як наслідок, зміну значень магнітного потоку, коефіцієнтів потужності і корисної дії та втрат у приводі. У загальному випадку, оптимізовані параметри управління полягають у визначенні робочих точок за умов найменших витрат за підтримки вимог технологічного процесу.

При розробці і впровадженні методів управління необхідно бажати сягати підвищених значень коефіцієнта корисної дії привода за умов мінімізації втрат на досягнення даного ефекту.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АСИНХРОННІ ПРИВОДИ ТА СИСТЕМИ ЇХ КЕРУВАННЯ

1.1 Огляд загальних принципів функціонування трифазних асинхронних електроприводів

Силова електроніка у електроприводах у своїй основі передбачає реалізацію змінної напруги та змінної частоти на двигуні при постійному значенні напруги та частоти джерела живлення. Приводи зі змінними швидкостями двигуна керуються напругою та частотою на статорі асинхронного двигуна дозволяє підвищити енергетичні показники його роботи [1].

Джерела, що живлять електроприводи, здебільшого мають фіксовані значення напруги і частоти і забезпечують задані значення крутного моменту та частоти обертання технологічного об'єкта. Але, бувають випадки, що вимагають зміну у визначеному діапазоні зазначених параметрів, що можуть забезпечити перетворювачі потужності. Основні вимоги до даних перетворювачів полягають у здійсненні мінімального впливу на живлячу мережу (шляхом утворення гармонік напруги і струмів) та на приводний електродвигун (негативні тепловий вплив та вплив на стан ізоляції); вимагати мінімального технічного та сервісного обслуговування [2].

Частота обертання магнітного поля, що створюється на обмотках статора електродвигуна, пов'язана з частотою напруги, яка подається на обмотки статора. Блоки живлення з електронним живленням можуть створювати сигнали змінної частоти та змінну напругу, які можна використовувати для регулювання швидкості та крутного моменту двигуна на валу [2].

Додатковими позитивними факторами застосування регулювання частоти обертання двигуна за допомогою зміни частоти напруги живлення

є підвищені параметри управління цим процесом та зменшення параметрів зношування під'єданого до них обладнання. Основними недоліками даних систем є продукування електромагнітних перешкод та вищих гармонік струму у мережі живлення та зменшення терміну служби двигунів [3].

Перші двигуни змінного струму були розроблені наприкінці XIX століття. Вони привернули увагу своєю простотою, надійністю та масо-габаритними показниками у порівнянні з двигунами постійного струму. Основним недоліком цих двигунів – фіксовані значення частоти обертання та крутного моменту, що дещо обмежувало область його застосування [2, 3].

З енергетичної точки зору трифазні двигуни змінного струму – це електромагнітні перетворювачі енергії – вони здатні на основі законів електромагнітної індукції перетворювати підведену електричну енергію у енергію механічну (двигунний режим роботи) і навпаки – механічну енергію у енергію електричну (генераторний режим). Принцип електромагнітної індукції полягає у тому, що в разі протікання через провідник магнітного поля, у провіднику індукується напруга, а в разі виконання провідника у вигляді замкненого кола, у ньому може виникнути струм і провідник має змогу переміщуватися під дією виникаючої сили, з напрямком, перпендикулярним магнітному полю [2, 3].

Асинхронні двигуни є у теперішній час найпопулярнішими у застосуванні серед двигунів змінного струму – вони мають однаковий принцип роботи, практично не вимагають підвищеної уваги та технічного обслуговування, мають стандартизовану конструкцію та широку номенклатуру типорозмірів при вузькій номенклатурі запчастин.

У двигуні змінного струму магнітне поле генерується обмоткою статора, а провідники на які впливають електромагнітні сили розміщені у обмотці ротора, що обертається. Характерною особливістю асинхронних двигунів є різниця частот обертання магнітного поля та ротора, що

характеризується поняттям ковзання. У основі будь-якого асинхронного двигуна є нерухомий статор, що безпосередньо складається з корпусу, обмоток, підшипникових вузлів. Статор набирається з тонких залізних листів з пазами, у яких розміщені фазні обмотки. У фазних обмотках і матеріалі статора генерується магнітне поле, частота обертання якого на номінальній частоті називається «синхронною швидкістю двигуна» (n_0) і визначається кількістю пар полюсів [2, 3].

У зазорі між статором і ротором обертається магнітне поле, індуковане у фазних обмотках, підключених до фаз змінної напруги живлення. Три фази генерують три однакових магнітних поля, зміщених одне відносно іншого на 120° . Магнітне поле може мати різний напрямок обертання, а його частота (швидкість) обертання визначається величиною частоти напруги живлення електромережі та кількістю обмоток (пар полюсів), об./хв. [2, 3]:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1.1)$$

де f – частота напруги живлення, Гц,

p – кількість пар полюсів, шт.

Усередині статора обертається ротор, закріплений жорстко на валу двигуна. Ротор також складається з тонких листів заліза та короткозамкненої обмотки з алюмінію чи обмотки з мідного проводу – фазний ротор.

Ротор перетинається магнітним полем, що обертається. Зазначене магнітне поле індукує у обмотці ротора струм, на який впливає рушійна сила. Зазначена сила визначається щільністю магнітного потоку, індукованого струму, довжиною обмотки ротора та кутом між напрямком сили та напрямком магнітного потоку, Н [2, 3]:

$$F = B \cdot I_p \cdot \ell \cdot \sin\theta \quad (1.2)$$

де B – значення магнітної індукції, Вб,

I_p – значення індукованого струму, А,

ℓ – довжина обмотки ротора, м

θ – кутом між напрямком сили F та напрямком магнітного потоку B .

Частота обертання ротора (n_n) нижча за частоту обертання магнітного поля (n_0), різниця між ними називається «ковзанням» (s). Ковзання визначає відсоток від синхронної частоти обертання і для сучасних асинхронних двигунів знаходиться у межах від 3 до 10% від номінальної частоти обертання [2, 3]:

$$n_0 = \frac{n_0 - n_n}{n_0} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

Сила, з якою рухається провідник яким протікає струм, є пропорційною до магнітного потоку і струму, що протікає через нього [2, 3]:

$$F = \frac{B \cdot I_p \cdot \ell}{C} \quad (1.4)$$

Завдяки наявності магнітного поля у стрижнях ротора індукується напруга, що викликає протікаючий струм у короткозамкненій обмотці. Одиничні сили, що діють на окремі стрижні ротора, поєднуються у загальний крутний момент відносно осі обертання.

Між крутним моментом і частотою обертання є певна залежність, що визначається геометричними, механічними та електричними параметрами двигуна.

Електродвигун споживає електричну потужність з мережі і перетворює її у механічну потужність, значення якої менша за підведену

електричну через наявність втрат у двигуні і характеризується коефіцієнтом корисної дії [2, 3]:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (1.5)$$

де P_2 – потужність на валу двигуна, Вт,

P_1 – електрична потужність, Вт.

Джерелами втрат у двигуні є втрати у мідних провідниках, втрати у металевих елементах, втрати на вентиляцію та тертя у механічних елементах. Втрати у мідних провідниках виникають в опорах статора та ротора. Втрати у металевих елементах – це втрати на перемагнічування і продукування вихрових струмів, які рухаються по колу навколо магнітних полюсів і викликають виділення тепла. Зазначені втрати зростають зі збільшенням частоти та величини магнітної індукції [2, 3].

1.2 Огляд принципів керування роботою асинхронних приводів

1.2.1 Пряме керування частотою обертання асинхронного двигуна

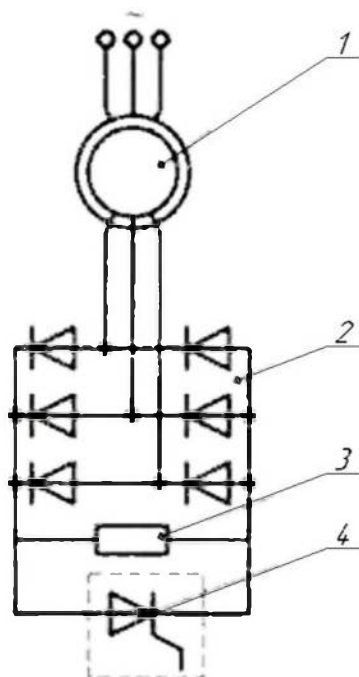
У загальному випадку частота обертання двигуна залежить від величини навантаження – при зниженні навантаження частота обертання збільшується. Зміну частоти обертання асинхронного двигуна за допомогою регулювання величини ковзання можна здійснити або шляхом зміни напруги живлення або зміною опору ротора. Частоту обертання асинхронного двигуна шляхом зміни напруги живлення можна здійснити без зміни частоти цієї напруги, що викличе зменшення крутного моменту [4].

Стабільні значення крутного моменту шляхом регулювання напруги можна отримати лише у робочому діапазоні частоти обертання (від частоти обертання холостого ходу до критичного значення частоти обертання). При зміні опору в обмотках ротора стабільність крутного моменту можна отримати у діапазоні частоти обертання від нуля критичного значення. Опір ротора можна змінювати або плавно, вводячи змінний опір в ланцюг ротора, або використовуючи ступінчасте ввімкнення опорів у даний ланцюг [5].

У разі наявності фазного ротора, його ланцюг можна підключити до машин постійного струму або керованих випрямлячів. Машини постійного струму подають у ланцюг ротора регульовану напругу, що дозволяє змінити величину магнітного поля і впливати таким чином на частоту обертання. Аналогічну ситуацію можна отримати шляхом застосування замість машин постійного струму керованих випрямлячів рис. 1.1 [6].

У теперішній час для регулювання частоти обертання найбільшого застосування знайшов спосіб зміни частоти напруги живлення. При зміні частоти живлення змінюється частота обертання магнітного поля, а відповідно і частота обертання двигуна. При цьому, для досягнення стійкості крутного моменту напругу живлення двигуна необхідно змінювати у певній відповідності до частоти цієї напруги. При зниженні частоти напруга також має зменшитися, що викликає зменшення реактивного опору статора. Падіння напруги, а отже і частоти при заданому виді керування і викликане додатковим опором може досить суттєво зменшити напругу намагнічування двигуна, що призводить до зменшення крутного моменту у усьому робочому діапазоні частот обертання. Ця обставина викликає необхідність компенсації падіння напруги – додаткового намагнічування, що, у свою чергу, залежить від навантаження. Збільшення струму під час пуску може викликати надлишок намагніченості, що викликає зменшення струму статора та збільшення індукованої ЕРС. При цьому у двигуні буде продукуватися надлишковий

реактивний струм, що викличе його перегрів. Тому, параметри намагніченості залежить від здатності двигуна автоматично адаптуватися до зміни навантаження, що у свою чергу вимагає вибору оптимального співвідношення частоти та напруги [7].



1 – асинхронний двигун, 2 – випрямляч, 3 – шунтуючий резистор,
4 – імпульсний тиристорний ключ

Рисунок 1.1 – Ввімкнення керованого випрямляча у ланцюг ротора

1.2.2 Керування частотою обертання асинхронного двигуна за допомогою перетворювачів частоти

Застосування перетворювачів частоти у промислових масштабах розпочалося з середини XX століття, що у значній мірі було обумовлено розвитком напівпровідникових технології та зменшенням витрат на впровадження даної технології [8].

Загальною особливістю усіх перетворювачів частоти є те, що схеми управління використовують керуючі сигнали для ввімкнення або вимкнення напівпровідникових елементів, що складають основу інверторної схеми.

Основними складовими частинами перетворювачів частоти є (рис. 1.2) [9]:

- випрямляч (керований або некерований), що генерує пульсуючу постійну напругу і підключеного до мережі змінного струму,
- проміжний ланцюг (перетворюючий, стабілізуючий або перетворюючий),
- інвертор, що продукує необхідні значення частоти і напруги для живлення підключеного навантаження.
- схема управління.

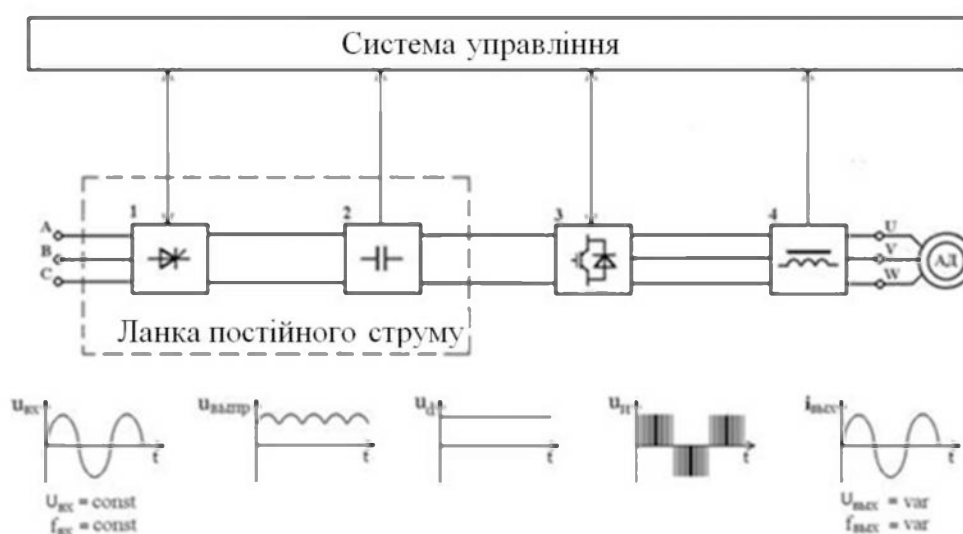


Рисунок 1.2 – Схема, що ілюструє принцип застосування перетворювача частоти

Напруга живлення являє собою змінну трифазну напругу з визначеною частотою. Випрямляч перетворювача частоти складається з напівпровідникових елементів, у якості яких виступають діоди та тиристори, сконфігурованих за певним порядком.

Випрямляч, що містить у своїй структурі некеровані діоди, називають «некерованим», а той, що складається з тиристорів – «керованим», комбіновані випрямлячі називають «напівкерованими».

Напівпровідникові елементи – діоди здатні пропускати струм лише в одному напрямку і не дають можливості його контролю. При проходженні через діодний елемент хвилі змінної напруги, вона перетворюється на пульсуючу постійну напругу (рис. 1.3) [10].

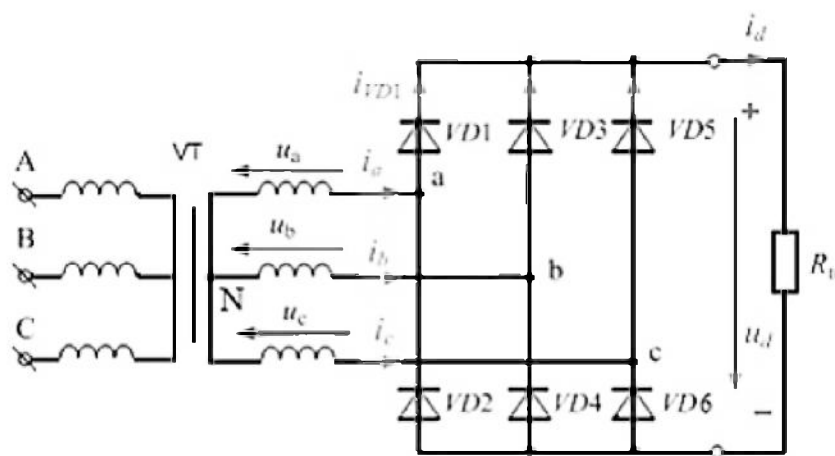


Рисунок 1.3 – Некерований трифазний випрямляч

Вихідна напруга некерованого випрямляча дорівнює різниці напруг двох груп діодів, а середнє значення пульсуючої постійної напруги становить 75% від значення напруги мережі (рис. 1.4) [10].

Робота керованих випрямлячів базується на напівпровідникових властивостях тиристорів. Тиристор також пропускає струм лише в одному напрямку, але, маючи у наявності додатковий керуючий порт, маємо змогу управляти роботою тиристора, а отже і пропусканням струму через нього. Недолік такого керування неможливість повернення тиристора у вихідний стан шляхом подачі управляючих сигналів, через керуючий порт [11].

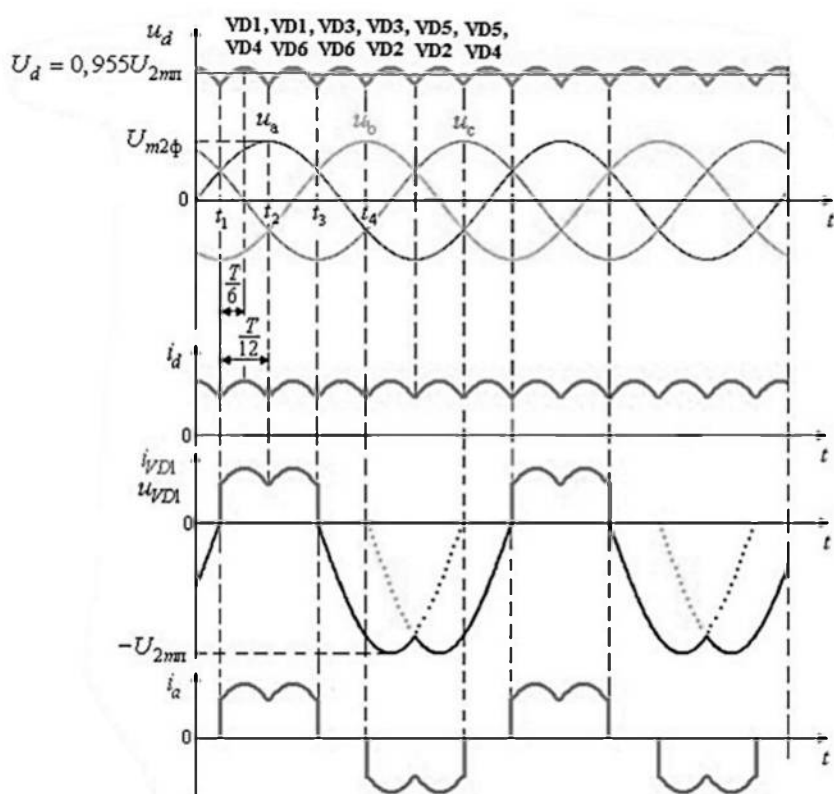


Рисунок 1.4 – Часові діаграми напруг і струмів некерованого трифазного випрямляч

Управляючий сигнал, що подається на керуючий порт, являє собою час відкриття тиристора (кут відкриття), який виражають у градусах, і яке вказує на затримку між станом спокою і режимом пропускання струму (рис. 1.5) [11].



Рисунок 1.5 – Режим роботи тиристора

У разі, коли значення кута відкриття коливається від 0 до 90° , тиристор повторює властивості діода. При зміні кута від 90 до 270° тиристор проявляє властивості інвертора (рис. 1.6) [12].

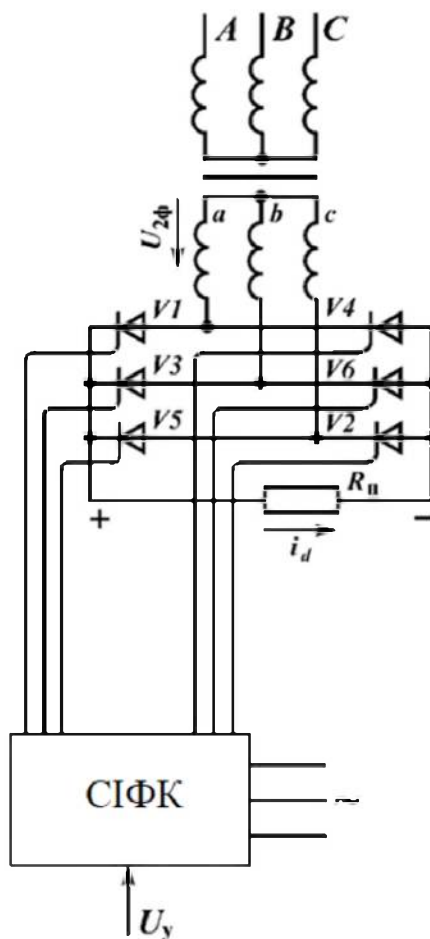


Рисунок 1.6 – Керований трифазний випрямляч на базі тиристорів

Режим роботи керованого випрямляча схожий з роботою випрямляча некерованого. Форми хвиль напруги трифазного керованого випрямляча при куті 30° наведено на рис. 1.7 [12].

Значення випрямленої напруги можна змінювати шляхом регулювання значення вказаного кута відкриття тиристора. У порівнянні з некерованим випрямлячем, керований випрямляч продукує більші втрати та збурення у живильній мережі (шляхом наведення вищих гармонік) через виникнення реактивних струмів.

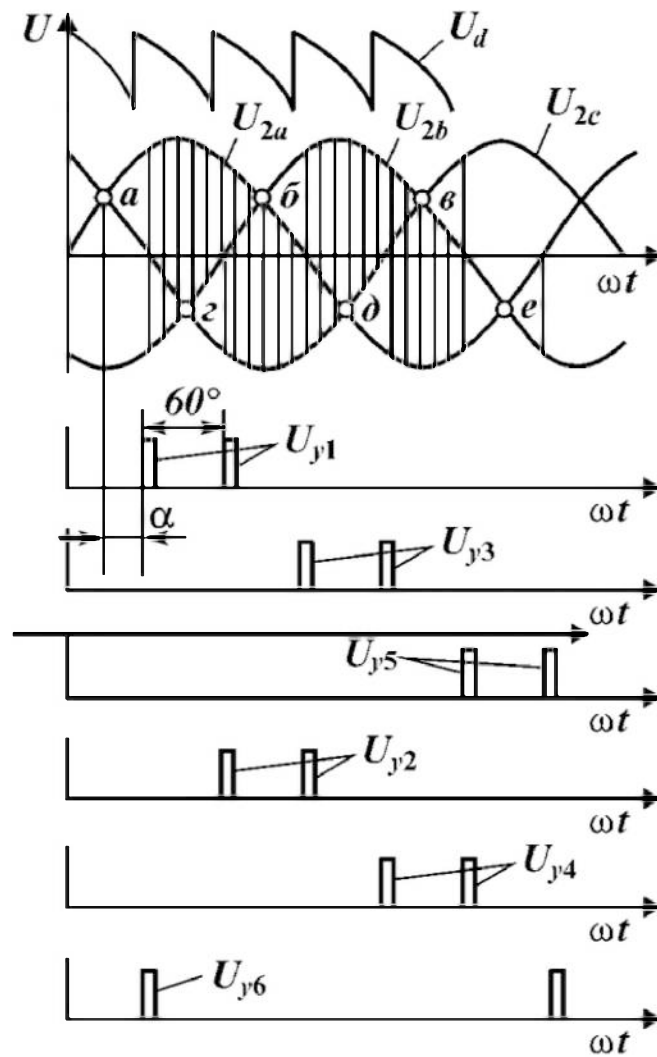


Рисунок 1.7 – Форми хвиль напруги трифазного керованого випрямляча при куті 60°

2 ПРИНЦИПИ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

2.1 Поняття про природні та штучні характеристики асинхронного двигуна

Найрозповсюдженішим методом керування роботою асинхронних приводів є частотне управління, що задовольняють найширшому спектру вимог до параметрів приводу [13].

Спосіб регулювання, який забезпечує постійність співвідношення напруги і частоти живлення (причому до уваги беруть їх скалярні величини), забезпечується шляхом одночасної зміни зазначених параметрів. Дана система реалізується шляхом зміни двох керуючих впливів – окремо на частоту і на амплітуду напруги живлення, що подається на статор двигуна. Зміна частоти відбувається незалежно від характеристик роботи двигуна, а значення напруги вибирається виходячи з вимог необхідного значення крутного моменту у відповідності до виду механічної характеристики електродвигуна. Регулювання такого виду називається базується на законі частотного регулювання, що визначається технологічними вимогами роботи конкретного приводу, об'єкта чи виконуваної ними роботи або технічного завдання [13].

Однією з найважливіших характеристик електричного двигуна є перевантажувальна здатність, яку можна розрахувати за формулою [13]:

$$\lambda = \frac{M_{\text{max доп.}}}{M_{\text{н}}} \quad (2.1)$$

де $M_{\text{max доп.}}$ – максимально допустимий крутний момент при обраному режимі роботи двигуна,

$M_{\text{н}}$ – номінальне значення крутного моменту двигуна.

Частотне регулювання повинно бути таким, щоб перевантажувальна здатність двигуна на всьому діапазоні роботи була постійною.

Закон управління, що базується на законі частотного регулювання вимагає виконання наступної вимоги [13]:

$$\frac{U}{f} = \text{const} \quad (2.2)$$

де U – величина напруги живлення, В,

f – частота напруги живлення, Гц.

Механічні характеристики асинхронного двигуна при визначеному законі управління показано на рис. 2.1 [14].

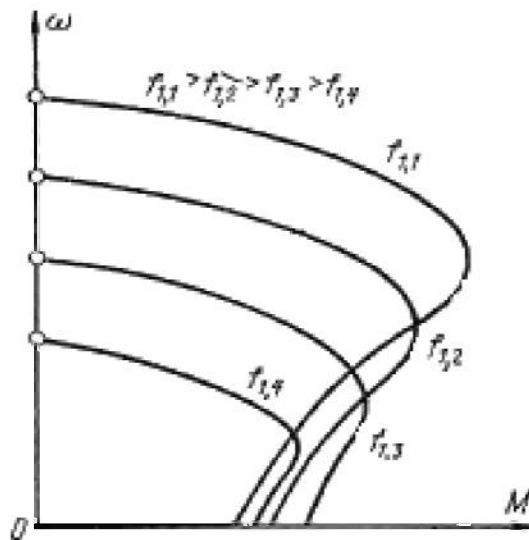


Рисунок 2.1 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при застосуванні закону частотного регулювання

Миттєві значення напруги і струму статора (U_s і I_s) подаються через випрямляч з перетворювача частоти. Значення напруги на активному опорі розраховується за формулою [13]:

$$E_a = U_s - I_s \cdot R_s \quad (2.3)$$

Розрахована величина напруги є вихідним значенням для її регулювання у перетворювачі. Вихідний сигнал формується пропорційно задаючому впливу – його рівню. Вихідний сигнал регулятора напруги задає напругу такою, щоб напруга за активним опором була пропорційна кутовій частоті обертання. Даний спосіб керування забезпечує сталість швидкості при збільшенні моменту опору та дозволяє отримати жорсткий вигляд електромеханічної характеристики, дає можливість плавного регулювання швидкості, дає змогу зберігати на постійному рівні критичний момент двигуна [13].

Сучасні перетворювачі частоти загальнопромислового призначення для управління асинхронними електричними двигунами змінного струму мають наступні властивості [15, 16]:

- регулювання відношення U/f у відповідності до режиму роботи асинхронного двигуна,
- можливість управління ковзанням,
- можливість регулювання швидкості,
- широкий діапазон зміни частоти,
- можливість застосування векторного і скалярного управління двигуном,
- реалізація функцій захисту двигуна,
- автоматичне налаштування режимів роботи двигуна.

Для впровадження принципів регулювання спочатку необхідно побудувати або мати у наявності природні характеристики – залежність частоти обертання від струму та частоти обертання від крутного моменту: $n = f(I)$ та $n = f'(M)$.

Природна механічна характеристика двигуна вимагає розрахунок значення критичного моменту, який можна визначити за залежністю [13]:

$$M_{\kappa} = \frac{3U_{\phi}}{2n_0 C_1 \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\kappa H}^2} \right)} \quad (2.4)$$

Для будови природної механічної характеристики двигуна задаються рядом значень ковзання (від 0 до 1) і розраховують значення крутного моменту [13]:

$$M(s) = \frac{2M_{\kappa} \cdot (1 + a \cdot s_{\kappa})}{\frac{s_{\kappa}}{s} + \frac{s}{s_{\kappa}} + 2 \cdot a \cdot s_{\kappa}} \quad (2.5)$$

де a – відношення опору статора до опору ротора,

При тих же значеннях ковзання розраховуємо частоту обертання за формулою [13]:

$$n(s) = n_0 \cdot (1 - s) \quad (2.6)$$

За отриманими по формулам (2.5) і (2.6) значеннями крутного моменту і частоти обертання будуюмо природну механічну характеристику асинхронного двигуна – рис. 2.3 [13].

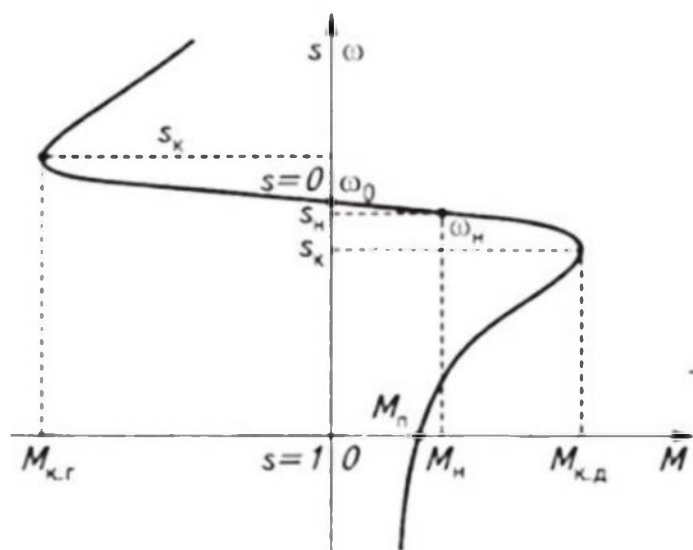


Рисунок 2.3 – Вигляд природної механічної характеристики асинхронного двигуна

Аналогічним чином будується природна електромеханічна характеристики двигуна показана на рис. 2.4 [13].

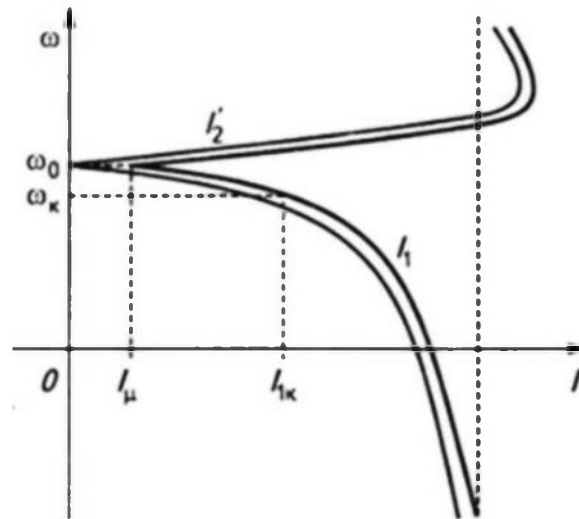


Рисунок 2.4 – Вигляд природної електромеханічної характеристики асинхронного двигуна

При частотному регулюванні, що характеризується відношенням $U/f = \text{const}$, відбувається зміна природної характеристики і отримують штучні характеристики асинхронного двигуна – рис. 2.5, 2.6 [13].

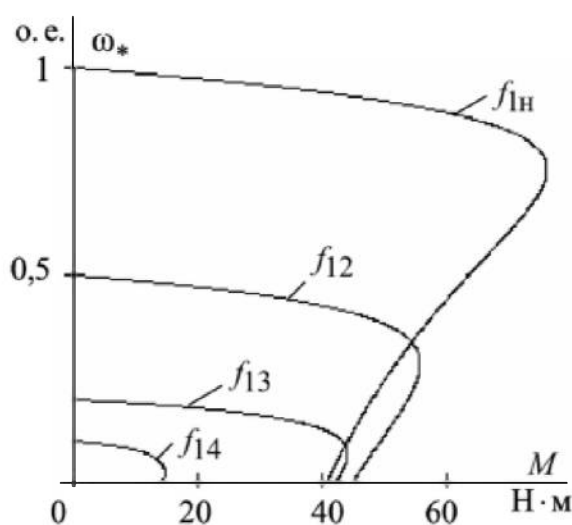


Рисунок 2.5 – Вигляд штучних механічних характеристик асинхронного двигуна

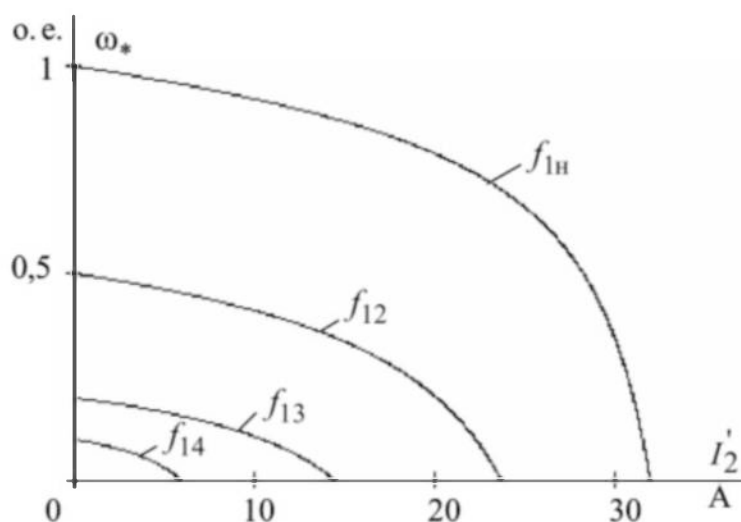


Рисунок 2.6 – Вигляд штучних електромеханічних характеристик асинхронного двигуна

2.2 Огляд проблемних питань при прямому пуску асинхронного двигуна

Прямий пуск асинхронного двигуна часто досить негативно відображається на його функціонуванні – це може призвести до зниження напруги та збільшених навантажень від моменту опору [17].

Неконтрольований запуск може також призвести до спрацювання реле контролю напруги або температурного реле, що призводить до хибних відключень. Це викликає необхідність регулювання значення крутного моменту у залежності від навантаження на валу двигуна. Для реалізації зазначеного положення використовують пристрої що працюють на основі силових напівпровідникових приладів. З іншого боку, у разі недовантаження асинхронного двигуна змінного струму витрачається більше енергії, а означений надлишок виділяється у вигляді тепла. Цю проблему можна також вирішити за допомогою застосування контролерів, що контролюють амплітудні значення пускових струмів і дозволяють

економити енергію протягом всього періоду пуску. Застосування систем плавного пуску асинхронних двигунів дозволяє подавати номінальну напругу протягом всього періоду пуску, паралельно збільшуючи втрати у мідних обмотках статора та викликають виникнення небажаних вищих гармонік струму [17].

Найпростішим способом зниження пускових струмів є використання послідовно включених резисторів, які зменшують значення напруги, що подається, внаслідок розсіювання певної частини енергії на цих резисторах (рис. 2.7) [18].

Використання цього способу вимагає застосування схеми керування з замикаючою групою контактів реле при «виході» двигуна на робочий режим. Основний недолік даного способу – значні непродуктивні втрати енергії.

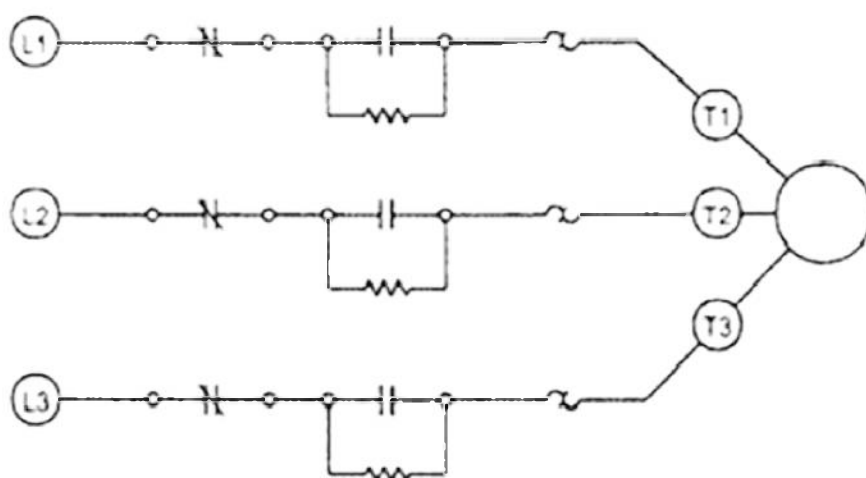


Рисунок 2.7 – Реалізація схеми плавного пуску з використанням резисторів у ланцюзі статора

Іншим способом забезпечення плавності пуску є використання автотрансформаторів, який забезпечує можливість управління живленням двигуна шляхом подачі ступеней зниженої напруги (зазвичай на рівні 50, 60, 70, 80%) – рис. 2.8 [18].

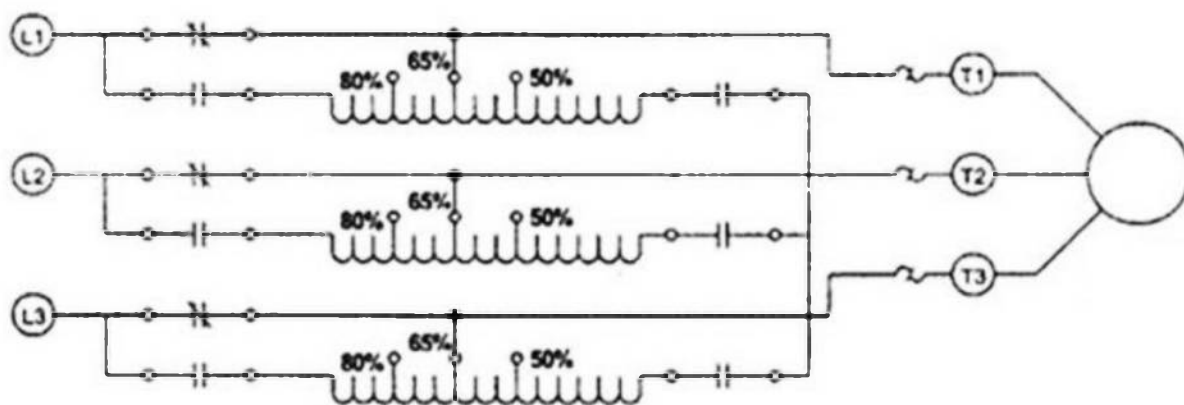


Рисунок 2.8 – Реалізація схеми плавного пуску з використанням автотрансформаторів

Ще одним з розповсюджених способів пуску асинхронних двигунів на знижених параметрах струму є переключення обмоток статора двигуна з «трикутника» на «зірку», а при досягненні певної частоти – назад на «трикутник» (рис. 2.9) [18].

Під час пуску на підключення «зіркою», на статорні обмотки двигуна подається менше значення напруги, а, отже, і зменшення пускового струму.

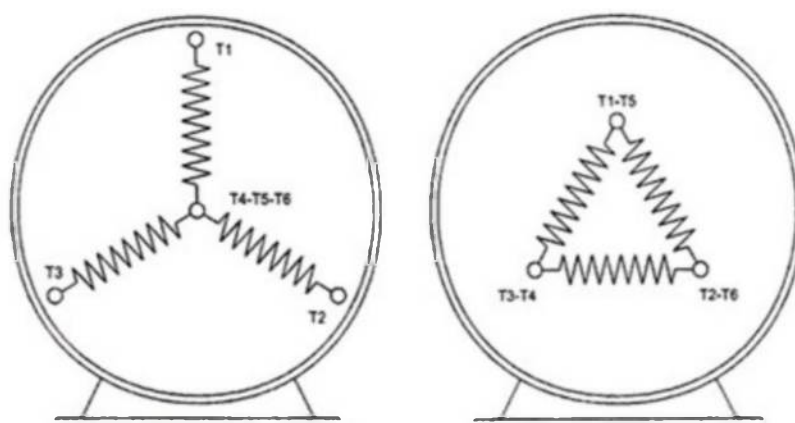


Рисунок 2.9 – Реалізація плавного пуску шляхом перемикання з «трикутника» на «зірку»

Новітні системи плавного пуску усувають виникнення небажаних коливань, підтримують можливе максимальне значення коефіцієнту

корисної дії та зменшуючи втрати у обмотках статора. Регулювання крутного моменту повинно бути здійснено паралельно з обмеженням пускового струму протягом пускового періоду для забезпечення його плавності. Задане регулювання можна здійснити за допомогою інвертора, який для зменшення значення пускового струму змінює значення напруги, що живить статор двигуна. Зазначені інвертори являють собою електричні пристрої, що мають змогу керувати двигунами змінного струму для забезпечення плавності їх пуску, зупинки та підтримання високої ефективності (високого значення ККД) роботи системи та виконувати елементарний захист. Основними компонентами інверторів для плавного пуску є силові напівпровідники із зовнішніми ланцюгами управління. Вони працюють за принципом регулювання куту відкриття напівпровідникових елементів, у якості яких виступають тиристори, біполярні та польові транзистори з ізольованим затвором, що змінює значення напруги, яка подається на статорні обмотки двигуна [19].

Силові напівпровідникові пристрої, що використовуються для плавного пуску виключає необхідність механічних передач. Перші здійснюють контроль процесу прискорення двигуна шляхом контролю електромеханічних параметрів – напруг, струмів, частоти обертання та крутного моменту двигуна.

На рис. 2.10 показано схему включення силових тиристорів, включених паралельно, у ланцюг статора асинхронного двигуна, яка дозволяє здійснити плавний пуск шляхом повільного прискорення [18].

Застосування схем плавного пуску зменшують перегрівання обмоток двигуна, а також витоків струму у фазах, що призводить до дисбалансу роботи двигуна, а також захищають останні від перевантаження.

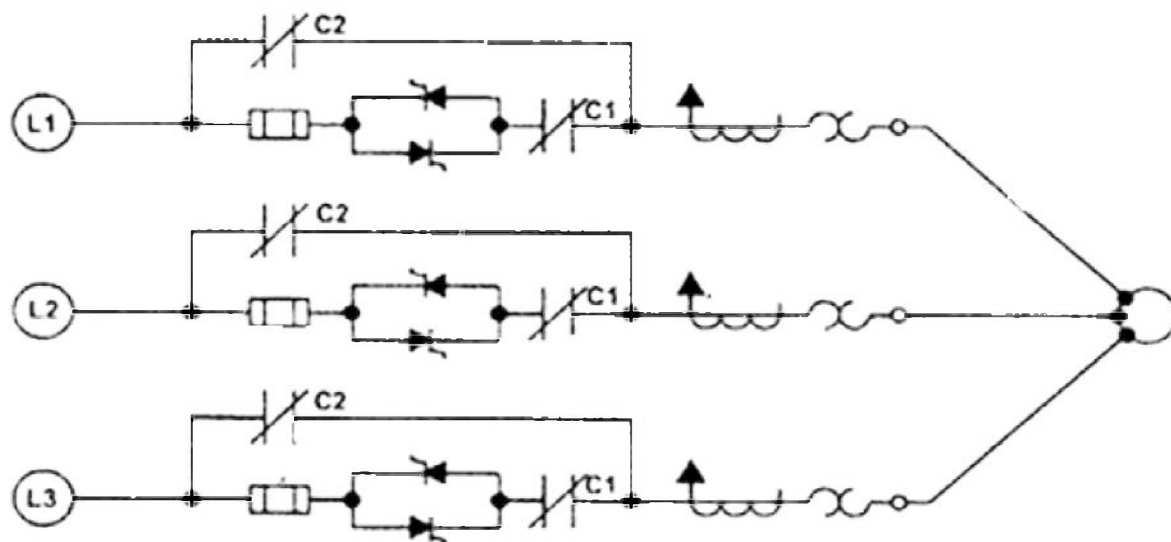


Рисунок 2.10 – Схема попарного включення тиристорів у фазах статорної обмотки асинхронного двигуна

З ОГЛЯД МЕТОДОЛОГІЇ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ РЕГУЛЬОВАНИХ ПРИВОДІВ

У основі розробки перетворювачів потужності завжди знаходяться досягнення якомога високого значення ККД, низька вартість проектування, облаштування та обслуговування [20].

Вимога поліпшення якості регулювання вихідних струмів перетворювача потребує доступних і не дорогих технічних рішень можливих до впровадження. Найкращим для перетворювачів є положення, коли на виході маємо синусоїдну форму напруг і струмів, не дивлячись на обов'язковість даної умови [21].

Надійність роботи електричного приводу залежить від умов його експлуатації та початкових нормованих вимог до застосованих компонентів.

У трифазних перетворювачах для приводів з асинхронними двигунами застосовують дворівневі широтно-імпульсні модулятори (ШІМ) напруги з шестиімпульсним діодним і усе завдяки їх простоті та відносно невисокій вартості. Не дивлячись на одноманітність облаштування перетворювачів частоти існує багате різноманіття їх конструкцій. Суттєвим недоліком даної схеми є виникнення низькочастотних гармонік у ланцюгах постійного та змінного струму, що вимагає застосування спеціальних фільтруючих пристроїв [21].

На рис. 3.1 наведено схему перетворювача, який використовує режим підсилення після перетворення у режимі переривчастої провідності у ланцюзі постійного струму з використанням діодного моста та контролю вхідних струмів і рівня напруги постійного струму.

Режим переривчастої провідності забезпечує постійний контроль лінійних струмів у всіх фазах і забезпечує кращу форму хвилі, близької до синусоїдної. Висока пульсація струмів вимагає застосування

напівпровідникових приладів з високими технологічними показниками роботи [22].

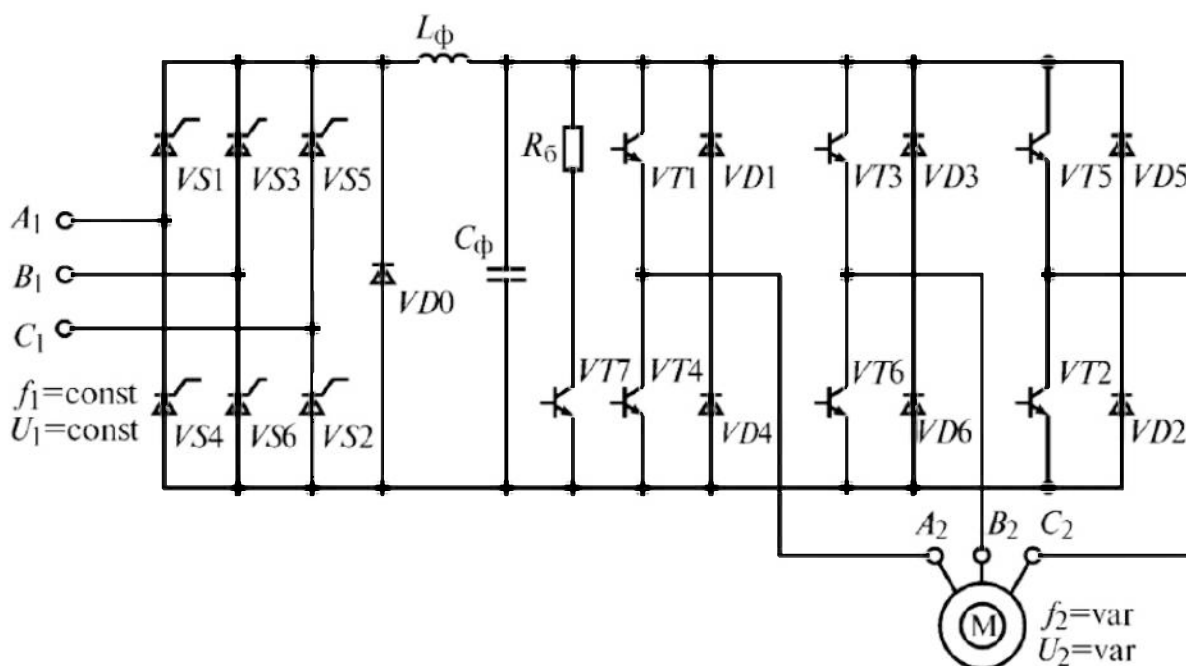


Рисунок 3.1 – Схема перетворювача змінного струму з підсилювачем постійного струму

У порівнянні з традиційними схемами дана система має один додатковий активний вимикач і один діод живлення. Для досягнення переривчастої провідності індуктивність котушок необхідно вибрати меншого значення у порівнянні з перетворювачами з використанням режимів безперервної провідності. Для пом'якшення характеристик роботи схеми до неї включено біполярний транзистор з ізольованим затвором, який відновлює стан підсилувального діода. Коефіцієнт передачі імпульсного перетворювача відповідає за більш високе значення опорної напруги у ланцюзі постійного струму.

Випрямляч, представлений на рис. 3.2, містить три групи біполярних транзистори з ізольованим затвором, які керують значеннями струмів у трифазній мережі. Застосовані фільтруючі елементи котушок мають індуктивності, що сприяють нижчим значенням номінальної напруги у

порівнянні з дворівневими випрямлячами на базі широтно-імпульсної модуляції [22].

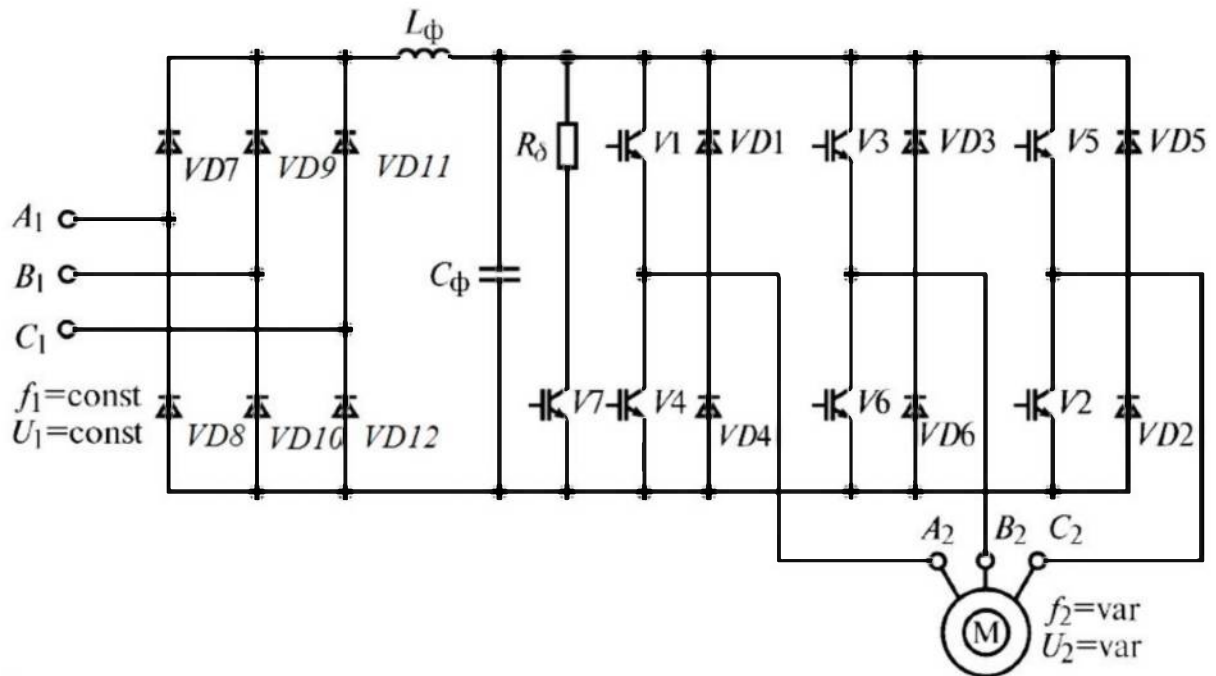


Рисунок 3.2 – Схема перетворювача змінного струму з трьома групами біполярних транзисторів з ізолюваним затвором

Втрати у даному пристрої на напівпровідникових елементах досить великі, оскільки струм кожного разу проходить значний шлях через зазначені елементи. Але маємо можливість незалежного керування струмом по кожній фазі окремо, шляхом відповідного ввімкнення та/або вимкнення відповідних транзисторів. Значення вхідних струмів у ланцюгах даної схеми мають синусоїдну форму з низьким значенням коефіцієнту затримки при номінальному значенні потужності двигуна. При цьому досягається повна компенсація впливів незбалансованих напруг на якість вхідного струму.

Трирівневий випрямляч на основі широтно-імпульсної модуляції, з використанням двонаправленого принципу перемикання, побудовано на тій же елементній базі, але за принципом зворотного блокування біполярних транзисторів (рис. 3.3) [23].

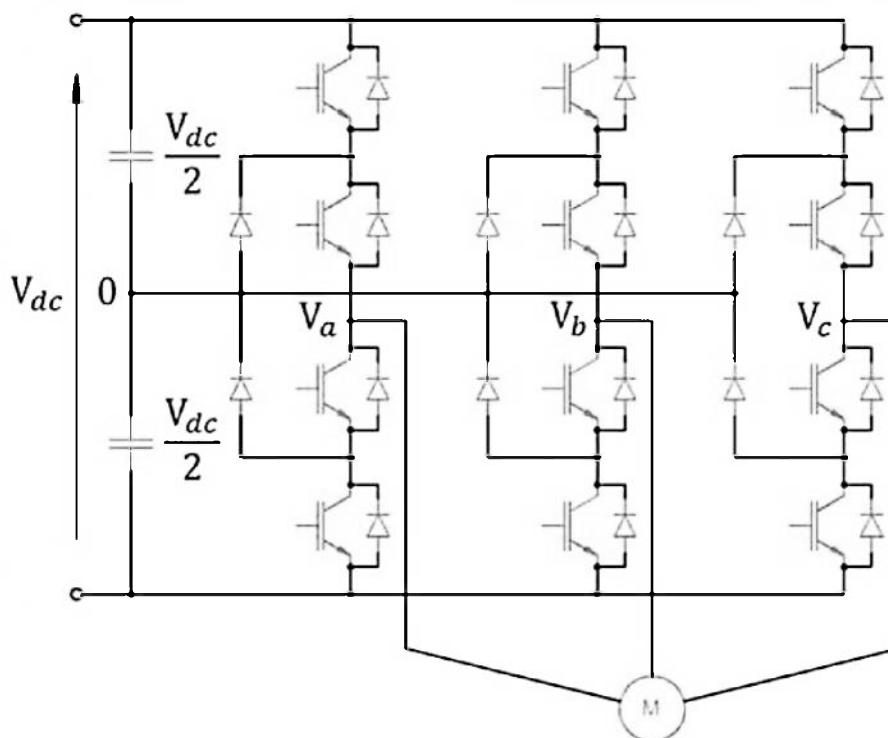


Рисунок 3.3 – Схема трирівневого випрямляча на основі широтно-імпульсної модуляції, з використанням двонаправленого принципу перемикавання

Дана схема дозволяє знизити споживання енергії на напівпровідниках у порівнянні з попередньою схемою. Вхідні струми також мають синусоїдну форму та низьке значення коефіцієнту струму при номінальній потужності. Здійснюючи повний контроль стану фронтального каскаду можна повністю компенсувати вплив незбалансованої подачі напруги на якість вхідного струму, хоча це і призводить до пульсацій напруги постійного струму.

Трифазний перетворювач, підключений безпосередньо до ланцюга постійного струму, зображено на рис. 3.4. Він складається з трифазного перетворювача та ланцюга постійного струму. Для зменшення пульсацій вхідного струму застосовано індуктивно-ємнісний фільтр. Для отримання належного розподілу постійного значення вихідної потужності та забезпечення синусоїдної форми хвиль напруги і струму, необхідна

одночасна робота ланцюга постійного струму та належної роботи циклу випрямлення у періоди комутації [24].

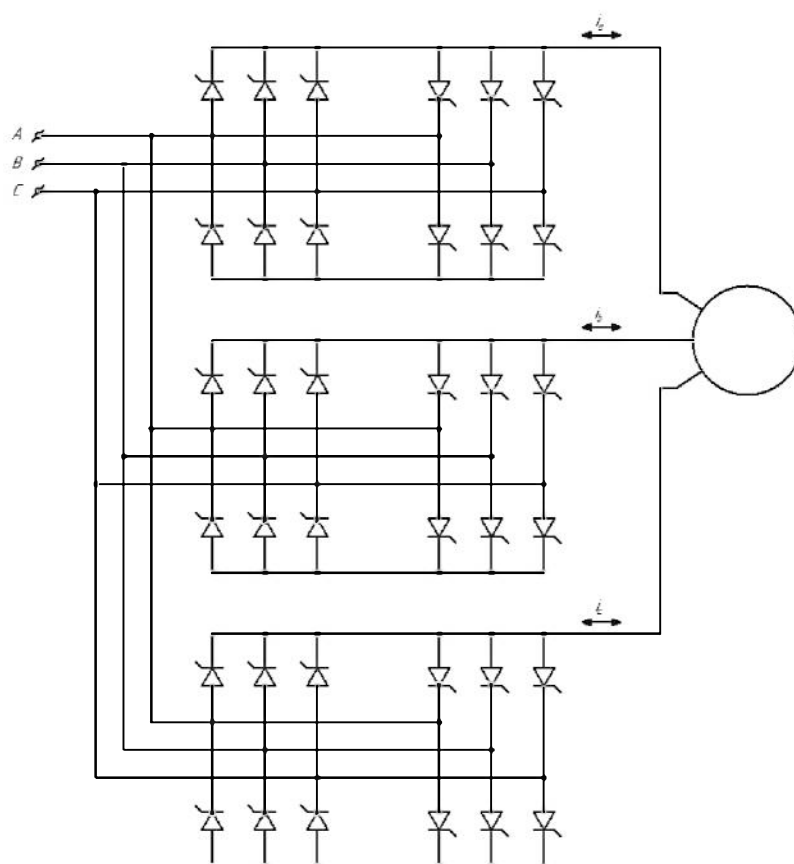


Рисунок 3.4 – Схема трифазного перетворювача

Паралельна гілка, що складається з діода та конденсатора, забезпечує вільний шлях для струмів, що продукується індуктивним навантаженням при вимкненні перетворювача. Вимога отримання синусоїдної форми напруги обмежує значення коефіцієнту підсилення. Трифазні перетворювачі, що використовуються у якості випрямлячів забезпечують низькі значення пульсації напруги та зменшити вимоги до властивостей фільтруючих елементів та комутаційних пристроїв через знижені значення напруг порівняно з двофазним випрямлячем, а також він виконує перемикання з більшою швидкістю, що також призводить до зменшених втрати на перемикання.

Схема трифазного перетворювача зі зворотним зв'язком представлено на рис. 3.5. До складу даного підсилювального перетворювача на початковому етапі відбувається випрямлення напруги та через проміжну ланку постійного струму надходить до стандартного блоку, складених з біполярних транзисторів. Для зменшення пульсацій вхідного струму використовується індуктивно-ємнісний вхідний фільтр [25].

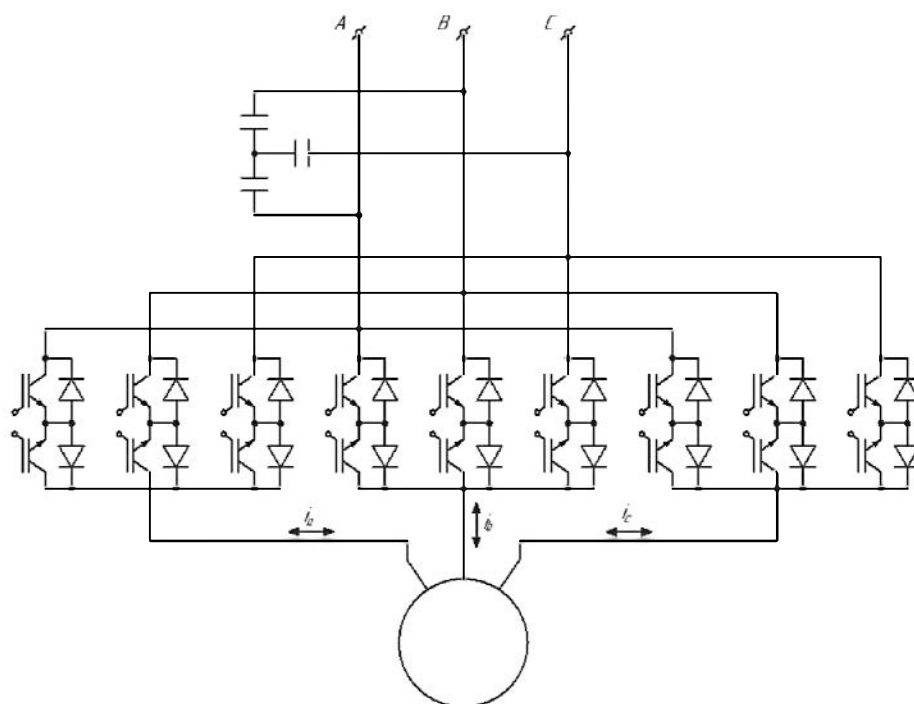


Рисунок 3.4 – Схема трифазного перетворювача зі зворотним зв'язком

Ефективність застосування є досить низькою при тому, що маємо змогу забезпечити високі значення коефіцієнту потужності при наявності двонаправленого потоку потужності. Ці властивості можна використати для покращення динамічної реакції приводів.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ПРИВОДАХ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

4.1 Моделювання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у програмному середовищі Mathcad

Математичне моделювання електромеханічних пристроїв і систем є досить прогресивним способом їх дослідження. Результати такого моделювання можуть бути використані і при проектуванні і при експлуатації означених пристроїв [26, 27].

Моделювання можна «прикладати» до цілої електромеханічної системи та її окремих складових. У залежності від поставленої мети можна підібрати різноманітні методи аналізу систем та її елементів [26, 27].

У теперішній час при створенні моделей різноманітних електричних і механічних пристроїв широко застосовують прикладні програми Matlab і Mathcad, які дозволяють реалізувати зв'язки, притаманні роботі даних пристроїв [28].

Принцип моделювання полягає у розробці моделі об'єкта, що розглядається, шляхом програмної реалізацією алгоритмів її роботи за умови її адекватної поведінки.

Моделювання з визначеним ступенем точності дозволяє робити певні припущення, що не впливають на кінцевий результат поведінки створеної моделі. Для моделі асинхронного двигуна можна зробити наступні «послаблення» [29]:

- магнітне поле обмоток статора і ротора складається з поля розсіювання та взаємної індукції,
- взаємна індукція розподіляється по синусоїдному закону,
- силові лінії поля взаємної індукції формують загальний потік взаємної індукції з обома контурами двигуна,
- втрати у конструктивних елементах двигуна відсутні.

Асинхронний двигун можна являє собою систему обмоток (статорних і роторних), що мають магнітний зв'язок. Обмотки ротора обертаються навколо обмоток статора з кутовою швидкістю ω_r (рис. 4.1) [30].

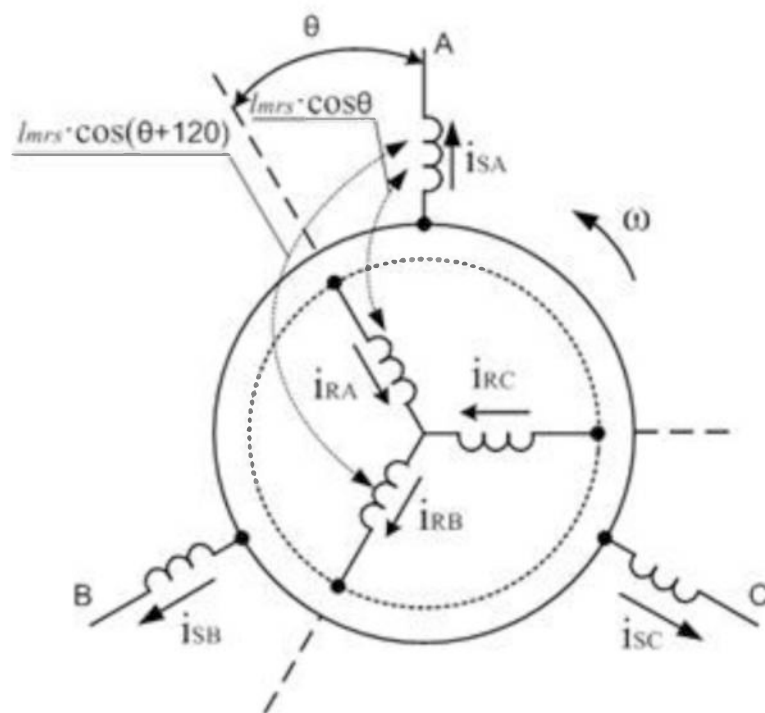


Рисунок 4.1 – Схема, що ілюструє роботу трифазного асинхронного двигуна

Широке використання у технологічних приводах асинхронних двигунів вимагає досконалості знань про параметри їх роботи у залежності від ступені завантаженості та їх фактичного фізичного стану.

У якості зовнішніх впливів можуть бути процеси включення та виключення потужних двигунів, зміна навантаження, порушення режиму роботи, аварійні режими і т.п. При даних умовах виникають перехідні процеси, які хоч і мають короткочасний характер мають досить суттєвий вплив на міжремонтні цикли роботи двигунів та загальну надійність і ефективність їх роботи [30].

Для визначення параметрів цих комутаційних процесів досить цікавим може стати створення математичної та/чи комп'ютерної моделі.

творена модель дозволить здійснити не тільки опис процесів, що протікають, але і отримати інформацію про поточний стан двигуна.

Одним з гарних прикладних програмних середовищ для створення моделі є Mathcad. На початковому етапі необхідно задатись початковими умовами, що відображають параметри (електричні, механічні, магнітні) обраного для дослідження двигуна [31].

Створення моделі вимагає складання заступної схеми асинхронного двигуна, яка дозволяє певним чином поєднати у одній електричній схемі обмоток ротора і обмоток статора (рис. 4.2), а параметри заступної схеми наведено у табл. 4.1 [32].

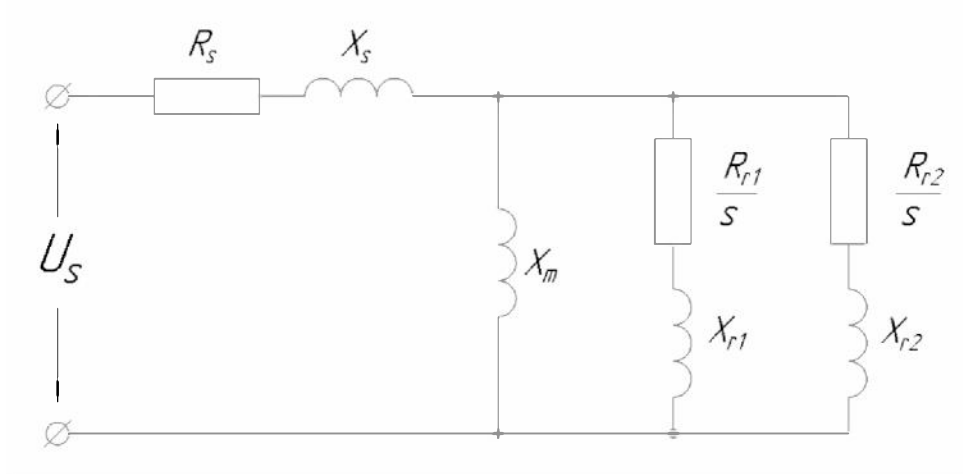


Рисунок 4.2 – Заступна схема асинхронного двигуна

За заступною схемою розрахуємо провідність за формулою [32]:

$$Y_{ss} = [(R_s + i \cdot X_s) + \left(\frac{1}{\frac{R_{r1} \cdot 100}{X_s} + i \cdot X_{r1}} + \left(\frac{1}{\frac{R_{r2} \cdot 100}{X_s} + i \cdot X_{r1}} + \frac{1}{i \cdot X_m} \right)^{-1} \right)^{-1}]^{-1} \quad (4.1)$$

Таблиця 4.1 – Параметри заступної схеми асинхронного двигуна

Параметр	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення параметра
Номінальна потужність	P	кВт	400
Напруга живлення	U	В	6000
Активний опір обмотки статора	R_S	Ом	0,00955
Реактивний опір обмотки статора	X_S	Ом	$0,0555+0,035i$
Опір для реалізації зв'язку	X_m	Ом	2,35
Активний опір обмотки ротора 1	R_{r1}	Ом	0,0222
Реактивний опір обмотки ротора 1	X_{r1}	Ом	0,2155
Активний опір обмотки ротора 2	R_{r2}	Ом	0,268
Реактивний опір обмотки ротора 2	X_{r2}	Ом	0,357
Коефіцієнт потужності	$\cos(\varphi)$	—	0,85
ККД	η	—	0,94

Обертальний момент розрахуємо за формулою [32]:

$$m_{ss} = \frac{\left(Re\left(\frac{1}{Y_{ss}}\right) - R_s \right) \cdot (|Y_{ss}|)^2}{\eta \cdot \cos(\varphi)} \quad (4.2)$$

Складемо диференційне рівняння асинхронного двигуна за допомогою програмного середовища Mathcad [33]:

$$\mathbf{D}(\mathbf{t}, \mathbf{x}) := \begin{bmatrix} (a_s - 1) \cdot \alpha_s \cdot x_1 + a_{r1} \cdot \alpha_s \cdot x_2 + a_{r2} \cdot \alpha_s \cdot x_3 + U_m \cdot \cos(t) \\ a_s \cdot \alpha_{r1} \cdot x_1 + (a_{r1} - 1) \cdot \alpha_{r1} \cdot x_2 + a_{r2} \cdot \alpha_{r1} \cdot x_3 - x_7 \cdot x_5 \\ a_s \cdot \alpha_{r2} \cdot x_1 + a_{r1} \cdot \alpha_{r2} \cdot x_2 + (a_{r2} - 1) \cdot \alpha_{r2} \cdot x_3 - x_7 \cdot x_6 \\ (a_s - 1) \cdot \alpha_s \cdot x_4 + a_{r1} \cdot \alpha_s \cdot x_5 + a_{r2} \cdot \alpha_s \cdot x_6 + U_m \cdot \sin(t) \\ a_s \cdot \alpha_{r1} \cdot x_4 + (a_{r1} - 1) \cdot \alpha_{r1} \cdot x_5 + a_{r2} \cdot \alpha_{r1} \cdot x_6 + x_7 \cdot x_2 \\ a_s \cdot \alpha_{r2} \cdot x_4 + a_{r1} \cdot \alpha_{r2} \cdot x_5 + (a_{r2} - 1) \cdot \alpha_{r2} \cdot x_6 + x_7 \cdot x_3 \\ \frac{1}{G} \cdot [X_s^{-1} \cdot [-x_1 \cdot (a_s \cdot x_4 + a_{r1} \cdot x_5 + a_{r2} \cdot x_6) + x_4 \cdot (a_s \cdot x_1 + a_{r1} \cdot x_2 + a_{r2} \cdot x_3)] - mc(t)] \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

де розрахункові коефіцієнти дорівнюють:

$$\alpha_s = X_s^{-1} \cdot R_s \quad (4.4)$$

$$\alpha_{r1} = X_{r1}^{-1} \cdot R_{r1} \quad (4.5)$$

$$\alpha_{r2} = X_{r2}^{-1} \cdot R_{r2} \quad (4.6)$$

$$X_{sr} = (X_m^{-1} + X_s^{-1} + X_{r1}^{-1} + X_{r2}^{-1})^{-1} \quad (4.7)$$

$$a_s = X_s^{-1} \cdot X_{sr} \quad (4.8)$$

$$a_{x1} = X_{r1}^{-1} \cdot X_{sr} \quad (4.9)$$

$$a_{x2} = X_{r2}^{-1} \cdot X_{sr} \quad (4.10)$$

Програмне середовище Mathcad дозволяє скласти розрахунку формулу для визначення режимів роботи асинхронного двигуна [33]:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F} := & \left| \begin{array}{l}
 t \leftarrow 0 \\
 \mathbf{x}_1 \leftarrow \mathbf{x} \\
 h \leftarrow 0.314 \\
 \text{for } i \in 1..5500 \\
 \quad \mathbf{Z} \leftarrow \text{rkfixed}(\mathbf{x}_1, t, t+h, 1, \mathbf{D}) \\
 \quad \text{for } j \in 1..7 \\
 \quad \quad \mathbf{x}_{1j} \leftarrow \left[\left[((\mathbf{Z}))^{\mathbf{T}} \right]^{\langle 2 \rangle} \right]_{-j+1} \\
 \quad \quad \mathbf{Is}_1 \leftarrow (\mathbf{x}_{11} - \mathbf{a}_s \cdot \mathbf{x}_{11} - \mathbf{a}_{r1} \cdot \mathbf{x}_{12} - \mathbf{a}_{r2} \cdot \mathbf{x}_{13}) \cdot \mathbf{X}_s^{-1} \\
 \quad \quad \mathbf{Is}_2 \leftarrow (\mathbf{x}_{14} - \mathbf{a}_s \cdot \mathbf{x}_{14} - \mathbf{a}_{r1} \cdot \mathbf{x}_{15} - \mathbf{a}_{r2} \cdot \mathbf{x}_{16}) \cdot \mathbf{X}_s^{-1} \\
 \quad \quad \mathbf{Ia}_i \leftarrow \mathbf{Is}_1 \\
 \quad \quad \mathbf{Ib}_i \leftarrow \frac{\mathbf{Is}_1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \mathbf{Is}_2 \\
 \quad \quad \mathbf{Ic}_i \leftarrow \frac{\mathbf{Is}_1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \mathbf{Is}_2 \\
 \quad \quad \mathbf{Is}_i \leftarrow \sqrt{(\mathbf{Is}_1)^2 + (\mathbf{Is}_2)^2} \\
 \quad \quad \mathbf{M}_i \leftarrow \frac{-\mathbf{x}_{11} \cdot (\mathbf{a}_s \cdot \mathbf{x}_{14} + \mathbf{a}_{r1} \cdot \mathbf{x}_{15} + \mathbf{a}_{r2} \cdot \mathbf{x}_{16}) + \mathbf{x}_{14} \cdot (\mathbf{a}_s \cdot \mathbf{x}_{11} + \mathbf{a}_{r1} \cdot \mathbf{x}_{12} + \mathbf{a}_{r2} \cdot \mathbf{x}_{13})}{\mathbf{X}_s} \\
 \quad \quad \mathbf{P}_i \leftarrow \mathbf{Is}_1 \cdot \mathbf{Um} \cdot \cos(t) + \mathbf{Is}_2 \cdot \mathbf{Um} \cdot \sin(t) \\
 \quad \quad \mathbf{Q}_i \leftarrow \mathbf{Is}_1 \cdot \mathbf{Um} \cdot \sin(t) - \mathbf{Is}_2 \cdot \mathbf{Um} \cdot \cos(t) \\
 \quad \quad \omega_i \leftarrow \mathbf{x}_{17} \\
 \quad \quad t \leftarrow t + h \\
 \quad \quad \tau_i \leftarrow t
 \end{array} \right| \\
 & \left(\begin{array}{c}
 \mathbf{Ia} \\
 \mathbf{Ib} \\
 \mathbf{Ic} \\
 \mathbf{M} \\
 \omega \\
 \mathbf{Is} \\
 \mathbf{Q} \\
 \mathbf{P} \\
 \mathbf{0}
 \end{array} \right)
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

За формулою (4.11) здійснюємо розрахунки для режиму пуску асинхронного двигуна і представимо їх вигляді графіків – рис. 4.3 – 4.9 [33].

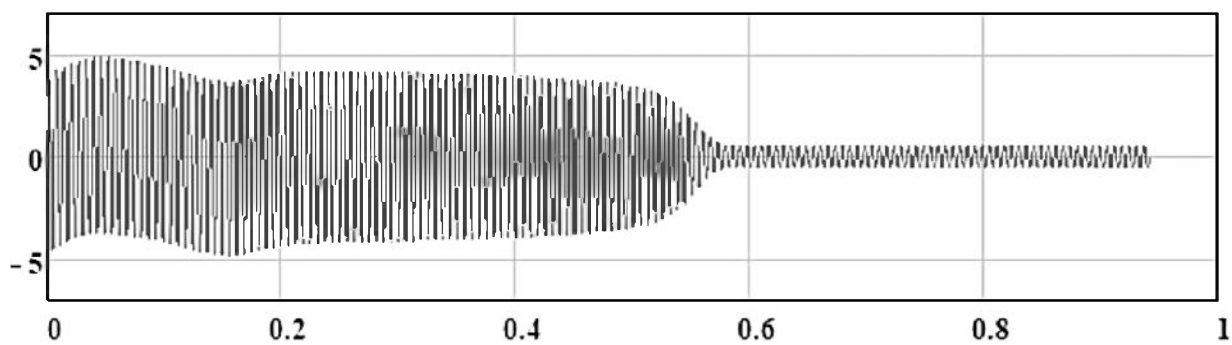


Рисунок 4.3 – Графік зміни струму статора у фазі А

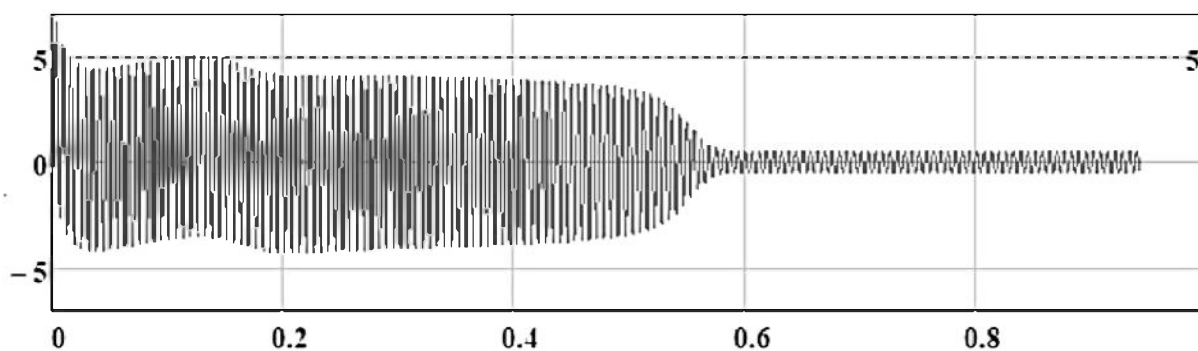


Рисунок 4.4 – Графік зміни струму статора у фазі В

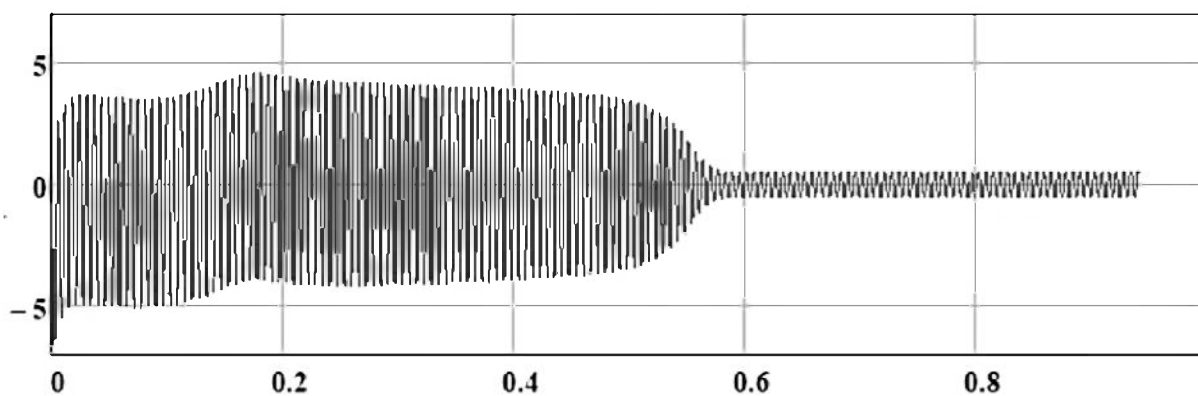


Рисунок 4.5 – Графік зміни струму статора у фазі С

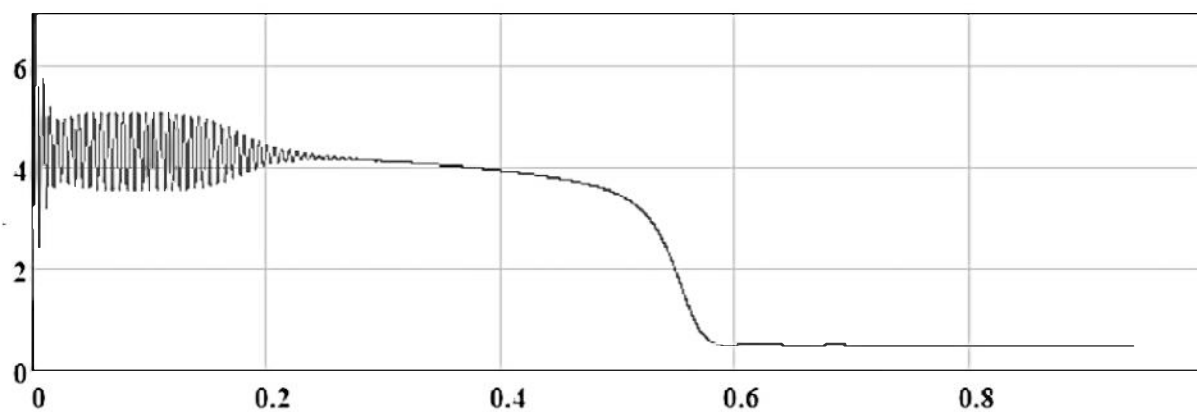


Рисунок 4.6 – Графік зміни модуля узагальненого вектора струму статора

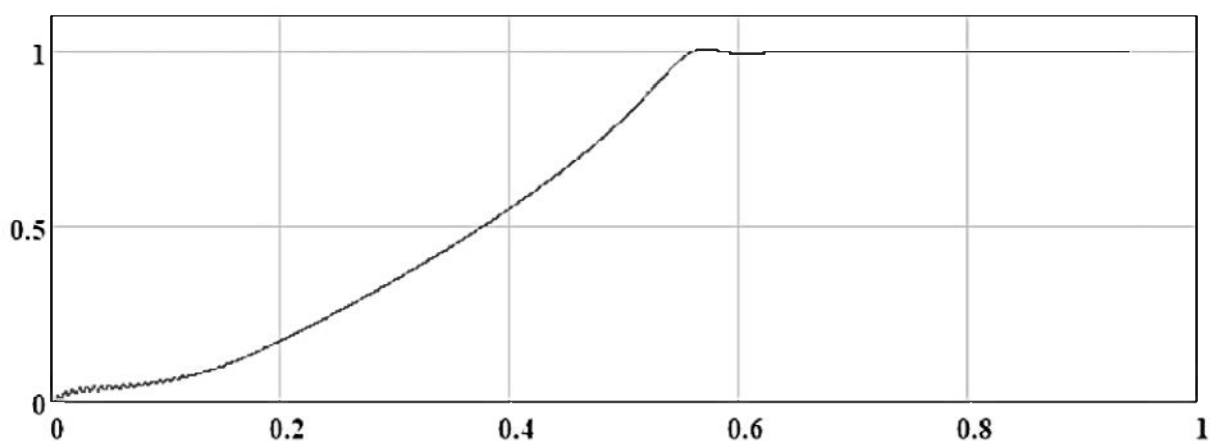


Рисунок 4.7 – Графік зміни кутової швидкості обертання ротора

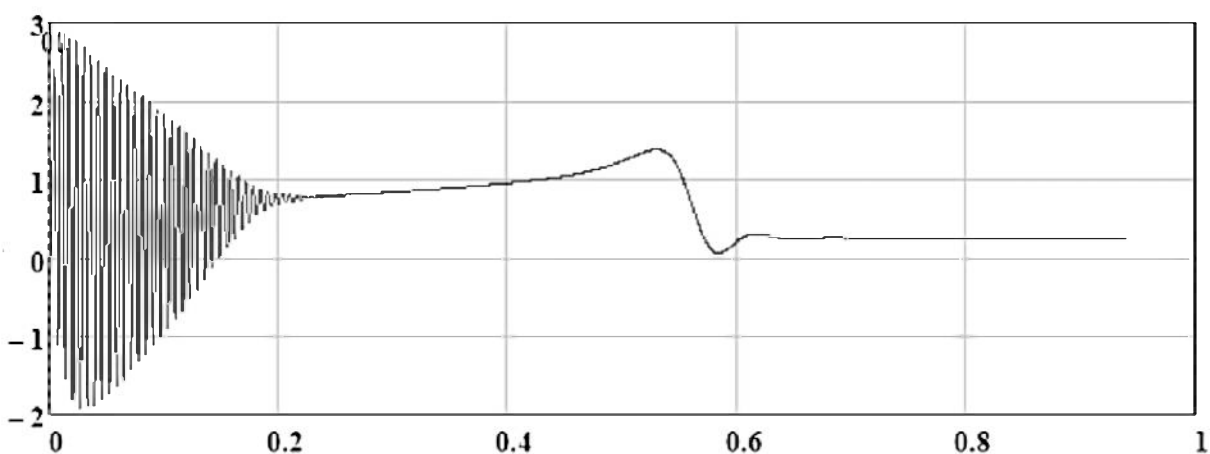


Рисунок 4.8 – Графік зміни крутного моменту двигуна

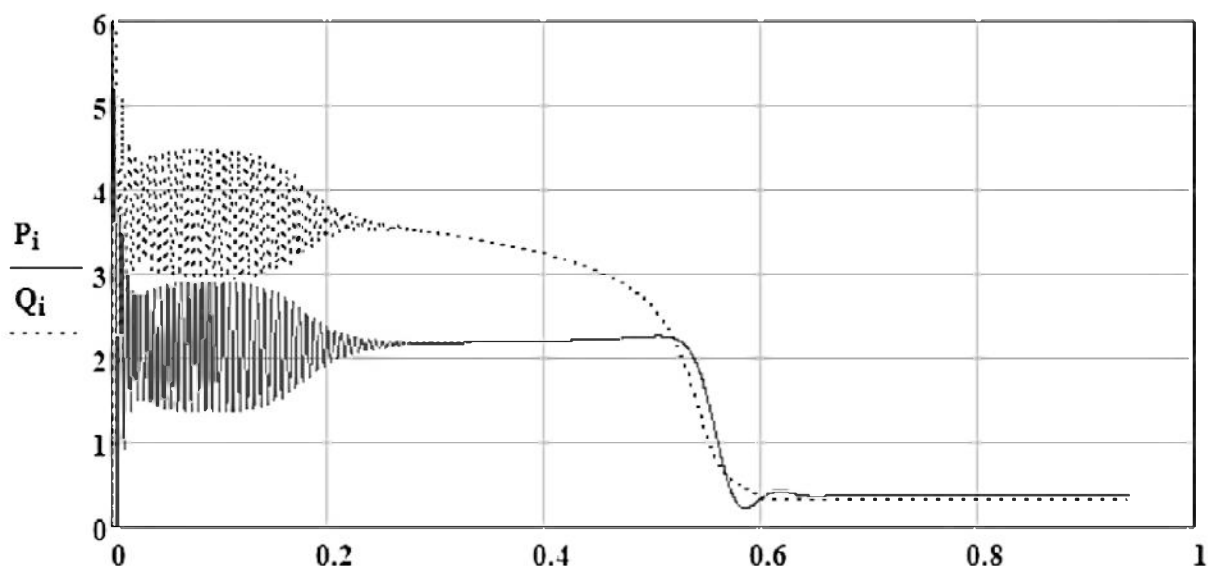


Рисунок 4.9 – Графік зміни споживання активної (P_i) та реактивної (Q_i) потужності

Розроблена математична модель асинхронного двигуна у програмному середовищі Mathcad дозволяє дослідити пускові режими у залежності від параметрів обраного для дослідження об'єкта. Результати для наочності можна представити у вигляді графіків, за якими можна аналізувати зміну основних характеристичних параметрів.

Для кожного конкретного двигуна матимемо різні початкові дані, а створена модель є універсальною і може бути застосована при дослідженні живлення від трифазного джерела з синусоїдною формою напруги при сталих режимах роботи двигуна.

4.2 Моделювання роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у програмному середовищі Matlab

4.2.1 Моделювання системи векторного керування асинхронним двигуном за законом постійності потокозчеплення

Існує досить багато різних способів векторного керування двигуном змінного струму. Розглянемо систему векторного керування, при якому реалізується пряме управління моментом. У даному випадку векторне керування по відношенню до системи координат по вектору потоку статора за законом постійності потокозчеплення. При цьому виокремлюють класичну систему векторного управління, що не передбачає широтно-імпульсної модуляції та з такою.

Функціональна схема системи векторного управління без застосування широтно-імпульсної модуляції представлено на рис. 4.10. У основі роботи даної схеми є завдання таблиці оптимальних перемикачів силових ключів, що визначає значення та напрямки вихідного вектора напруги перетворювача у функції сигналів, що надходять з релейних регуляторів моменту і потокозчеплення статора [34].

Функціональна схема системи векторного керування із застосуванням широтно-імпульсної модуляції показано на рис. 4.11. У даній схемі релейні регулятори замінюють пропорційно-інтегральними, додається модуль широтно-імпульсної модуляції, перетворювачів з нерухомої системи координат (α, β) у таку, що обертається (d, q) і у зворотному напрямку. Застосовані у схемі ПІ-регулятори контурів потоку статора та електромагнітного моменту двигуна визначають проекції вектора вихідної напруги на осі: U_{sx} і U_{sy} . Дані проекції вектора напруги подаються на широтно-імпульсний модулятор, який обчислює час роботи силових елементів [34].

$$\begin{cases} U_{sx} = R_s \cdot i_{sx} + \frac{d\psi_s}{dt} \\ U_{sy} = k_s \cdot M + \Omega_s \cdot \psi_s \end{cases} \quad (4.12)$$

де R_s – активний опір статора, Ом,

i_{sx} – проекція вектора сили струму статора на вісь X, А,

ψ_s – амплітуда потоку статора (потокозчеплення), Вб,

k_s – коефіцієнт пропорційності між проекцією сили струму на вісь Y і крутним моментом [35]:

$$k_s = \frac{2}{3} \cdot \frac{R_s}{p \cdot \psi_s} \quad (4.13)$$

де p – число пар полюсів двигуна, шт.,

M – електромагнітний момент двигуна, Н·м [35]:

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \psi_s \cdot i_{sy} \quad (4.14)$$

Ω_s – кутова швидкість обертання потоку статора, рад/с,

При використанні широтно-імпульсного модулятора у системі ключі силового перетворювача керуються ним на несучій частоті f_c і статичний перетворювач можна описати як динамічну ланку, що містить передавальну функцію [35]:

$$W(p) = K \cdot e^{-\tau p} \quad (4.14)$$

де K – коефіцієнт підсилення статичного перетворювача,

τ – значення тимчасової затримки, с.

Для сучасних перетворювачів значення $\tau \approx 1/f_c$ і є досить малим, тому рівняння (4.14) можна записати [35]:

$$W(p) = K \quad (4.15)$$

Лінійну математичну модель системи векторного управління із застосуванням широтно-імпульсної модуляції у програмному середовищі Matlab наведено на рис. 4.12 [36].

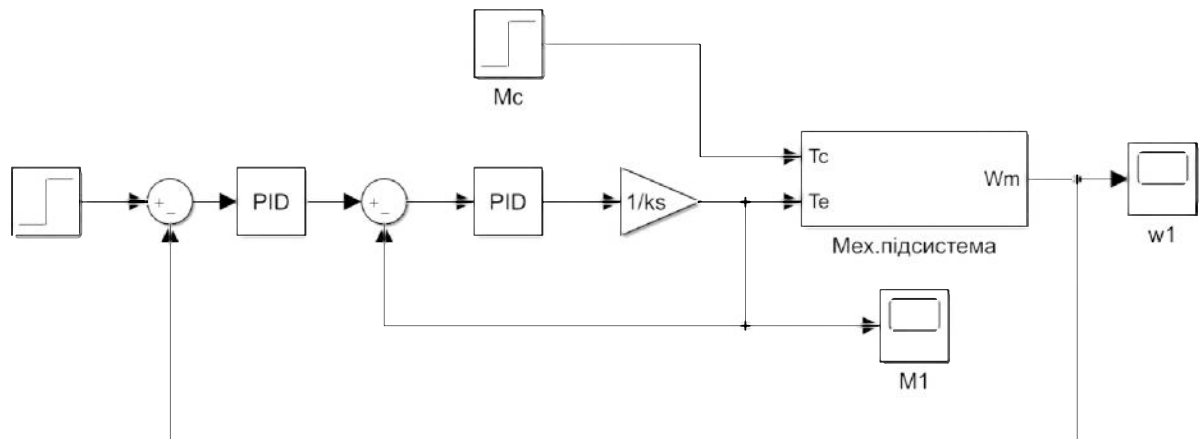


Рисунок 4.12 – Математична модель системи векторного управління із застосуванням широтно-імпульсної модуляції

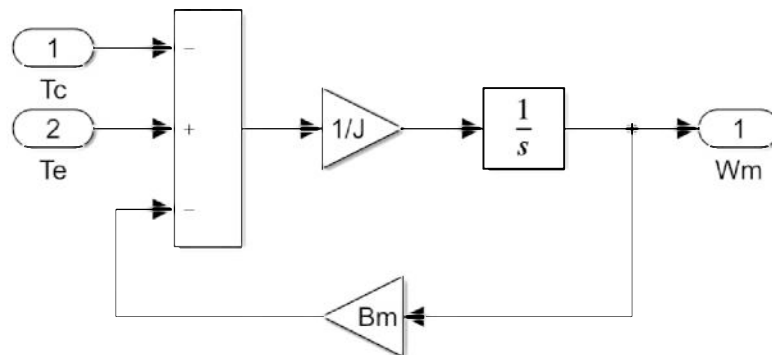


Рисунок 4.13 – Склад механічної підсистеми моделі системи векторного управління із застосуванням широтно-імпульсної модуляції

Результатом моделювання лінійної математичної моделі будуть графіки перехідних процесів для створеної системи – рис. 4.14–4.17.

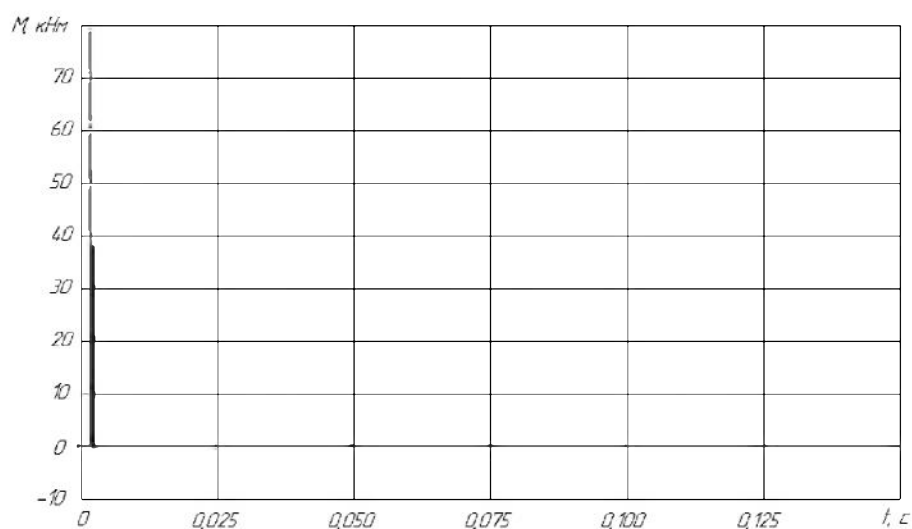


Рисунок 4.14 – Зміна величини моменту в лінійній системі без навантаження

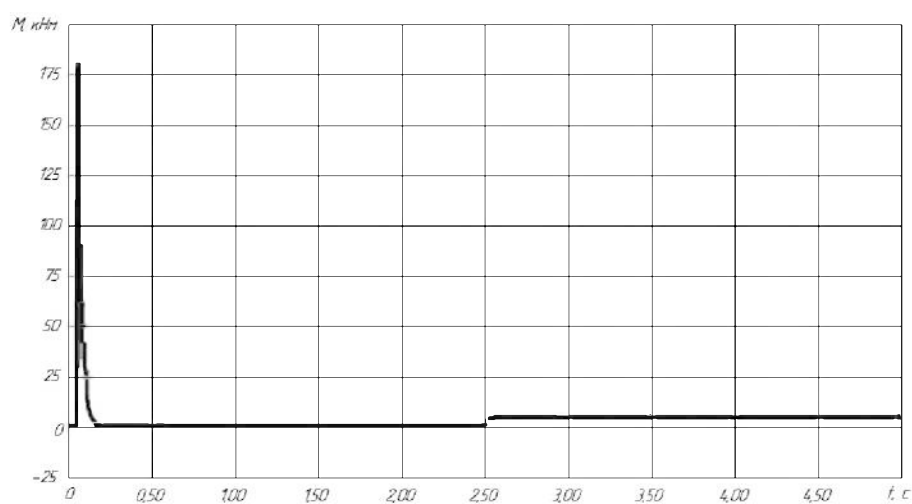


Рисунок 4.15 – Зміна величини моменту в лінійній системі з навантаженням

Внаслідок наявності нелінійності, математична модель системи векторного управління із застосуванням широтно-імпульсної модуляції набуде вигляду, представленого на рис. 4.18, а склад підсистеми «Нелінійність» – на рис. 4.19 [36].

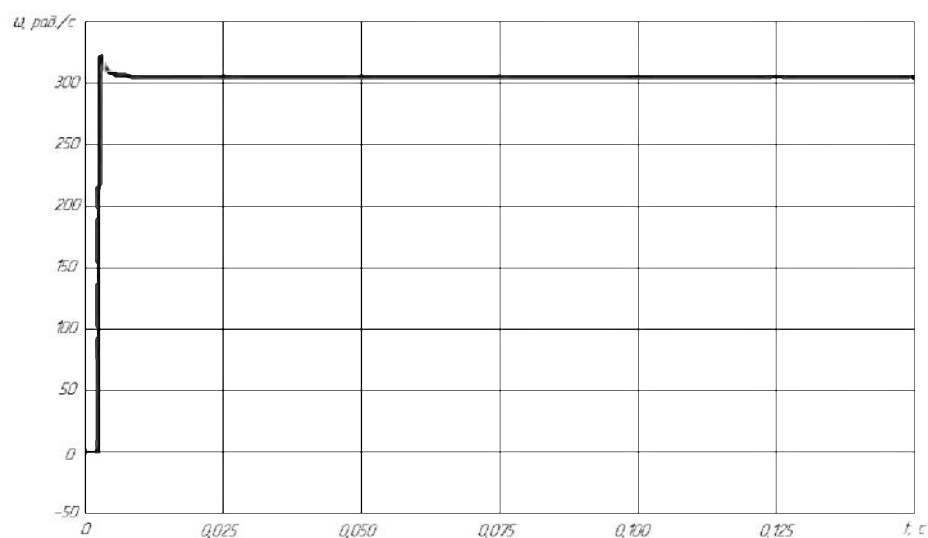


Рисунок 4.16 – Зміна швидкості у лінійній системі без навантаження

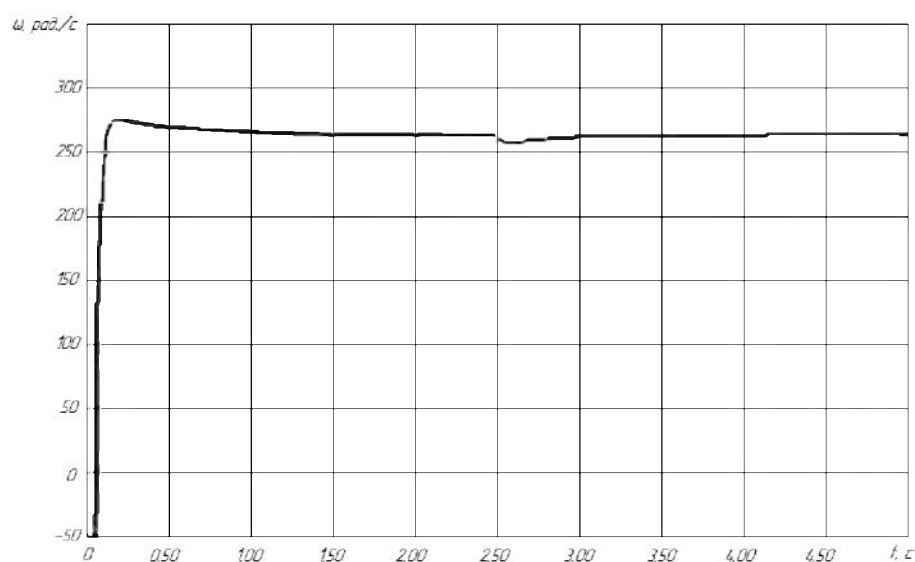


Рисунок 4.17 – Зміна швидкості у лінійній системі з навантаженням

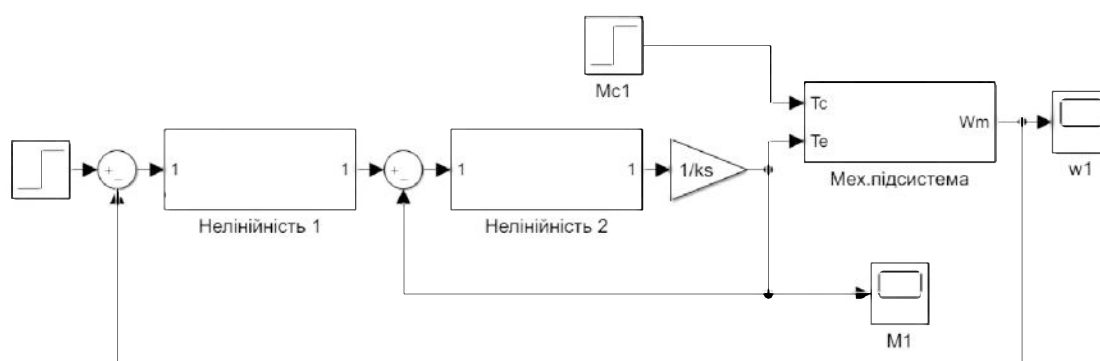


Рисунок 4.18 – Математична модель системи векторного управління із застосуванням широтно-імпульсної модуляції з урахуванням наявної нелінійності

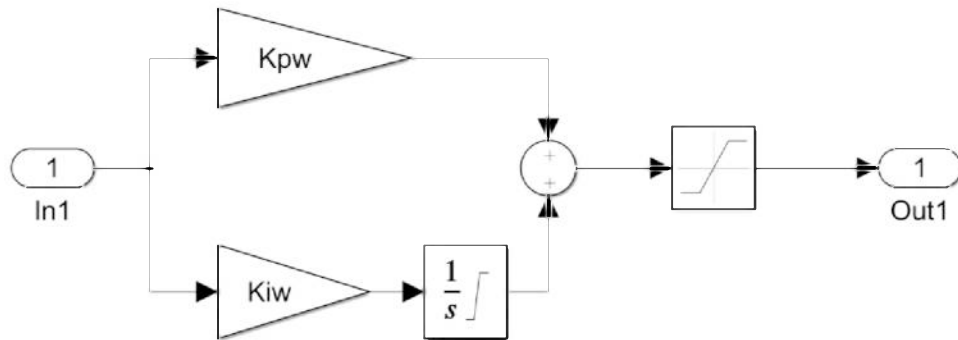


Рисунок 4.19 – Склад підсистеми моделі системи векторного управління із застосуванням широтно-імпульсної модуляції для врахуванням нелінійності

Результатом моделювання нелінійної математичної моделі будуть графіки перехідних процесів для створеної системи – рис. 4.20–4.23.

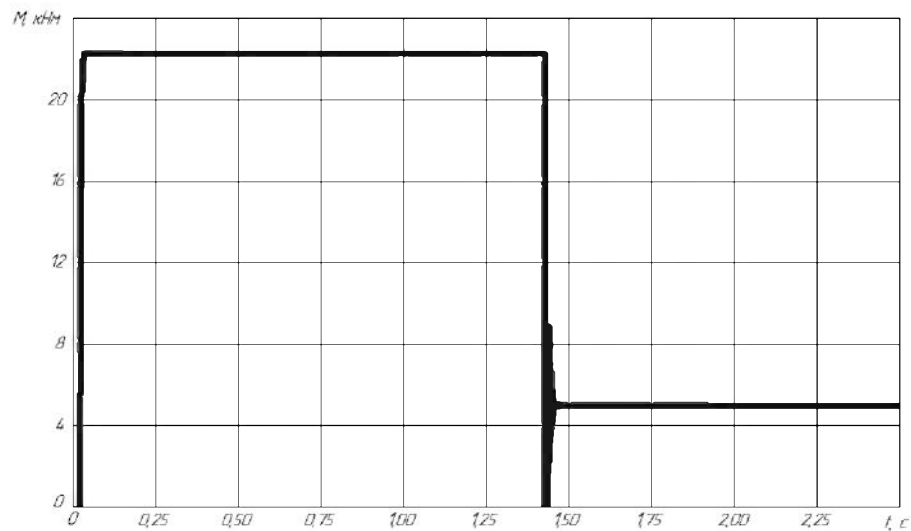


Рисунок 4.20 – Зміна величини моменту з урахуванням нелінійності системи без навантаження

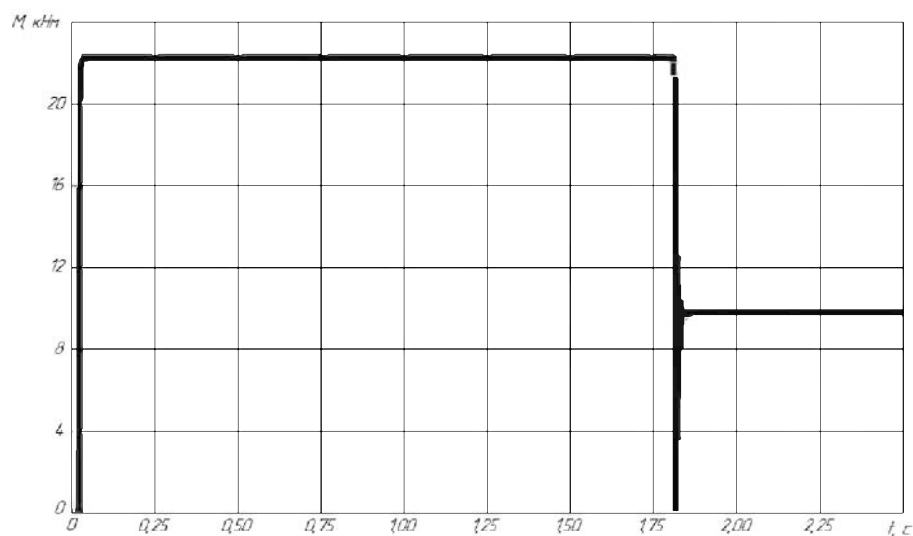


Рисунок 4.21 – Зміна величини моменту з урахуванням нелінійності системи під навантаженням

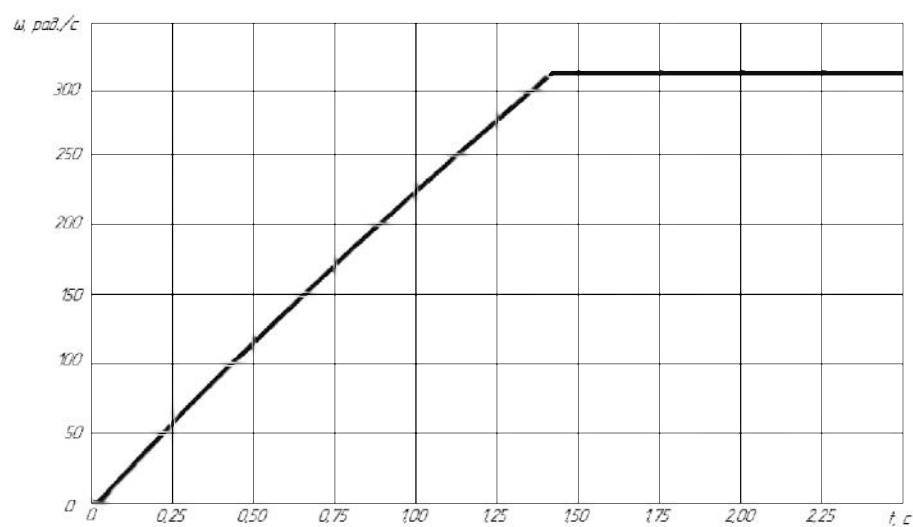


Рисунок 4.22 – Зміна кутової швидкості з урахуванням нелінійності системи без навантаження

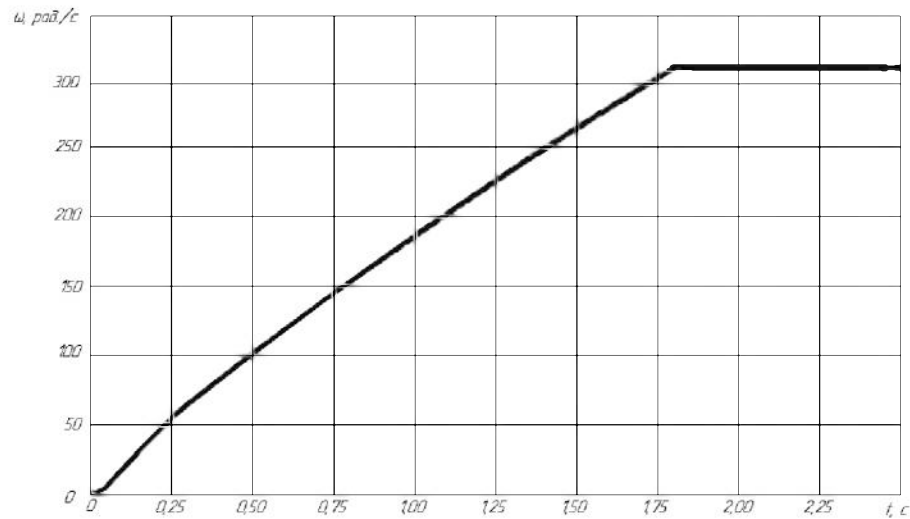


Рисунок 4.23 – Зміна кутової швидкості з урахуванням нелінійності системи під навантаженням

Кінцевий вид математичної моделі системи векторного управління із застосуванням широтно-імпульсної модуляції з урахуванням нелінійності з контурами управління по швидкості, моменту і потокозчепленню представлено на рис. 4.24 [36, 37].

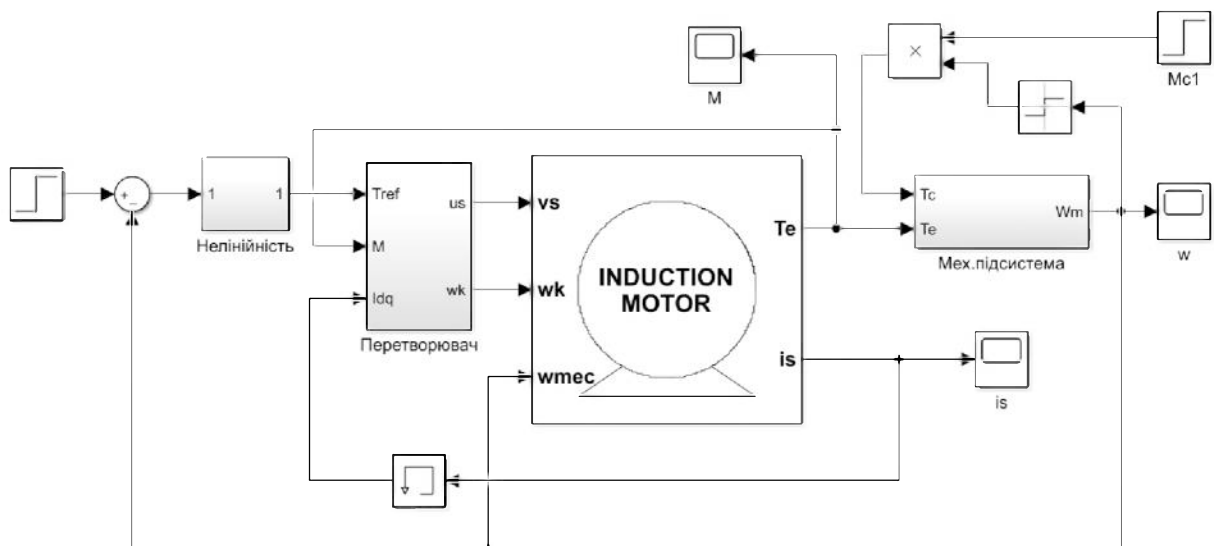


Рисунок 4.24 – Математична модель системи векторного управління із застосуванням ШІМ з урахуванням нелінійності з контурами управління по швидкості, моменту і потокозчепленню

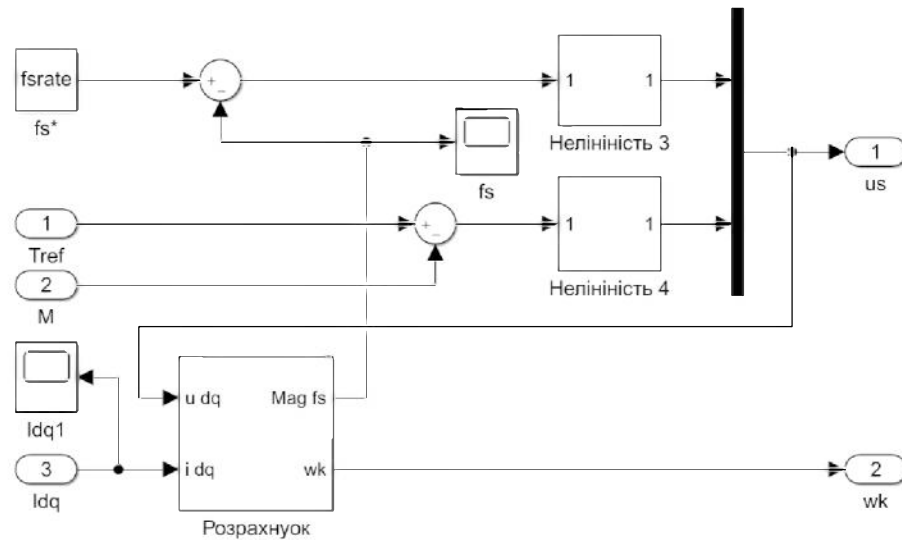


Рисунок 4.25 – Склад підсистеми «Перетворювач» моделі системи векторного управління із застосуванням ШІМ з урахуванням нелінійності з контурами управління по швидкості, моменту і поточкозчепленню

Графіки перехідних процесів для нелінійної модель системи векторного управління із застосуванням широтно-імпульсної модуляції з урахуванням нелінійності з контурами управління по швидкості, моменту і поточкозчепленню без навантаження та під навантаженням наведено на рис. 4.26–4.30.

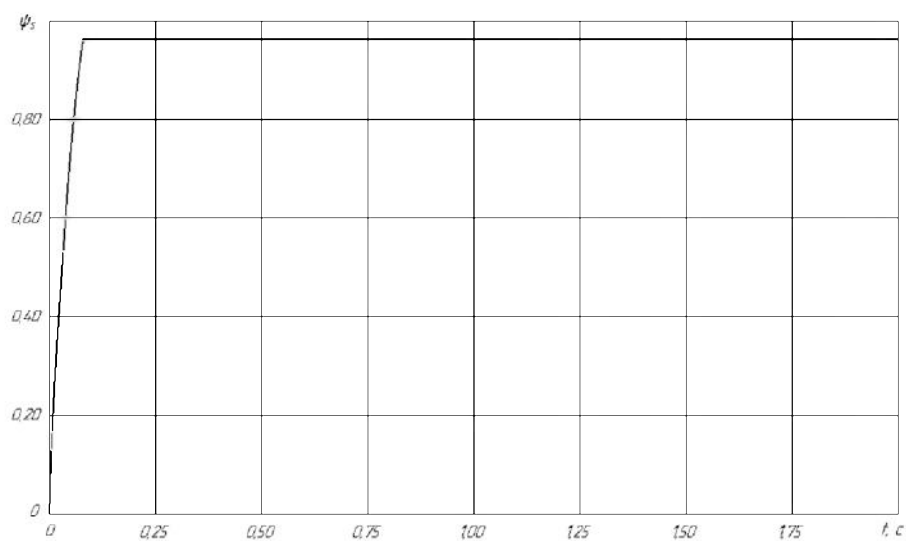


Рисунок 4.26 – Перехідний процес по поточкозчепленню без навантаження

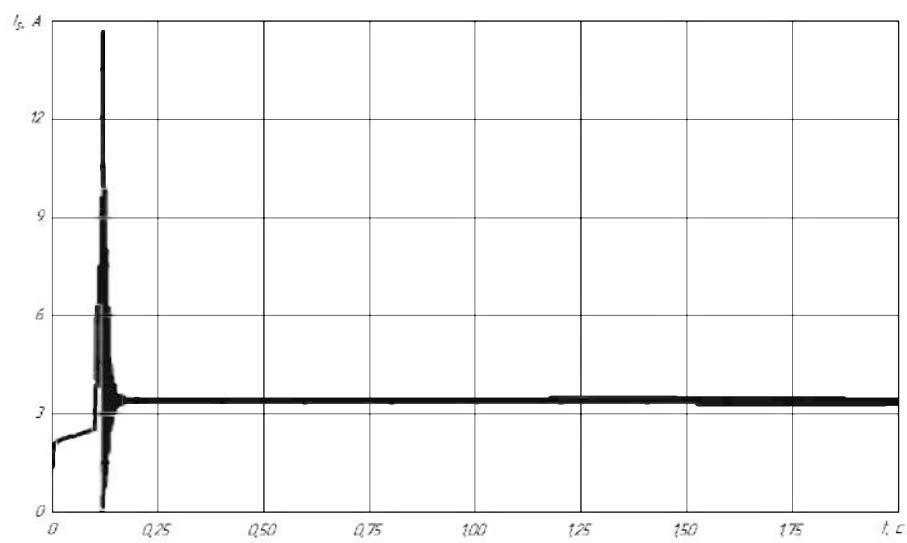


Рисунок 4.27 – Перехідний процес зміни струму статора без навантаження

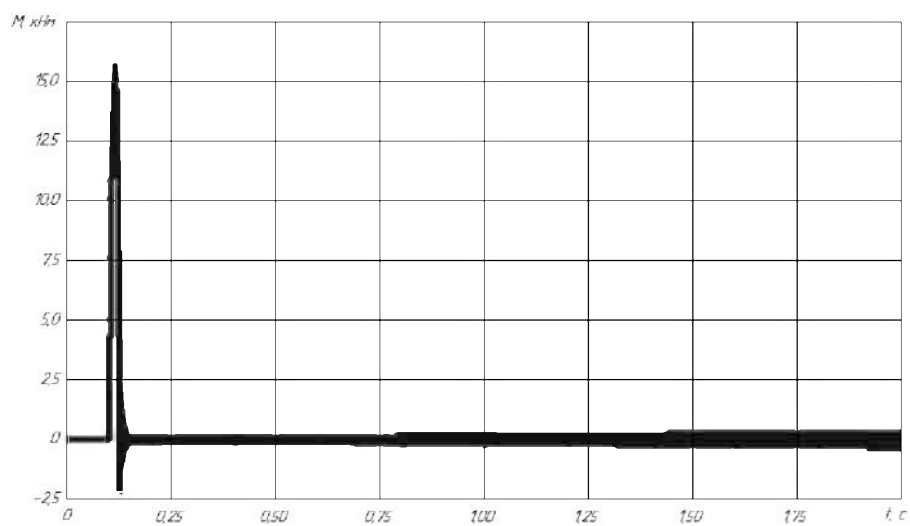


Рисунок 4.28 – Перехідний процес зміни електромагнітного моменту без навантаження

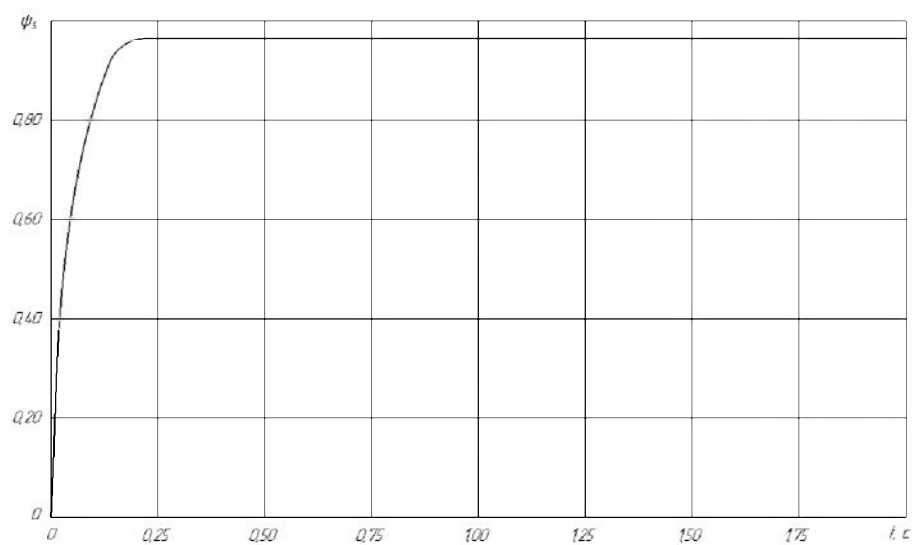


Рисунок 4.29 – Перехідний процес по потокозчепленню під навантаженням

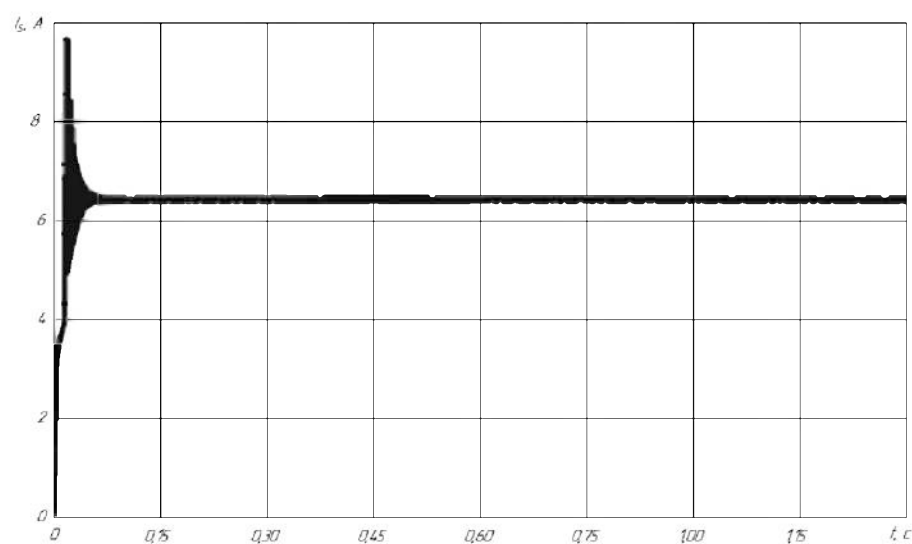


Рисунок 4.30 – Перехідний процес зміни струму статора під навантаженням

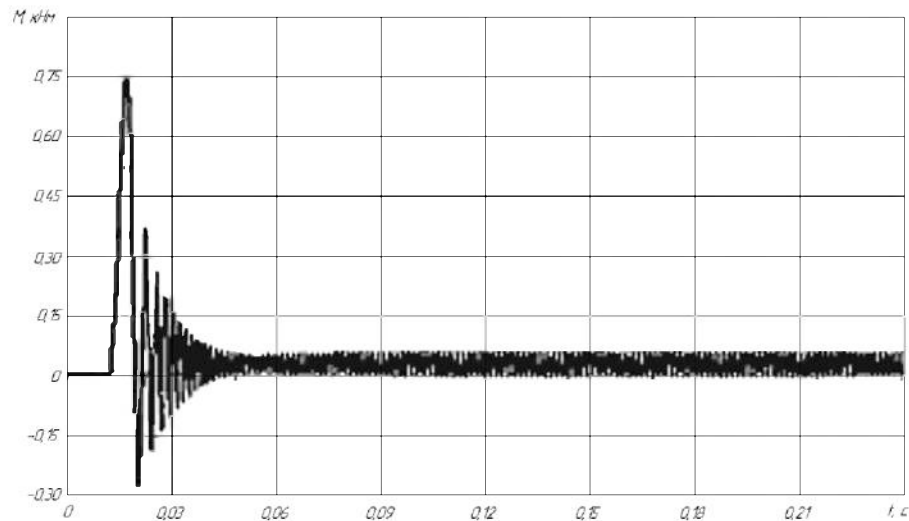


Рисунок 4.31 – Перехідний процес зміни електромагнітного моменту під навантаженням

4.2.2 Моделювання роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, що живиться від перетворювача частоти з автономним інвертором

Для наочності розглянемо моделювання роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, що живиться від перетворювача частоти з автономним інвертором з формуванням напруги на базі широтно-імпульсної модуляції.

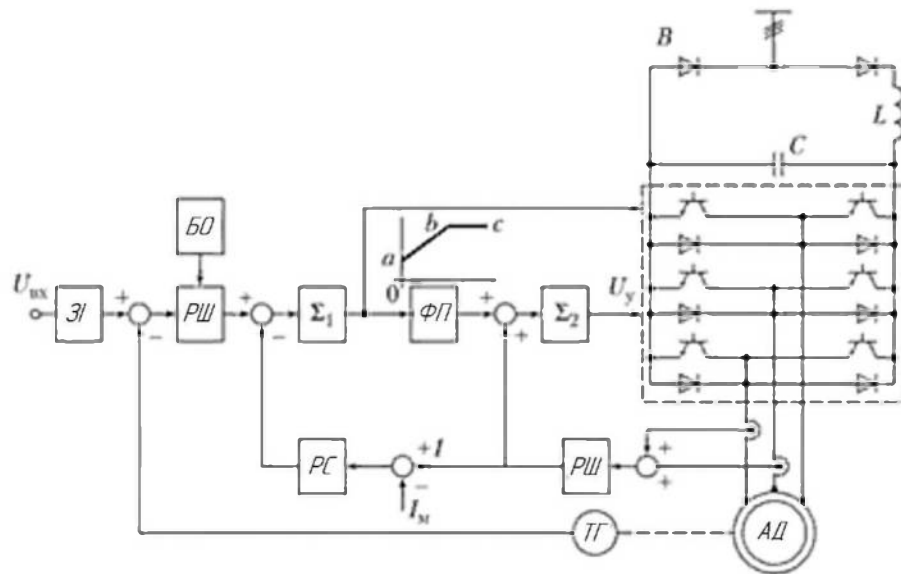
Функціональна схема живлення двигуна від трифазного автономного інвертора представлено на рис. 4.10 [38].

Гармонічні впливи (напруги), що задають режим роботи двигуна, розраховуються за формулою [39]:

$$\begin{cases} U_a = U_m \sin \omega t \\ U_b = U_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ U_c = U_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (4.12)$$

Для подальшого моделювання необхідно здійснити перетворення гармонійних напруг із нерухомої системи координат у систему координат, яка обертається, що реалізується за допомогою системи рівнянь [39]:

$$\begin{cases} U_\alpha = \operatorname{Re}(\bar{U}_s) = \frac{2}{3} \left(U_a - \frac{U_b - U_c}{2} \right) \\ U_\beta = \operatorname{Im}(\bar{U}_s) = \frac{1}{\sqrt{3}} (U_b - U_c) \end{cases} \quad (4.13)$$



$ЗІ$ – задатчик інтенсивності, $БО$ – блок обмежень, $РШ$ – регулятор швидкості, $РС$ – регулятор струму, $ФП$ – функціональний перетворювач

Рисунок 4.10 – Функціональна схема живлення двигуна від трифазного автономного інвертора

Вектор U_a являє собою дійсну складову, U_β – уявну складову, результуючого вектора трифазної напруги живлячої мережі, тобто [39]:

$$U_\alpha = \operatorname{Re}(\bar{U}_{\text{дв}}), U_\beta = \operatorname{Im}(\bar{U}_{\text{дв}}) \quad (4.14)$$

А результуючий вектор трифазної напруги мережі можна записати наступним чином [39]:

$$\bar{U}_{\text{дв}} = U_\alpha + j U_\beta \quad (4.15)$$

Для систем координат, що обертається, можна записати [39]:

$$\bar{U}_{\text{дв}} = \bar{U}_S = U_\alpha + j U_\beta = \frac{2}{3}(U_a + aU_b + a^2U_c) \quad (4.16)$$

де коефіцієнти a і a^2 дорівнюють [39]:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}, \quad a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (4.17)$$

При симетричному навантаженні дотримується рівність [39]:

$$U_a + U_b + U_c = 0 \quad (4.18)$$

Тому, при симетричності напруг фаз можна записати [39]:

$$\begin{cases} U_\alpha = U_a \\ U_\beta = \frac{U_b - U_c}{\sqrt{3}} \\ U_0 = \frac{1}{3}(U_a + U_b + U_c) = 0 \end{cases} \quad (4.19)$$

де U_0 – напруга нульової послідовності, В.

При позначенні напруги прямої послідовності через U_1 , а зворотної – через U_2), по відношенню до U_α і U_β можна записати [39]:

$$\begin{cases} U_{\alpha} = U_1 - U_2 \\ U_{\beta} = \frac{1}{j}(U_1 - U_2) \end{cases} \quad (4.20)$$

У програмному середовищі Matlab за допомогою стандартних блоків можна реалізувати систему рівнянь (4.13) – (4.20), яку представлено на рис. 4.11 [36, 37].

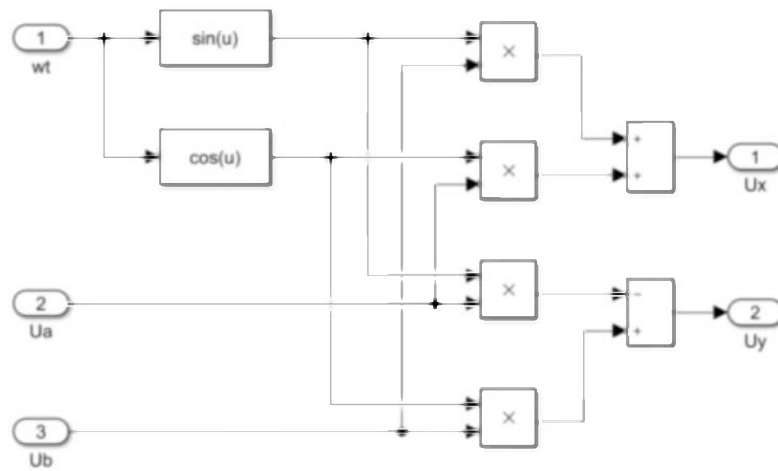


Рисунок 4.11 – Перетворення гармонійних напруг із нерухомої системи координат у систему координат, що обертається

По аналогії здійснюємо перетворення гармонійних струмів, які також можуть бути реалізовані за допомогою стандартних блоків програмного середовища Matlab – рис. 4.12 [36, 37].

Напруги рухомої трифазної системи координат мають бути перетворені у імпульсні двофазні напруги у нерухомій системі координат α, β за наступними залежностями [39]:

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = \frac{1}{3}(2u_{sa \text{ ШІМ}} - u_{sb \text{ ШІМ}} - u_{sc \text{ ШІМ}}) \\ U_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(u_{sb \text{ ШІМ}} - u_{sc \text{ ШІМ}}) \end{cases} \quad (4.21)$$

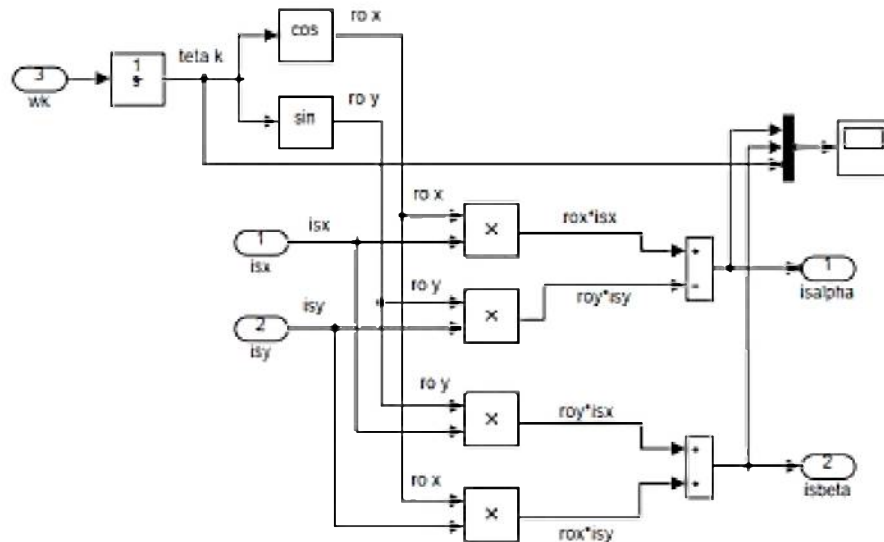


Рисунок 4.12 – Перетворення гармонійних струмів із нерухомої системи координат у систему координат, що обертається

Реалізовані за допомогою стандартних блоків програмного середовища Matlab перетворення координат (a, b, c) у координати (α, β) наведено на рис. 4.13 [36, 37].

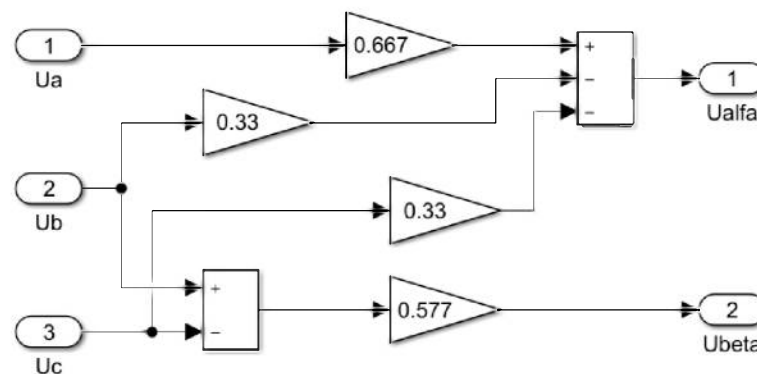


Рисунок 4.13 – Перетворення координат (a, b, c) у координати (α, β)

Результати моделювання, що ілюструють зміну статорних струмів у нерухомій системі координат (α, β) при опорній частоті, наведено на рис. 4.14.

Зворотне перетворення струмів реалізуємо за допомогою рівнянь [39]:

$$\begin{cases} i_{sa} = i_{s\alpha} \\ i_{sb} = -\frac{1}{2}i_{s\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta} \\ i_{sc} = -\frac{1}{2}i_{s\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta} \end{cases} \quad (4.22)$$

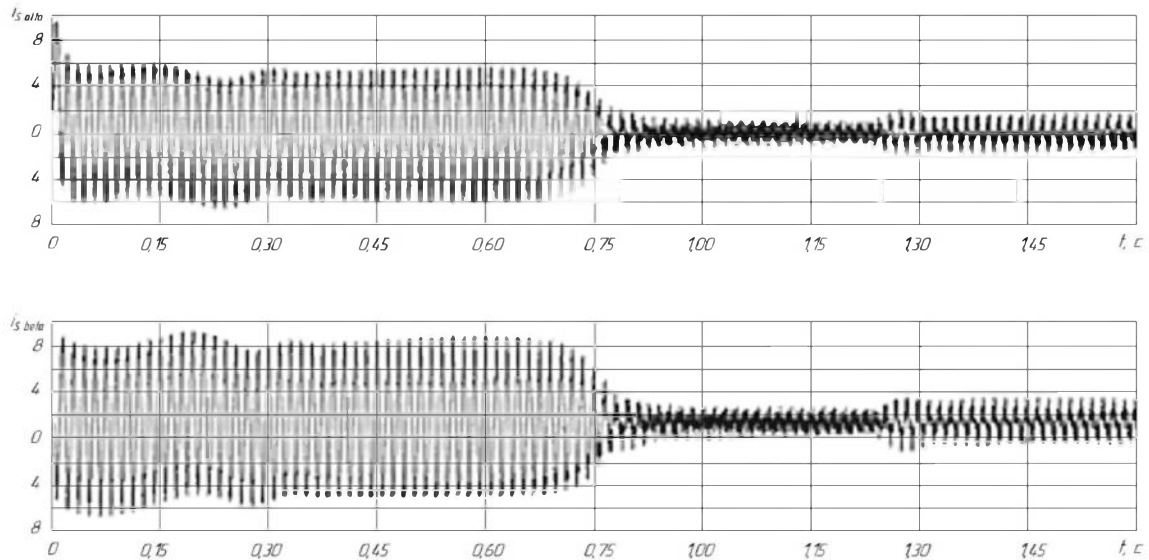


Рисунок 4.14 – Графік зміни статорних струмів у нерухомій системі координат (α, β) у період пуску при опорній частоті

Реалізувати систему рівнянь (4.22) у програмному середовищі Matlab за допомогою стандартних блоків можна наведено на рис. 4.15 [36, 37].

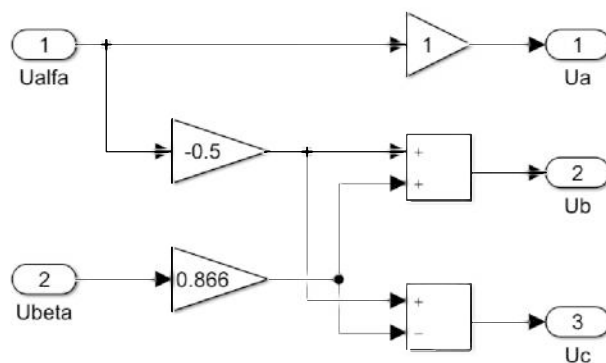


Рисунок 4.15 – Реалізація зворотного перетворення статорних струмів з нерухомій системі координат (α, β) у систему координат (a, b, c)

Графічні залежності, що ілюструють зміну статорних струмів у період пуску асинхронного двигуна при опорній частоті 1 кГц наведено на рис. 4.16. Графік зміни швидкості обертання та крутного моменту на роторі асинхронного двигуна при прямому пуску при опорній частоті наведено на рис. 4.17, а при збільшеній у 10 разів опорній частоті – на рис. 4.18.

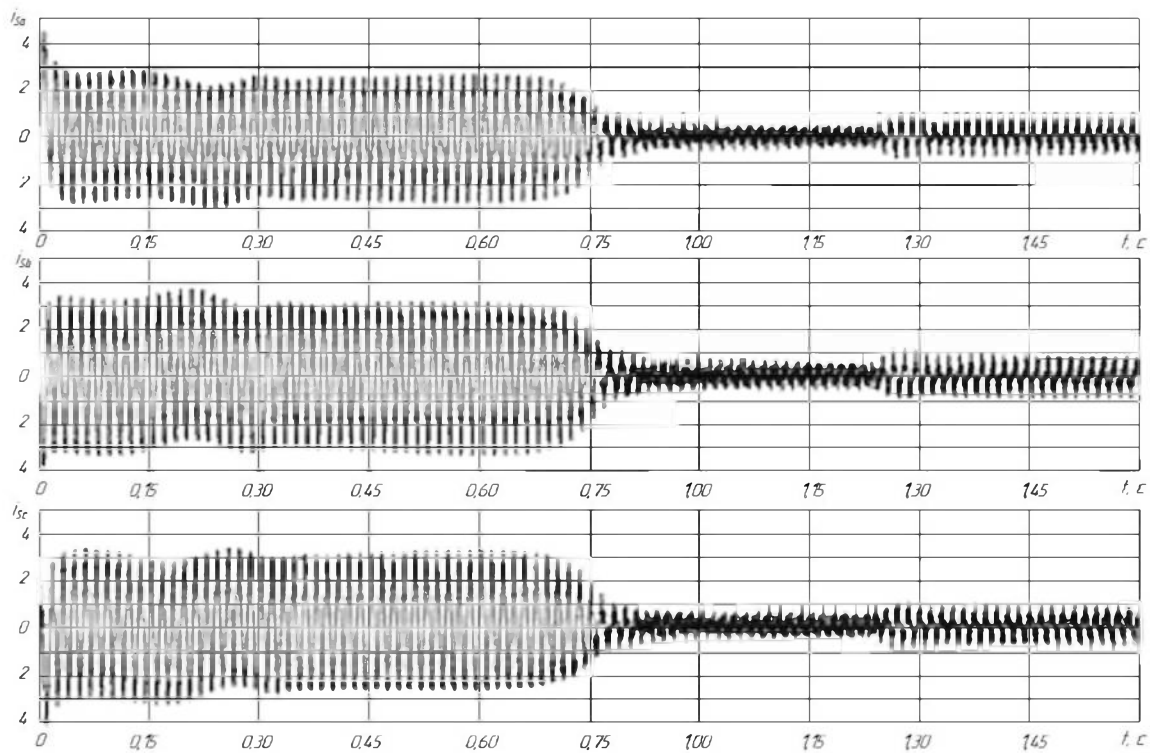


Рисунок 4.16 – Графічні залежності, що ілюструють зміну статорних струмів у період пуску асинхронного двигуна при опорній частоті

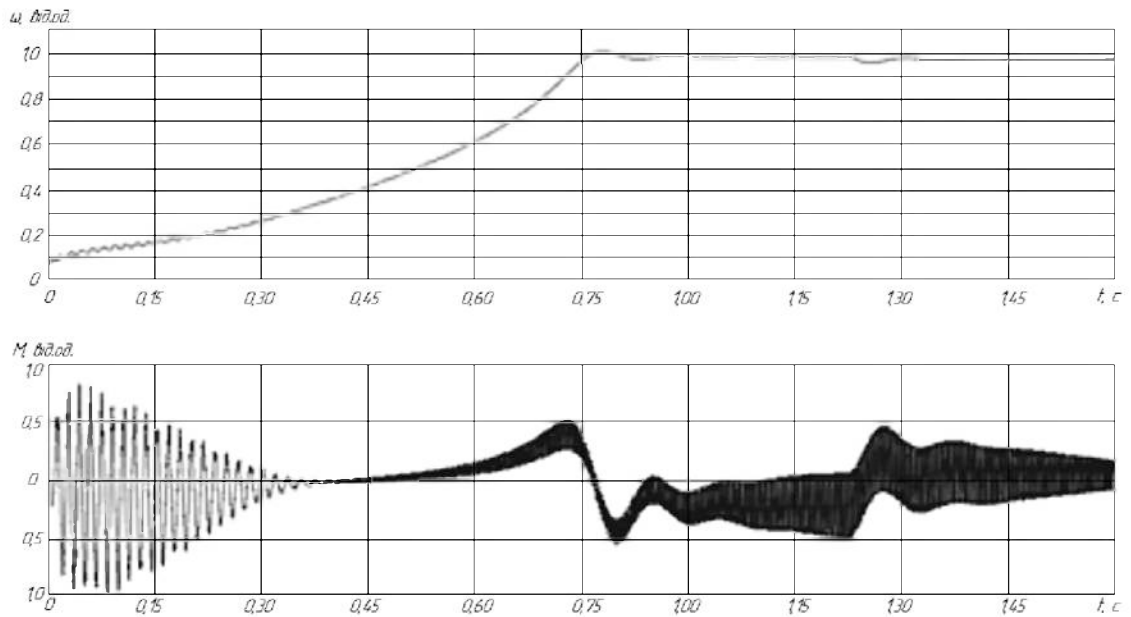


Рисунок 4.17 – Графік зміни швидкості обертання та крутного моменту на роторі асинхронного двигуна при прямому пуску при опорній частоті при опорній частоті

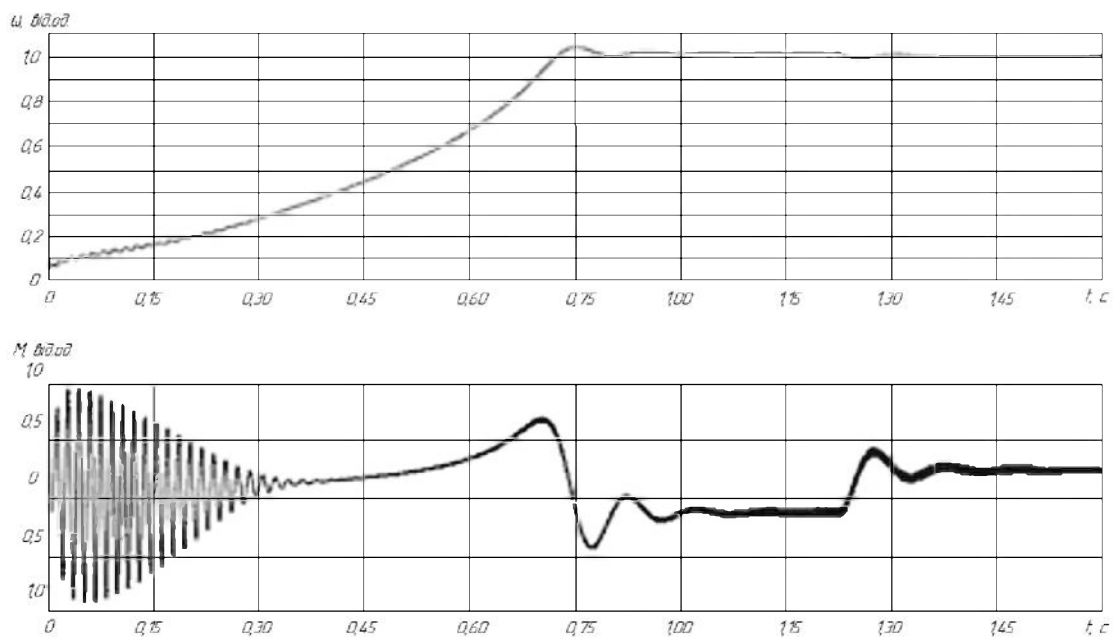


Рисунок 4.18 – Графік зміни швидкості обертання та крутного моменту на роторі асинхронного двигуна при прямому пуску при опорній частоті при збільшеній у 10 разів опорній частоті

ВИСНОВКИ

У роботі були проведені дослідження з можливості моделювання процесів у системах керування асинхронними двигунами і вплив зміни параметрів на якість керування асинхронним електроприводом.

Була розроблена математична модель асинхронного двигуна потужністю 400 кВт у програмному середовищі Matcad. Робота моделі дозволила візуалізувати процес пуску двигуна у вигляді графічних залежностей. Створена модель може бути використана для дослідження зміни параметрів роботи двигуна при зміні властивостей джерела живлення. Створена модель дозволяє аналізувати процеси при сталих режимах роботи асинхронного двигуна.

Два основних компоненти регульованого приводу є двигун та перетворювач. Досить часто, привод і двигун працюють недонавантаженими або перенавантаженими, що знижує ефективність роботи перших і вимагає застосування зазначених вище перетворювачів. Коефіцієнт корисної дії приводу та якісний склад вхідних струмів є основними енергетичними параметрами роботи приводів.

Поряд із забезпеченням високої ефективності роботи і відповідності виробки синусоїдної форми напруги необхідно брати до уваги вартісні параметри. Найбільш привабливим для застосування є силові напівпровідникові пристрої, недоліком яких є необхідність складного управління ними та складність практичної реалізація схем керування.

Для здійснення можливості регулювання роботи електроприводу була розроблена система автоматичного регулювання по швидкості з керуванням по контурам струму і потокозчеплення. Зазначені регулятори мають бути налаштовані на визначений оптимум за пропорційними законами.

Розроблена модель перетворювача частоти з автономним інвертором напруги та кількарівневою широтно-імпульсною модуляцією. Результатами моделювання стали залежності імпульсних напруг і статорних струмів у залежності від значення опорної частоти. Аналіз показав, що при початковому значенні опорної частоти виникають складові вищих гармонік струму, що має негативний вплив на роботу двигуна. Шляхом дослідження було визначено мінімальне значення частоти для досягнення максимально-наближеної до синусоїдної форми струму – на рівні 5 кГц.

У разі регулювання частоти обертання двигуна з метою підтримки на заданому рівні значення обертового моменту, згідно визначеного закону, необхідно одночасно зі зміною частоти напруги живлення змінювати і величину останньої. Дану вимогу можна реалізувати за допомогою частотно-регульованого електроприводу з інверторами струму, інверторів напруги, що реалізують принцип широтно-імпульсної модуляції. З метою здійснення керування частотно-регульованим електроприводом необхідним є застосування перетворювачів частоти з регулюванням як частоти так і амплітуди напруги.

Запропоновані у роботі структурні схеми систем з векторним керуванням забезпечують кращі енергетичні показники роботи приводів, подовження строку їх служби та зменшення споживання з мережі величини реактивної потужності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. - СПб.: Питер, 2010. – 350 с.
3. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студентов высш. учеб. заведений. -М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
4. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с.
5. Кочетков В.П. Основы электропривода: учеб. пособие. / В.П. Кочетков. –2-е изд., испр. – Абакан: Сиб. федер. ун-т; ХТИ – Филиал СФУ, 2007. – 272 с.
6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://surl.li/rhwz>
7. Важнов А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Учеб. для студ. вузов. Л.: Энергия, 1980 – 256 с.
8. Baliga B.J. Power Semiconductor Devices for Variable Frequency Drives. Chapter 1, Power Electronics and Variable Frequency Drives – Technology and Applications, edited by B.N. Bose, IEEE Press, New York, NY, USA, 1997.
9. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://surl.li/rhxx>
10. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://surl.li/rhyf>
11. Чебовский О.Г. и др. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник. – Ленинград, Энергия, 1985.
12. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://surl.li/riay>
13. Кочетков В.П., Багаутинов Г.А. Теория автоматизированного электропривода: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1992. – 328 с.

14. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://helpiks.org/8-10033.html>
15. Modern Power Electronics: Evolution Technology and Applications, NJ, Piscataway:IEEE Press, 1992.
16. Н. Мохан, Т. Унделанд и В. Роббинс, Силовая электроника, 3-е изд., John Wiley & Sons, 2003.
17. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студентов высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
18. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://surl.li/riex>
19. R. Bojoi, F. Farina, F. Profumo and A. Tenconi, “Dual-three phase induction machine drives control – a survey,” CD-ROM Proc. of the 2005 IEEE Int’l Power Elect. Conf., 10 p.
20. Schonung A. and Stemmler H. Static Frequency Changers with Subharmonic Control in Conjunction with reversible Variable-Speed AC-Drives. Brown Boveri Review, Vol. 51, 1964. Schulting, L., A 100-kVA Resonant DC Link Inverter with GTO’s – Design Consideration and First Practical Experience, Record of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 729–736, 1992.
21. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. / М.: АКАДЕМА, 2006. – 265 с.
22. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://surl.li/rifm>
23. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://surl.li/rige>
24. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
25. Макаров А.М., Сергеев А.С., Крылов Е.Г., Сердобинцев Ю.П. Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока: учеб. пособие. – ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 192 с.

26. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
27. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов: учеб. пособие / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: Рос. гос. проф.-пед. унт», 2008. – 279 с.
28. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт., 2001. – 320 с.
29. Терёхин В.Б. Разработка моделей элементов и систем автоматизированного электропривода в среде Matlab: учебное пособие / В.Б. Терёхин – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2017. – 511 с.
30. Ключев В.И. Учебное пособие по курсу «Теория автоматизированного электропривода»: Ч.1. Динамика электромеханических систем / В.И. Ключев. – М.: Моск. энергет. ин-т, 1978. – 90 с.
31. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – Санкт-Петербург: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
32. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование в электротехнике и энергетике: Науч. пособие / Сивокобыленко В.Ф. – Донецк: РВА ДонНТУ, 2005. – 350 с.
33. Дьяконов В. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. М.: Солон-Пресс, 2004. – 384 с.
34. Кочетков В.П. Основы теории управления: учебное пособие. 2-е изд., испр. – Абакан: Изд-во ХГУ им Н.Ф. Катанова, 2007. – 272 с.
35. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999.

36. Терёхин В.Б. Разработка моделей элементов и систем автоматизированного электропривода в среде Matlab: учебное пособие / В.Б. Терёхин – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2017. – 511 с.

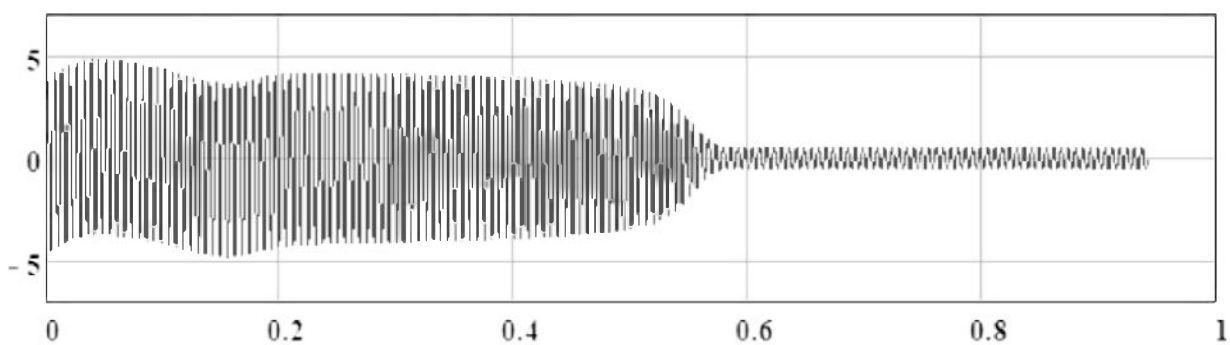
37. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

38. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://surl.li/rhgg>

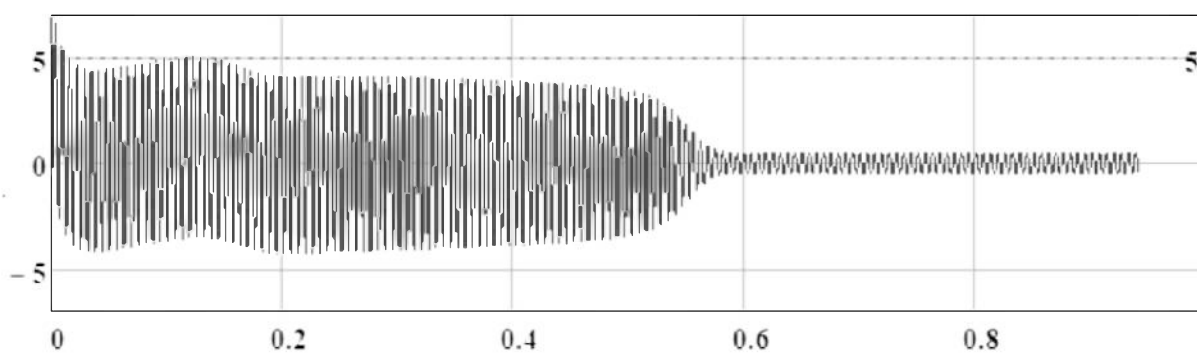
39. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: Учебник для вузов. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 2000.

40. Евзеров И.Х. Комплектные тиристорные электроприводы: справочник / И.Х. Евзеров, А.С. Горобец, Б.И. Мошковец; под ред. В.М. Перельмутера. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 318 с.

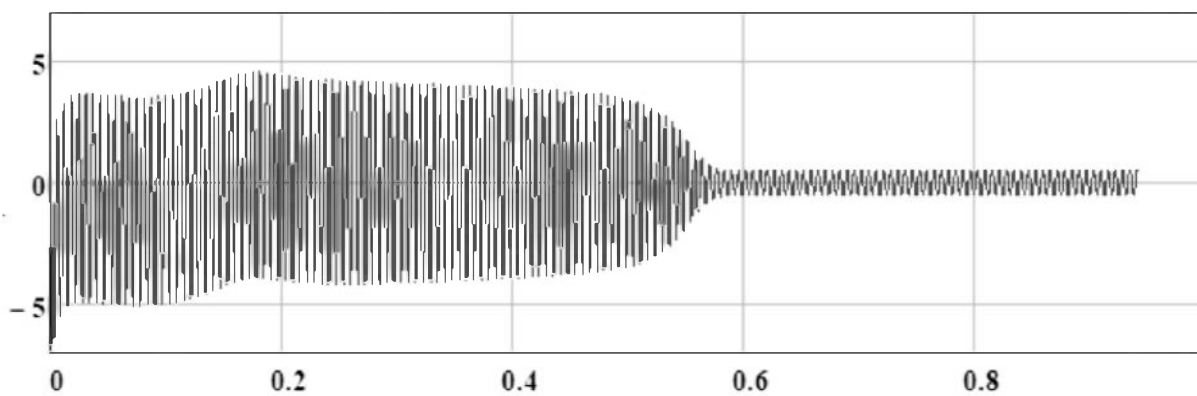
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



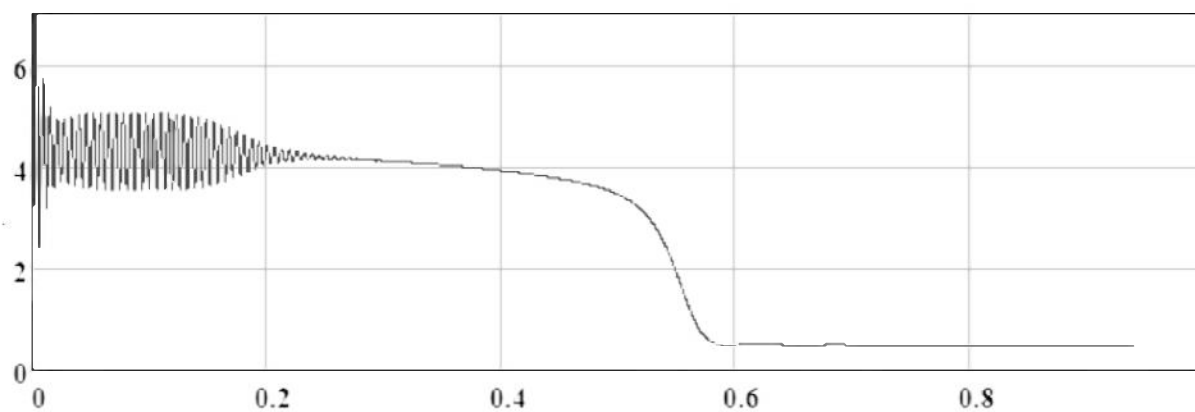
Графік зміни струму статора у фазі А



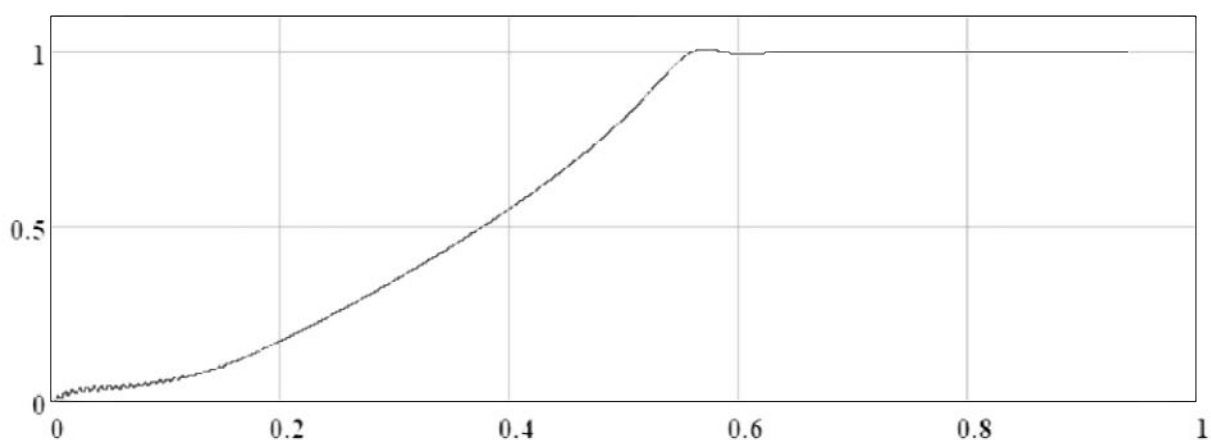
Графік зміни струму статора у фазі В



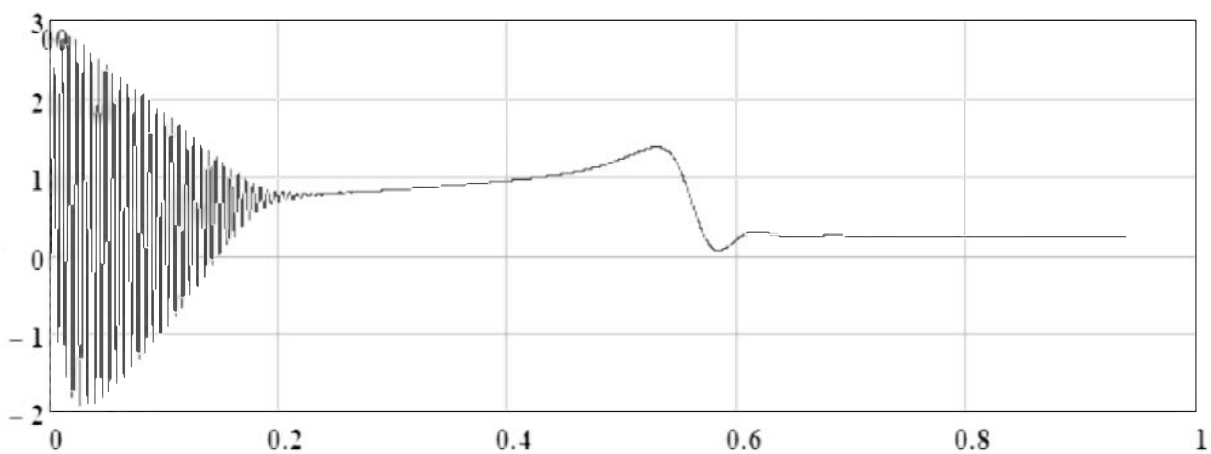
Графік зміни струму статора у фазі С



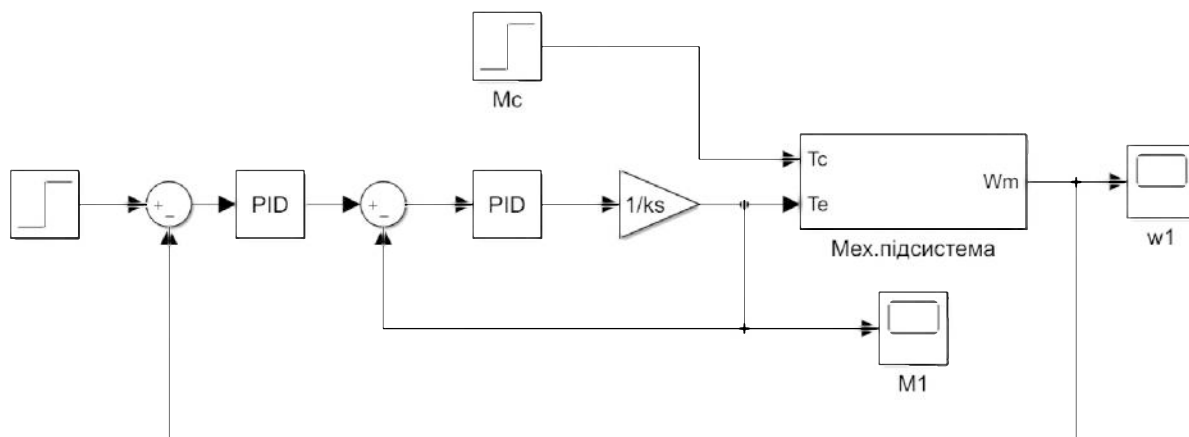
Графік зміни модуля узагальненого вектора струму статора



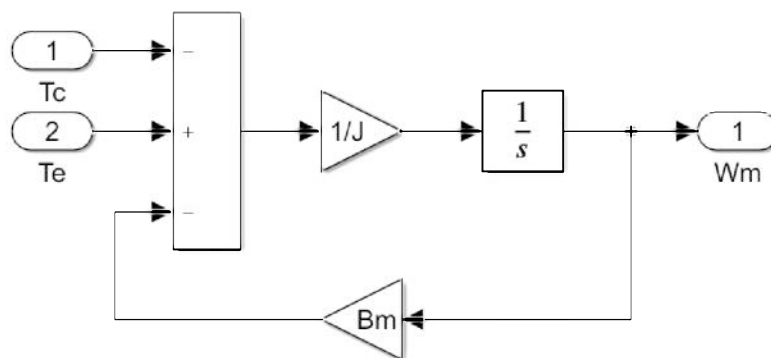
Графік зміни кутової швидкості обертання ротора



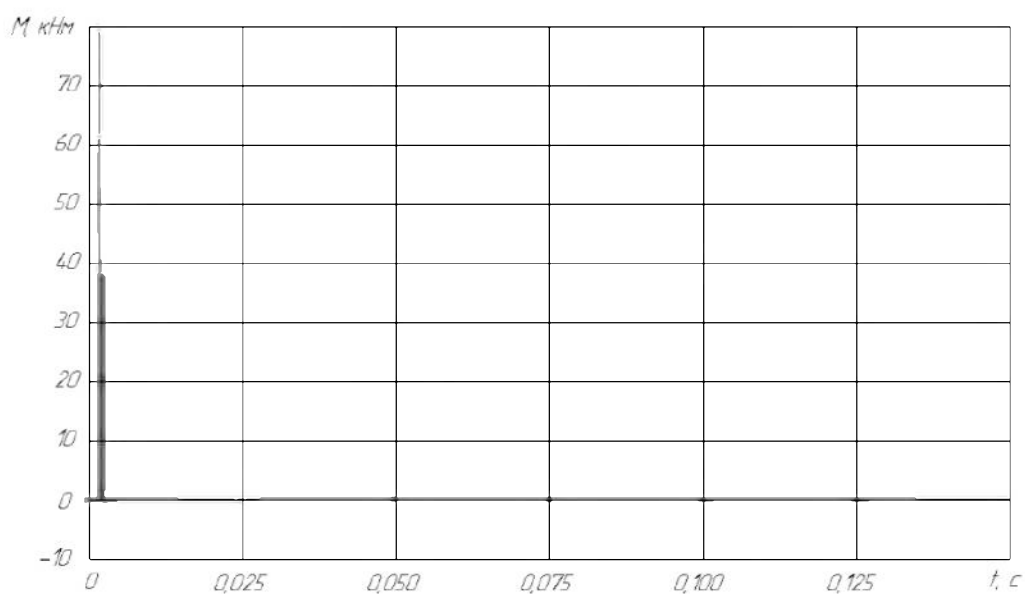
Графік зміни крутного моменту двигуна



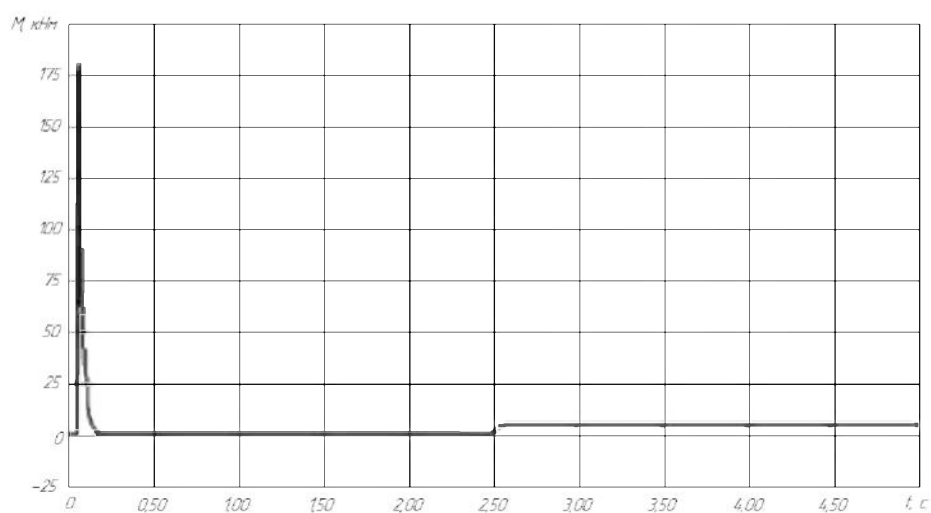
Математична модель системи векторного управління із застосуванням широтно-імпульсної модуляції



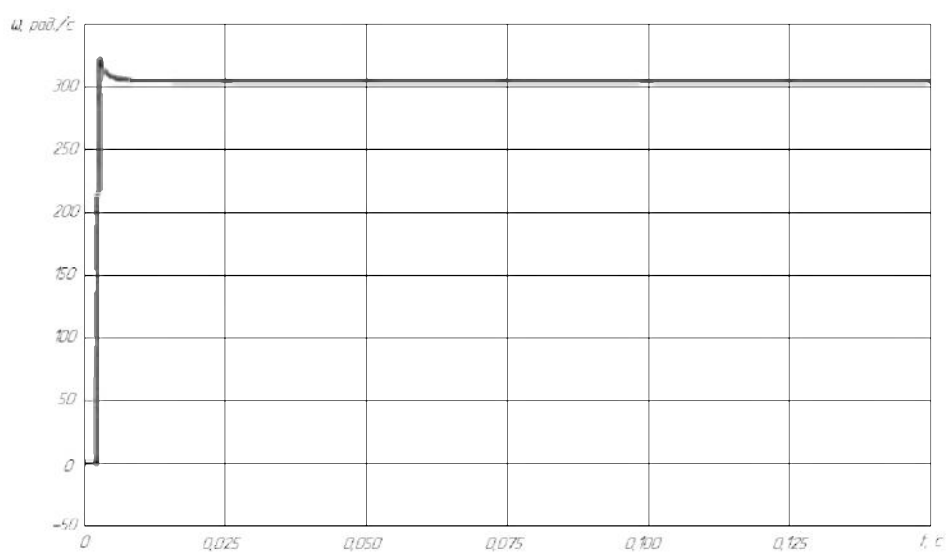
Склад механічної підсистеми моделі системи векторного управління із застосуванням широтно-імпульсної модуляції



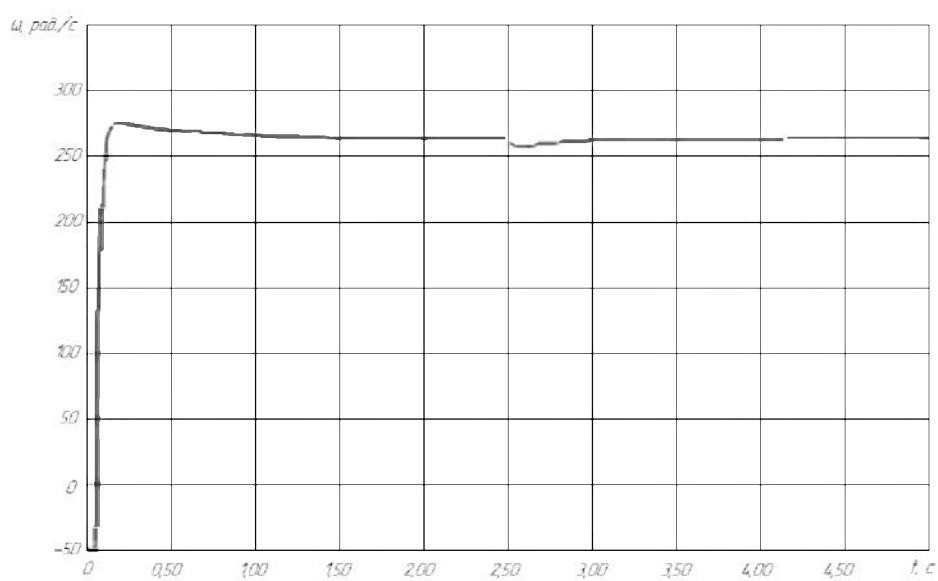
Зміна величини моменту в лінійній системі без навантаження



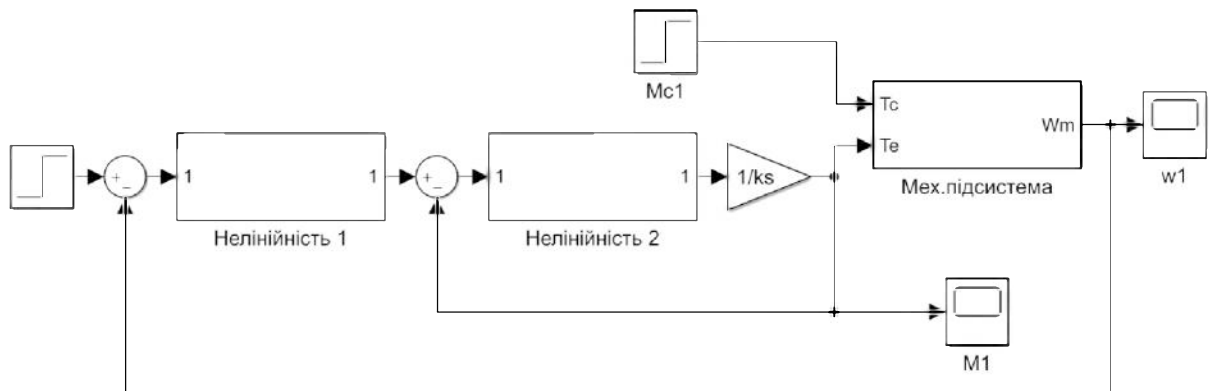
Зміна величини моменту в лінійній системі з навантаженням



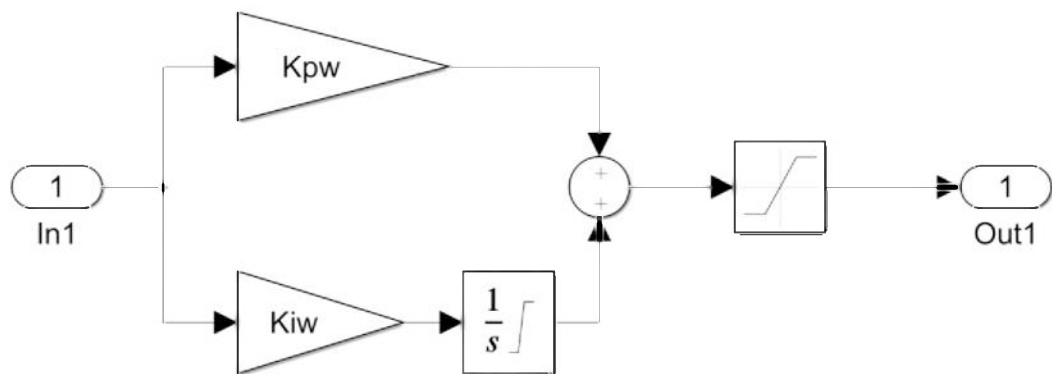
Зміна швидкості у лінійній системі без навантаження



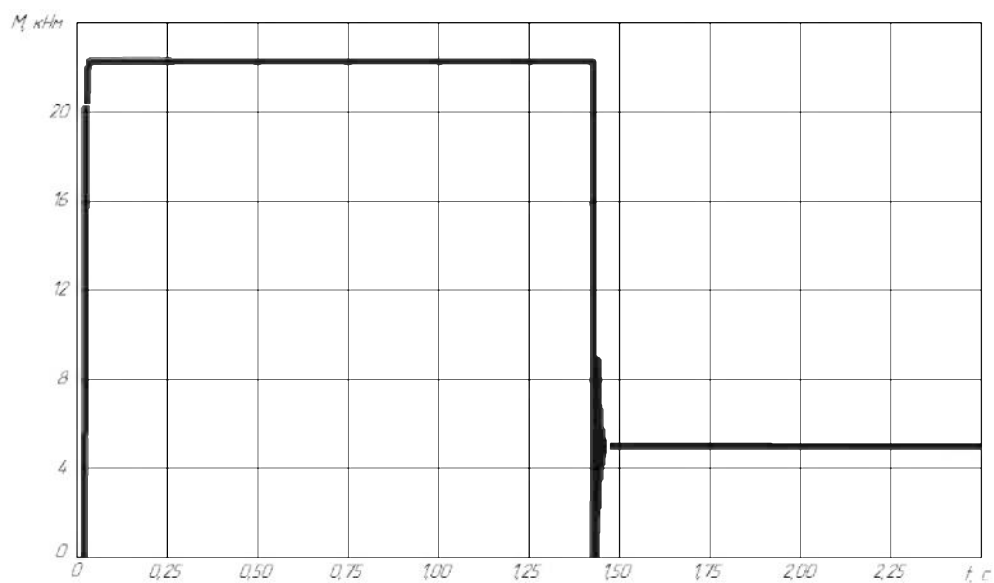
Зміна швидкості у лінійній системі з навантаженням



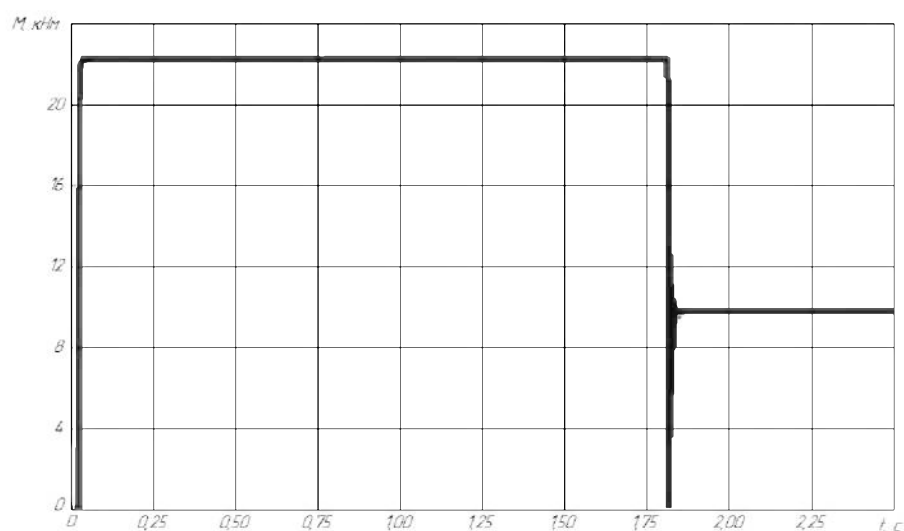
Математична модель системи векторного управління із застосуванням широтно-імпульсної модуляції з урахуванням наявної нелінійності



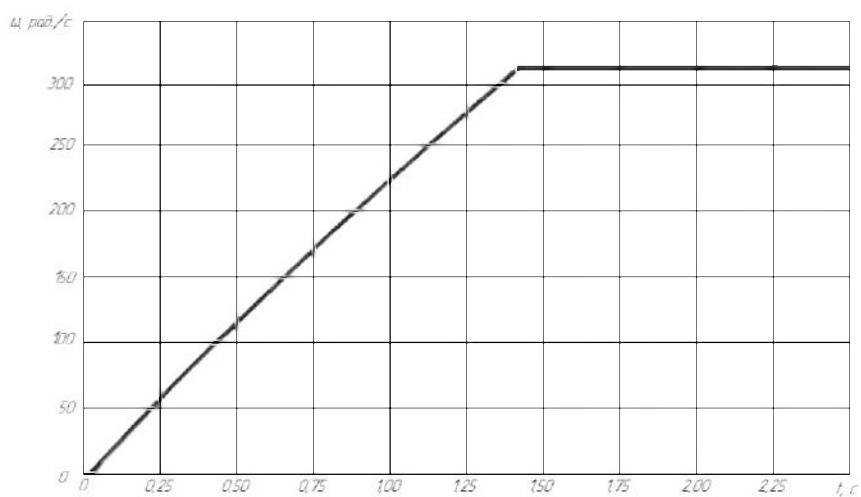
Склад підсистеми моделі системи векторного управління із застосуванням широтно-імпульсної модуляції для врахуванням нелінійності



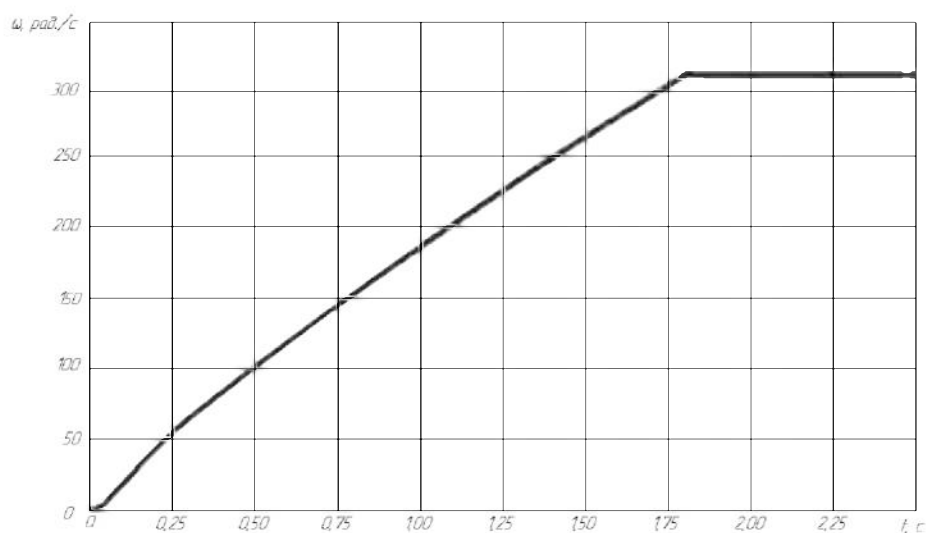
Зміна величини моменту з урахуванням нелінійності системи без навантаження



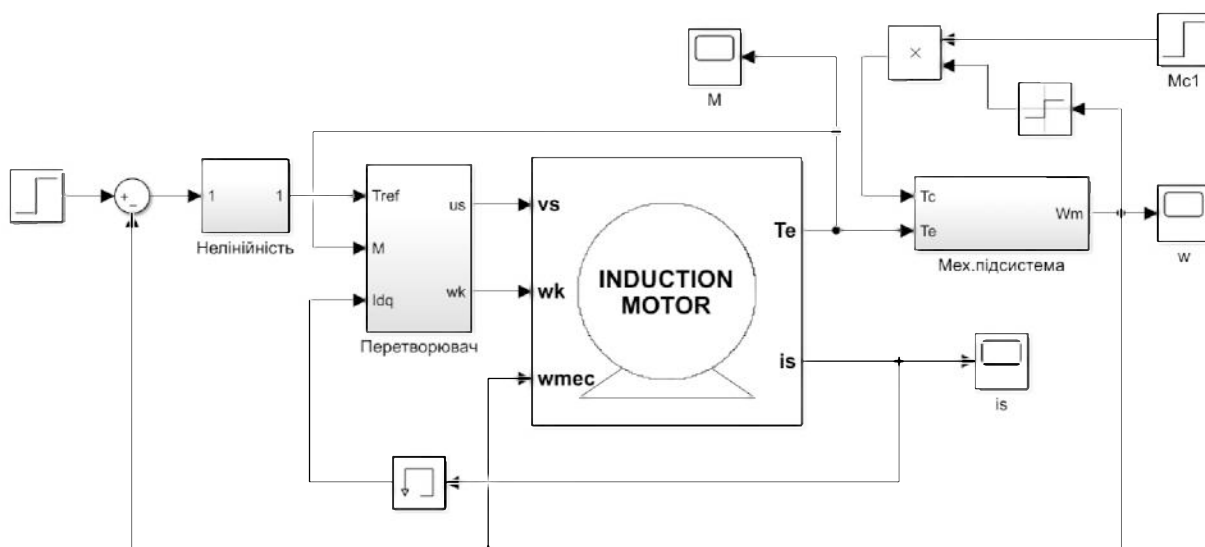
Зміна величини моменту з урахуванням нелінійності системи під навантаженням



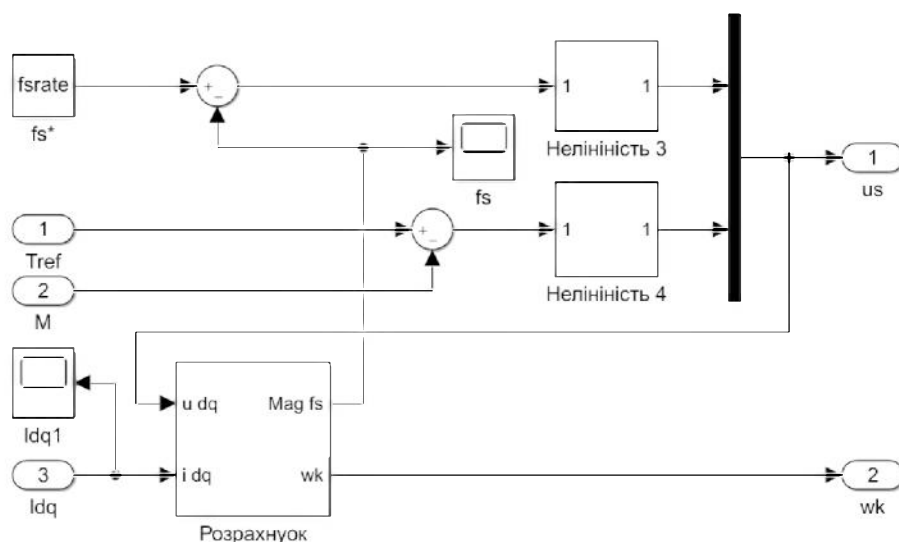
Зміна кутової швидкості з урахуванням нелінійності системи без навантаження



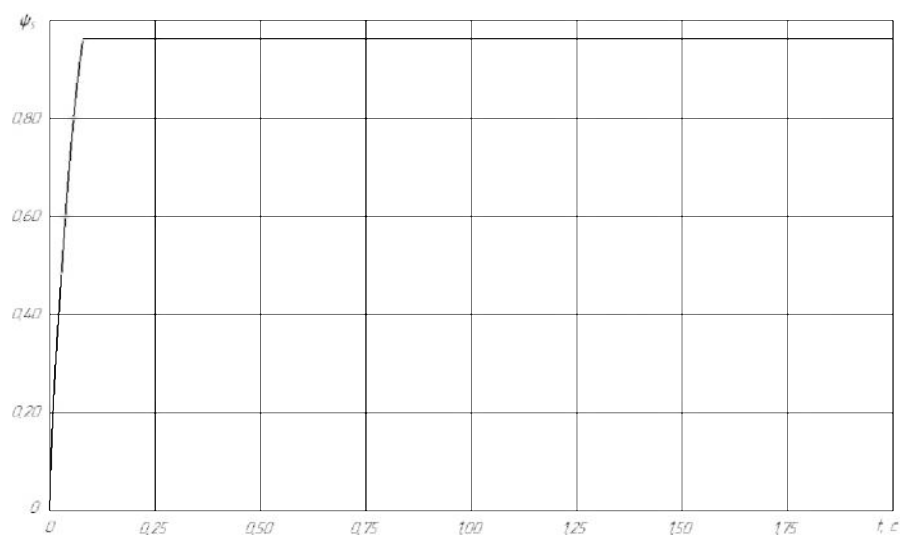
Зміна кутової швидкості з урахуванням нелінійності системи під навантаженням



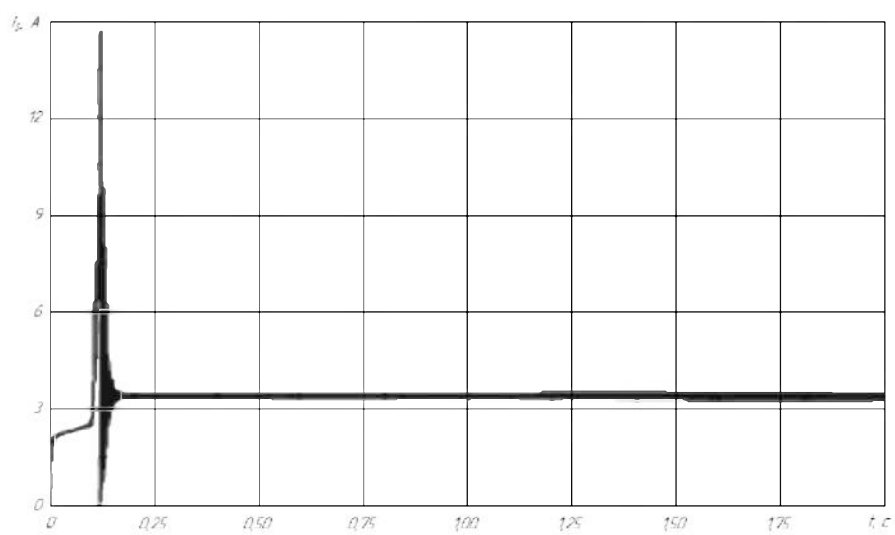
Математична модель системи векторного управління із застосуванням ШІМ з урахуванням нелінійності з контурами управління по швидкості, моменту і потокозчепленню



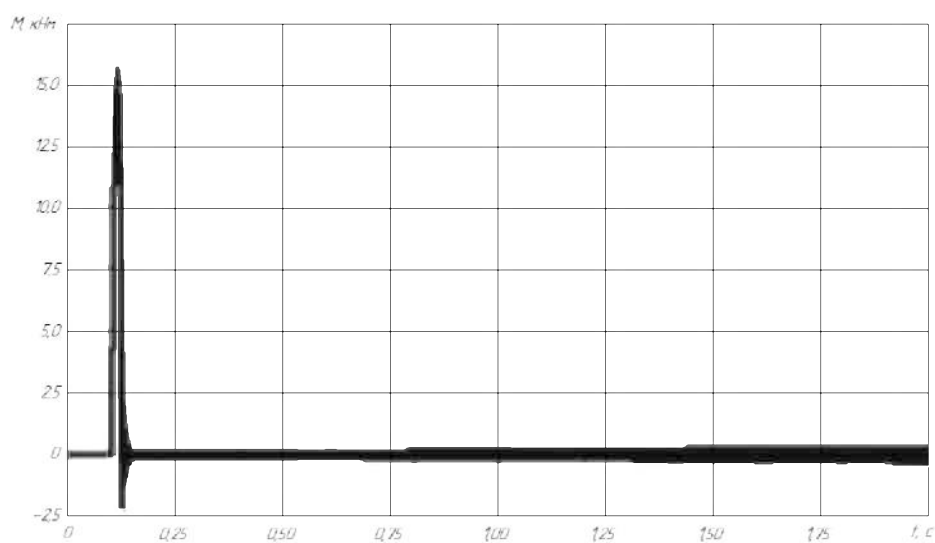
Склад підсистеми «Перетворювач» моделі системи векторного управління із застосуванням ШІМ з урахуванням нелінійності з контурами управління по швидкості, моменту і потокозчепленню



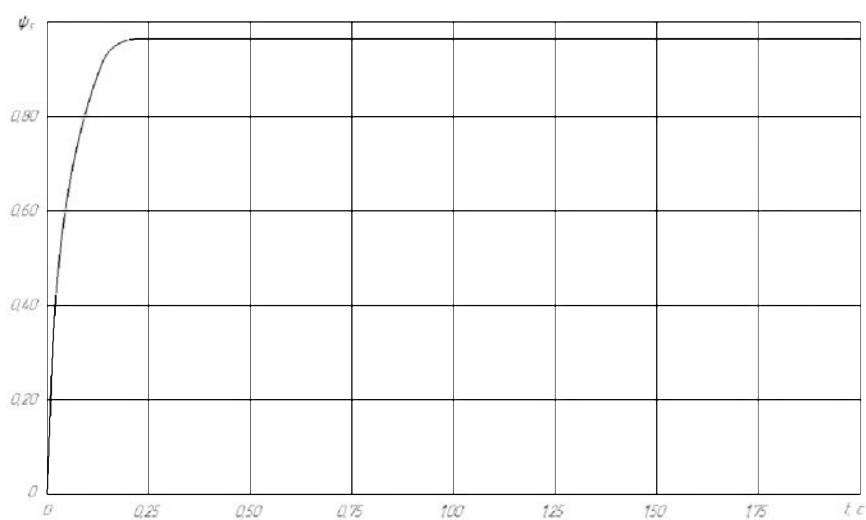
Перехідний процес по потокозчепленню без навантаження



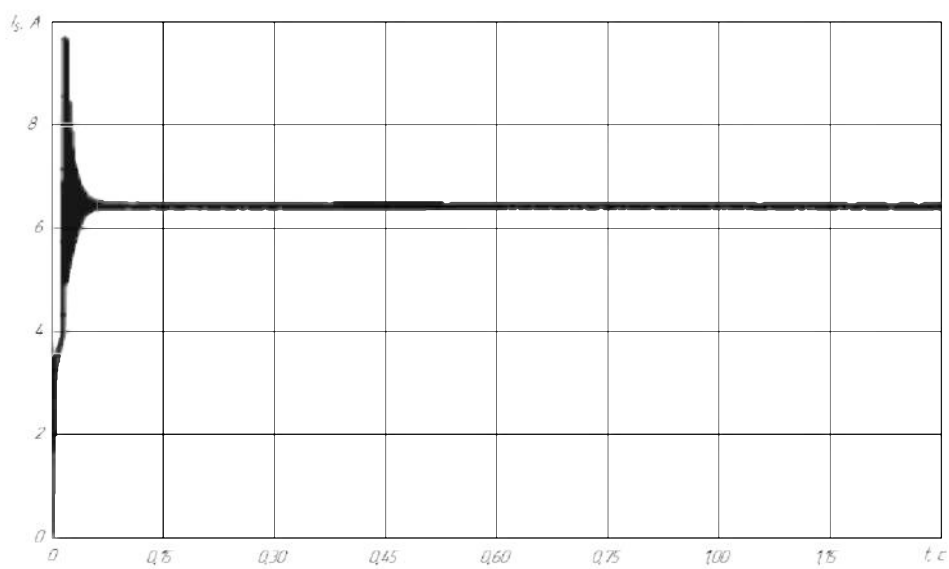
Перехідний процес зміни струму статора без навантаження



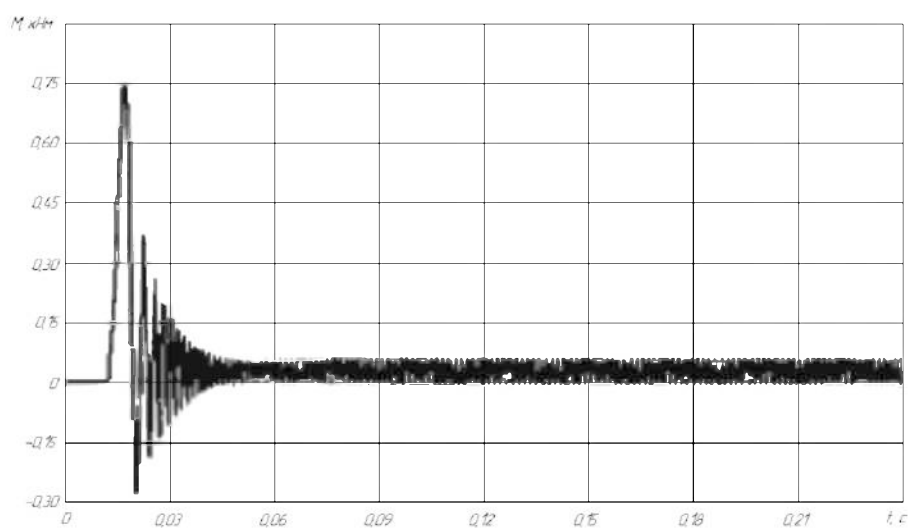
Перехідний процес зміни електромагнітного моменту без навантаження



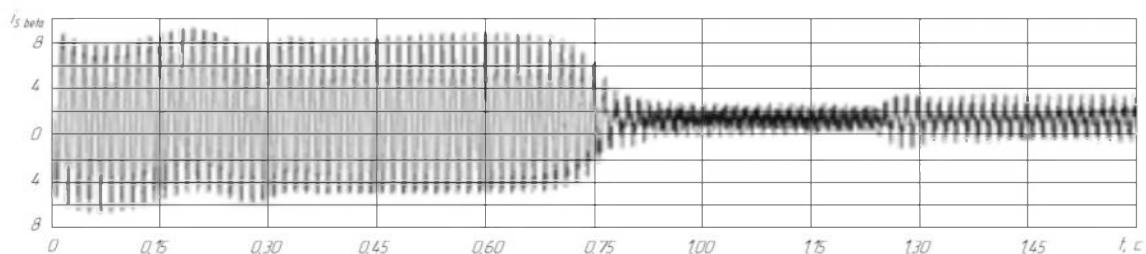
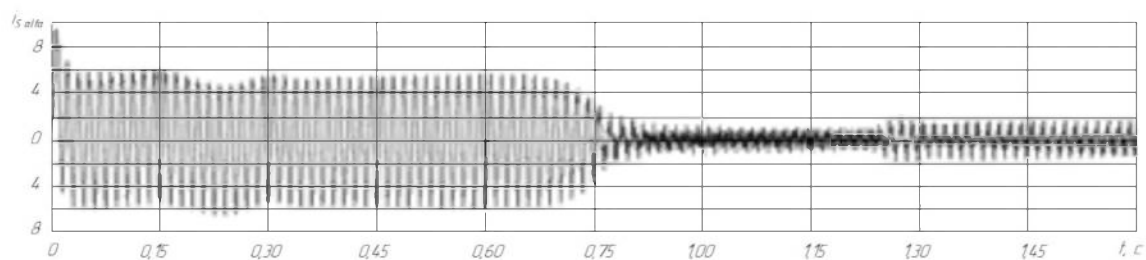
Перехідний процес по потокозчепленню під навантаженням



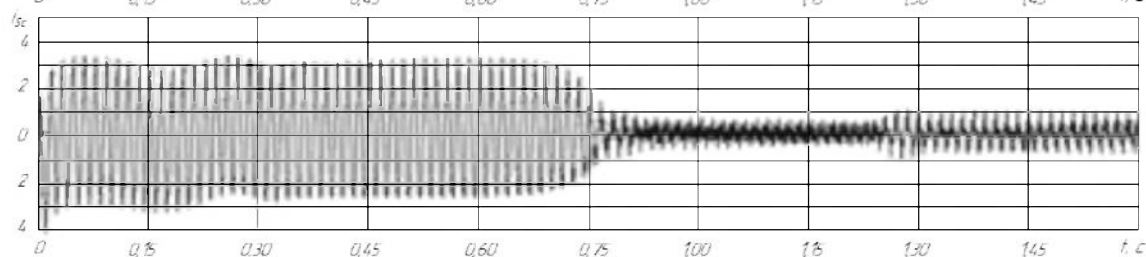
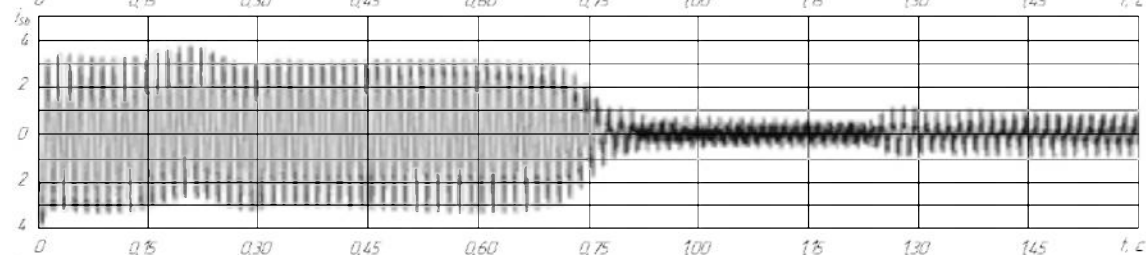
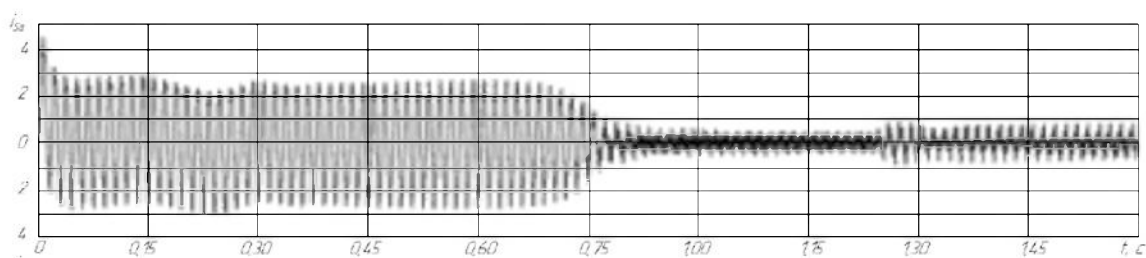
Перехідний процес зміни струму статора під навантаженням



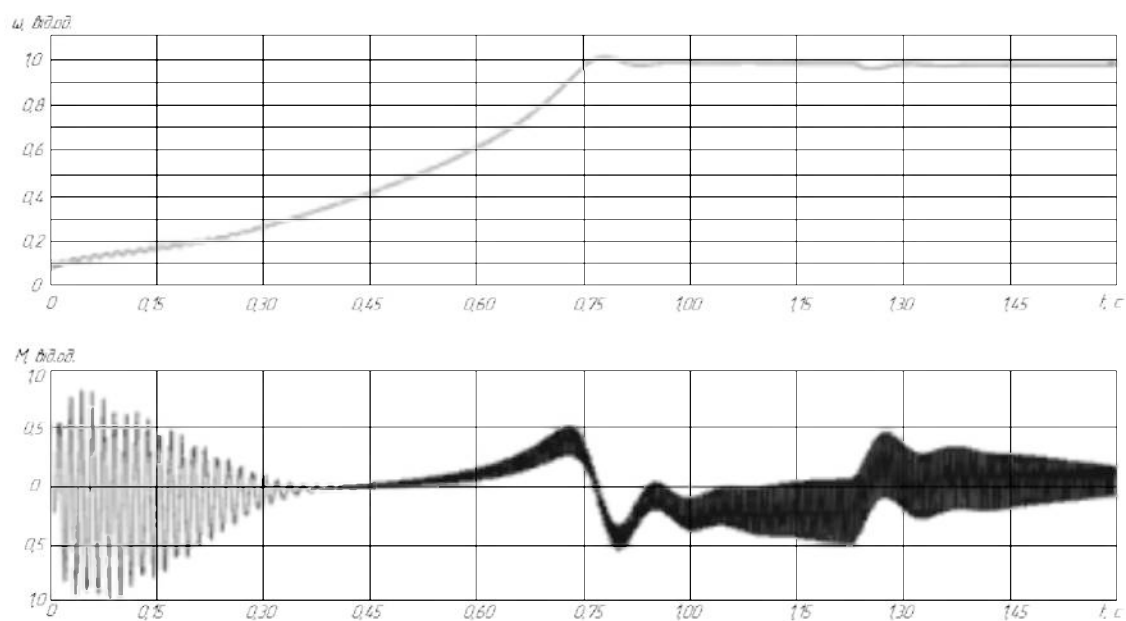
Перехідний процес зміни електромагнітного моменту під навантаженням



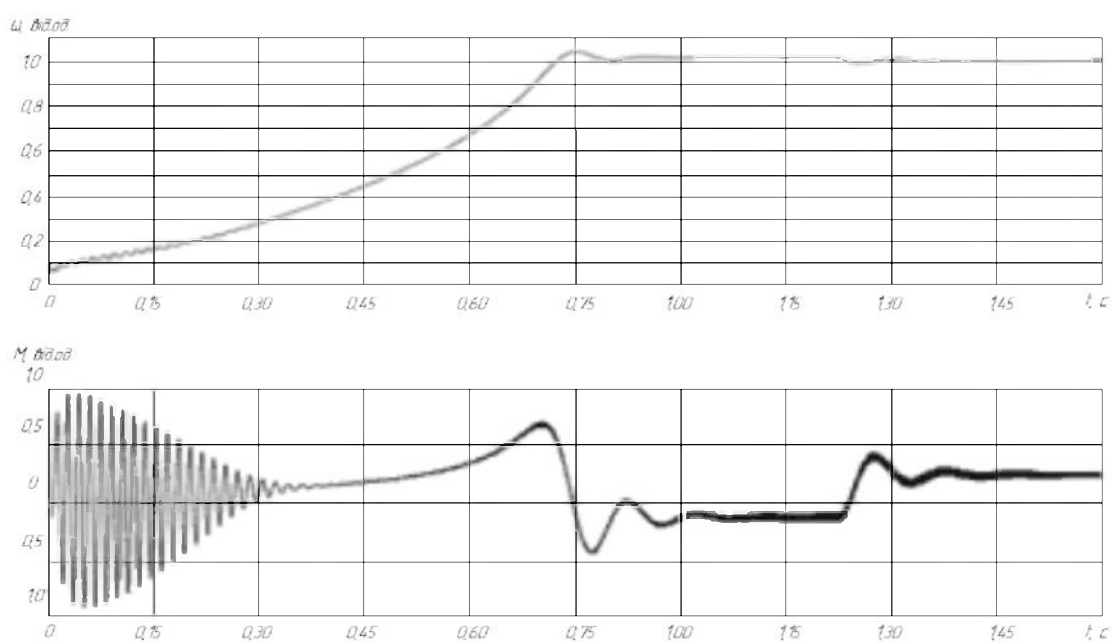
Графік зміни статорних струмів у нерухомій системі координат (α, β) у період пуску при опорній частоті



Графічні залежності, що ілюструють зміну статорних струмів у період пуску асинхронного двигуна при опорній частоті



Графік зміни швидкості обертання та крутного моменту на роторі асинхронного двигуна при прямому пуску при опорній частоті при опорній частоті



Графік зміни швидкості обертання та крутного моменту на роторі асинхронного двигуна при прямому пуску при опорній частоті при збільшеній у 10 разів опорній частоті

ДОДАТОК Б. ТЕХНІЧНІ УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ (ВИТЯГ)

2.3 Умови експлуатації

2.3.1 Умови експлуатації двигуна у частині впливу механічних факторів зовнішнього середовища – по групі М8 за ДСТУ 17516.1.

2.3.2 Двигун повинен безвідмовно працювати в таких умовах:

1) при температурі навколишнього повітря від плюс 35 °С до плюс 1 °С і відносній вологості 80 % при 25 °С – для кліматичного виконання УХЛ4 по ДСТУ 15150 і ДСТУ 15543.1;

2) при висоті над рівнем моря до 1000 м;

3) у вибухонебезпечному навколишньому середовищі, що не містить струмопровідного пилу, не містить парів речовин, що шкідливо впливають на ізоляцію. Запилення повітря не більше 10 мг/м³.

2.3.4 Двигун може працювати на висотах 4300 м над рівнем моря. Але при експлуатації двигуна на висоті вище 1000 м і до 4300 м над рівнем моря та температурі 40 °С потужність на валу необхідно знизити відповідно вказаному в табл. Б2.1.

Таблиця Б2.1 – Номінальна потужність двигуна при експлуатації на висоті

Висота над рівнем моря, м	Номінальна потужність, %	Висота над рівнем моря, м	Номінальна потужність, %
1000	100	3000	88
1500	98	3500	84
2000	95	4000	80
2400	93	4300	74

2.4 Конструктивно-технічні вимоги

2.4.1 Двигун виконується з одним вільним кінцем валу циліндрової форми за ISO/R 775.

2.4.2 Ступінь захисту двигуна – IP44 за ДСТУ EN 60034-5.

2.4.3 Спосіб охолодження двигуна – IC411 за ДСТУ EN 60034-6.

2.4.4 Конструктивне виконання електродвигуна за способом монтажу повинно бути IMB3 за ДСТУ EN 60034-7.

2.4.5 Система ізоляції класу нагрівостійкості F за ГОСТ 8865.

2.4.6 Рівень шуму не повинен перевищувати рівня, вказаного для класу 2 за ГОСТ 16372.

2.4.7 За рівнем вібрації двигуни повинні відповідати категорії нормальній N за ГОСТ 20815, середнє квадратичне значення віброшвидкості двигуна повинно бути не вище 1,8 мм/с.

2.4.8 Двигун повинен мати пристрій – клемну коробку – для підведення кабелів живлення, який розташовано на корпусі двигуна. Вона повинна мати клемну панель (колодку) та два штуцери.

2.4.9 Двигун повинен виконуватися з вбудованим температурним захистом за ДСТУ EN 60034-11, що складається з вмонтованого в обмотку статора кола терморезисторів типу СТ14 за ТУ11-85 ОЖО.468.165 ТУ.

2.4.10 Опір кола, що складається з трьох послідовно з'єднаних терморезисторів, в практично холодному стані двигуна при температурі навколишнього середовища $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ повинен знаходитися в межах від 120 до 450 Ом.

2.4.11 Двигун повинен виготовлятися на підшипниках кочення за ДСТУ ГОСТ 520 з розрахунковою довговічністю не менше 20000 годин. Підшипники – шарикові, радіальні однорядні з захисними шайбами за ГОСТ 7242.

2.4.12 Ротор двигуна повинен бути динамічно відбалансований. Допустимий дисбаланс для класу G2,5 відповідно ГОСТ ИСО 1940 – 1.

2.4.13 Для двигуна встановлюються показники надійності:

- 1) середній ресурс до капітального ремонту не менше 30000 год.;
- 2) середній наробіток до відмови не менше 25000 год.;
- 3) середній строк служби до списання не менше 20 років.

2.5 Вимоги безпеки

2.5.1 Електродвигун повинен відповідати вимогам ДСТУ EN 60204-1, ГОСТ 12.2.007.1, ДСТУ 8828 і ДСТУ 7237.

2.5.2 Двигун забезпечує захист осіб від ураження електричним струмом класу I за ДСТУ EN 61140. Тип захисту – захисне еквіпотенціальне з'єднання, вимоги до захисного з'єднання – уземлення відповідно ДСТУ EN 60204-1.

2.5.3 Монтаж, налагоджування і введення в експлуатацію двигуна повинні виконуватися з урахуванням вимог безпеки, що висуваються до уземлення двигуна, опору і електричної міцності ізоляції відповідно до вимог документів:

- ДСТУ EN 60204-1. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги;
- ДСТУ EN 61140. Захист проти ураження електричним струмом. Загальні аспекти щодо установок та обладнання;
- «Правила устаткування електроустановок»;
- «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів»;
- «Правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів».

2.5.4 Встановлений на об'єкті двигун повинен бути уземлений, один з затискачів уземлення встановлюється у клемній коробці, а другий на корпусі. Затискачі уземлення повинні мати пристрій для захисту від самовідгвинчування. Біля затискача уземлення повинен бути нанесений знак уземлення ІЕС 60417-5019, виконаний за ДСТУ EN 61140. Значення опору між болтом уземлення і кожною доступною для дотику металевою

неструмопровідною частиною двигуна, яка може виявитися під напругою, не повинне перевищувати 0,1 Ом.

2.5.5 Опір ізоляції обмотки статора від корпусу і між обмотками при нормальних кліматичних умовах навколишнього середовища, повинен бути не менше 10 МОм, при температурі близькій до робочої – не менше 3 МОм, при верхньому значенні вологості повітря – не менше 0,5 МОм.

2.5.6 Всі частини (муфта або деталі іншого механізму), що обертаються та розміщені на кінці валу двигуна, повинні бути захищені захисними кожухами.

2.6 Комплектність

2.6.1 У комплект постачання входять:

- двигун зі шпонкою – 1 шт.;
- паспорт – 1 шт.;
- технічний опис та інструкція з експлуатації.

2.7 Маркування

2.7.1 На двигуні повинна бути прикріплена паспортна табличка, яка виконується за ДСТУ 7232 із вказаними даними двигуна за ДСТУ EN 60034-1 і ГОСТ 18620. Для двигунів масою до 30 кг допускається на табличці масу не вказувати. Маркування виводів обмоток та напрямку обертання двигунів за ДСТУ EN 60034-8.

2.7.2 Маркування вантажної тари за ГОСТ 14192.

2.7.3 Експлуатаційна документація та маркування повинні бути виконані українською мовою.

2.8 Упакування

2.8.1 Упакування двигуна за ДСТУ-Н ISO/IEC Guide 41 та ДСТУ EN 13427.

2.8.2 Відправлення двигунів виконується в транспортній тарі за ДСТУ ISO 3394. Перевезення автомобільним транспортом, без перевантажень.

2.8.3 Консервація двигунів виконується на строк три роки гарматним змащенням за ГОСТ 19537 відповідно технологічної інструкції підприємства-виробника.

2.9 Правила приймання

2.9.1 Правила приймання повинні відповідати ДСТУ EN 60034-1 і ДСТУ 2365.

2.9.2 Для перевірки відповідності двигуна вимогам цих технічних умов установлюється категорія контрольних випробувань – приймально-здавальні за ДСТУ EN 60034-1.

2.10 Методи контролю

2.10.1 Методи випробувань двигуна повинні відповідати вимогам ГОСТ 7217 і ГОСТ 11828.

2.10.2 Конструктивне виконання за способом монтажу, способом охолодження двигуна, розташуванням клемної коробки, маркування паспоротної таблички перевіряють зовнішнім оглядом перед проведенням випробувань.

2.10.3 Комплектність постачання, маркування вантажу і транспортне маркування, консервацію й упакування перевіряють зовнішнім оглядом при упакуванні та відвантаженні.

2.10.4 Метод контролю установчих та приєднавчих розмірів двигуна – за ГОСТ 8592.

2.10.5 Випробування на нагрівання необхідно проводити в номінальному режимі роботи двигуна.

2.10.6 Визначення робочих характеристик, коефіцієнта потужності, ККД та ковзання проводити за ДСТУ EN 60034-2 та ГОСТ 7217.

2.10.7 Метод оцінки вібрацій двигуна – за ГОСТ 20815.

2.10.8 Метод визначення шумових характеристик двигуна – за ГОСТ 11929.

2.10.9 Методи випробувань ступеня захисту двигуна за ДСТУ EN 60034-5.

2.10.10 Випробування на стійкість до механічних зовнішніх факторів проводять за ДСТУ ІЕС 60068-1 та ДСТУ ІЕС 60068-2-6.

2.10.11 Випробування двигуна на стійкість до впливу вологості повітря проводять відповідно до ДСТУ 8280.

2.10.12 Випробування на вплив верхнього і нижнього значень температур (п. 2.3.2) проводять за ДСТУ 8280.

2.10.13 Оцінювання та контроль надійності за ДСТУ 2864 та ДСТУ 3004.

2.10.14 Перевірка вбудованого температурного захисту містить:

1) вимірювання опору ізоляції та випробування електричної міцності ізоляції кола терморезисторів;

2) перевірку роботи захисту при перевантаженні, проводиться при випробовуванні двигуна на нагрівання;

3) перевірку роботи захисту при короткому замиканні, проводиться на двигуні із загальмованим ротором, ввімкненому на номінальну напругу з холодного стану.

2.11 Транспортування і зберігання

2.11.1 Умови транспортування двигуна у частині впливу механічних факторів – за ГОСТ 30630.1.1, у частині впливу кліматичних факторів – за ГОСТ 15150.

2.11.2 Умови зберігання упакованого двигуна – за ГОСТ 15150.

2.11.3 Строк зберігання двигуна в пакуванні і з консервацією підприємства-виробника – три роки.

2.11.4 Складування двигунів як у заводському пакуванні, так і без

нього здійснюється в штабелях на стелажах і повинно забезпечувати збереження їх якості і товарного виду. Зберігання транспортного пакету допускається в два яруси.

2.12 Вказівки щодо експлуатації

2.12.1 Експлуатація двигуна повинна проводитися відповідно до «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів» і «Настанови з експлуатування та інструкції з обслуговування».

2.12.2 Перед монтажем двигун повинен бути очищений від змащення, а потім необхідно виміряти опір ізоляції. Якщо опір менше 5 МОм, то двигун треба піддати сушінню.

2.12.3 Двигун повинен бути уземлений. Необхідно також виключити можливість доступу до обертових частин і частин, по яким протікає струм. Заборонено роботу зі знятими кожухами і відкритою клемною коробкою.

2.12.4 Захист двигуна із вбудованим температурним захистом при перевантаженнях повинен забезпечувати замикач із застосуванням апаратів захисту, що спрацьовують при опорі кола терморезисторів у межах 1650-4000 Ом.

2.12.6 Двигун допускає роботу в режимах, що відрізняються від оговорених у 2.2.1 за умови, що перевищення температури обмотки статора, заміряне методом опору за ГОСТ 11828 не перевищує допустимої величини.

2.13 Гарантії виробника

2.13.1 Виробник гарантує відповідність двигуна вимогам цих технічних умов при дотриманні споживачем правил експлуатації, зберігання, транспортування і монтажу двигуна.

2.13.2 Гарантійний строк експлуатації двигуна три роки з дня введення в експлуатацію.

ДОДАТОК В. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА ДО
ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____