

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ ТА МЕХАТРОНІКИ



## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи магістра на тему:

**«Дослідження та вдосконалення роботи електроприводу  
живильників пилу парового котлоагрегату»**

Здобувач: Васильченко М.В.

II курсу, групи АЕМм-20

Керівник: доцент Бабіч В.Ф.

Кваліфікаційна робота магістра допускається до захисту.

Рішення кафедри від 17.06.2024 р., протокол № 12. \_\_\_\_\_

Завідувач кафедри ЕтаМ \_\_\_\_\_ Петро ОСАДЧУК

# ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Автоматизації та робототехніки

Кафедра: Електромеханіки та мехатроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр

Галузь знань: 14 – Електрична інженерія

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма: Інтелектуально-керовані електромеханічні системи

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Завідувач кафедри ЕтаМ

д.т.н., доц. Осадчук П.І.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

## **ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

здобувачу вищої освіти

**Васильченку Миколі Володимировичу**

Тема роботи: «Дослідження та вдосконалення роботи електроприводу вагоноперекидача».

Керівник роботи: Бабіч Владислав Федорович, к.т.н., доцент.

2 Затверджено наказом ОНТУ № 504-03 від 07.09.2024 р.

Строк подання студентом роботи: 07.06.2024 р.

3 Вихідні дані до роботи: Живильник пилу типу ПЛП-10, Продуктивність – 10 тон/год; рід струму – змінний; напруга – 380 В.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ. Актуальність теми. Мета дослідження. Об'єкт дослідження. Предмет дослідження. Задачі дослідження

- 1 Загальна характеристика науково-практичного напрямку роботи. Опис технологічного процесу генерування електричної енергії. Транспортування, зберігання та підготовка палива.
- 2 Розрахунково-конструкторська частина. Визначення параметрів живильників котлоагрегату як тоу та розробка аср живильників пилу. Опис конструкції та кінематична схема живильника. Вибір електродвигуна живильника пилу. Прямий пуск нерегульованого електроприводу живильників пилу. Вибір перетворювача частоти. Розрахунок параметрів електродвигуна. Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна. Побудова механічної характеристики електропривода. Побудова природної механічної характеристики двигуна. Побудова сімейства механічних характеристик. Побудова природної електромеханічної характеристики двигуна.
- 3 Дослідження роботи електропривода живильного насоса на моделі. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу насоса. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи насоса до і після модернізації.
- 4 Організаційна та технологічна частина. Організація та технологія монтажу, ремонту і обслуговування та техніка безпеки праці при обслуговуванні електропривода живильника пилу.
- 5 Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електро-приводу
- 6 Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.

Список використаних джерел. Додатки.

Перелік демонстраційного матеріалу: слайди презентації (22 шт.):

1 Титульний. 2 Мета, задачі, методи. 3 Технологічна ТЕС. 4 Розрахунок потужності двигуна, технічні характеристики. 5 Статичні характеристики електропривода. 6 Структурна схема

перетворювача частоти. 7 Принципова електрична схема силової частини. 8 Модель електроприводу насосу з прямим пуском. 9 Результати моделювання приводу з прямим пуском. 10. Модель модернізованого електроприводу живильного насоса. 11 Результати моделювання приводу після модернізації. 12 Висновки.

### 5 Консультанти розділів проекту (роботи)

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

6 Дата видачі завдання: 05.02.2024 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим.
1	Загальна характеристика науково-практичного напрямку роботи. Опис технологічного процесу генерування електричної енергії. Транспортування, зберігання та підготовка палива.	05.04.2024	
2	Розрахунково-конструкторська частина. Визначення параметрів живильників пилу котлоагрегату як тоу та розробка аспр живильників пилу. Опис конструкції та кінематична схема живильника. Вибір електродвигуна живильника пилу. Прямий пуск нерегульованого електроприводу живильників пилу. Вибір перетворювача частоти. Розрахунок параметрів електродвигуна. Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна. Побудова механічної характеристики електропривода. Побудова природної механічної характеристики двигуна. Побудова сімейства механічних характеристик. Побудова природної електромеханічної характеристики двигуна.	30.04.2024	
3	Дослідження роботи електропривода живильного насоса на моделі. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу насоса. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи насоса до і після модернізації.	25.05.2024	
5	Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.	10.06.2024	
6	Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.		
7	Попередній захист кваліфікаційної роботи магістра	17.06.2024	
8	Перевірка роботи на добросовісність. Рецензування роботи	18.06.2024	
9	Захист кваліфікаційної роботи магістра	26.06.2024	

Здобувач-дипломник \_\_\_\_\_ Васильченко М.В.

Керівник \_\_\_\_\_ Бабіч В.Ф.

*Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.*

*Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.*

Здобувач-дипломник \_\_\_\_\_ Васильченко М.В.

## РЕФЕРАТ

Васильченко М.В. «Розробка та вдосконалення роботи електроприводу живильників пилу парового котлоагрегату». Кваліфікаційна робота магістра. Одеса: ОНТУ, 2022. – 87 с. Іл.: 26. Табл.: 6.

В кваліфікаційній роботі наведено опис автоматизованого електроприводу живильників пилу парового котлоагрегат, галузь застосування та його конструктивні особливості. Були сформульовані вимоги до електроприводу, розраховані навантаження та обраний двигун привода живильників вугільного пилу.

В роботі було обґрунтовано вибір системи електроприводу «перетворювач частоти–асинхронний двигун», розглянуті закони управління за допомогою перетворювача частоти та обраний закон управління.

Проведені розрахунки електричних параметрів схеми заміщення двигуна. Було виконане моделювання перехідних процесів в двигуні при прямому пуску та в комплекті з перетворювачем частоти, побудовані механічні та електромеханічні статичні характеристики.

Розраховано економічний ефект модернізації даної установки, приведені заходи з охорони праці та техніки безпеки.

Ключові слова: котлоагрегат, живильник, вугільний пил, електропривод, перетворювач частоти, системи регулювання обертів.

## ABSTRACT

Vasylchenko MV «Research and improvement of the operation of the electric drive of dust feeders of a steam boiler unit». Qualifying work of the master. Odesa: ONTU, 2022. - 87 p. Fig .: 26. Table: 6.

The qualification work describes the automated electric drive of the dust feeders of the steam boiler unit, the field of application and its design features. The requirements for the electric drive were formulated, the loads were calculated, and the drive motor for the coal dust feeders was selected.

In the work, the choice of the electric drive system "frequency converter-asynchronous motor" was substantiated, the control laws using the frequency converter and the selected control law were considered.

The electrical parameters of the engine replacement scheme were calculated. Modeling of transient processes in the engine during direct start and complete with a frequency converter was performed, mechanical and electromechanical static characteristics were constructed.

The economic effect of the modernization of this installation is calculated, measures for occupational health and safety are given.

Key words: boiler unit, feeder, coal dust, electric drive, frequency converter, speed control systems.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ .....	8
ВСТУП.....	9
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНОГО НАПРЯМУ РОБОТИ .....	12
1.1 Опис технологічного процесу генерування електричної енергії .....	12
1.2 Транспортування, зберігання та підготовка палива .....	13
1.3 Короткий опис існуючої системи регулювання живильників пилу .....	17
2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЖИВИЛЬНИКІВ ПИЛУ КОТЛОАГРЕГАТУ ЯК ТОВ ТА РОЗРОБКА АСР ЖИВИЛЬНИКІВ ПИЛУ .....	19
2.1 Опис конструкції та кінематична схема живильника .....	19
2.2 Вибір електродвигуна живильника пилу.....	21
2.3 Прямий пуск нерегульованого електроприводу живильників пилу.....	23
2.4 Вибір перетворювача частоти.....	25
2.5 Розрахунок параметрів електродвигуна .....	31
2.6 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна .....	42
2.7 Побудова механічної характеристики електропривода .....	48
2.8 Побудова природної механічної характеристики двигуна .....	49
2.9 Побудова сімейства механічних характеристик .....	52
2.10 Побудова природної електромеханічної характеристики двигуна.....	53

					<b>KPM.EmM.141.504-03.5</b>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Дослідження та вдосконалення роботи електроприводу живильників пилу парового котлоагрегату</i>	<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розробив.</i>		<i>Васильченко М.</i>					6	87
<i>Керівник</i>		<i>Бабіч В.Ф.</i>						
<i>Реценз</i>								
<i>Зав. кафедри</i>		<i>Осадчук П.І</i>					<b>ОНТУ, АЕММ-12</b>	

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА .....	56
3.1 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електропривода при прямому пуску .....	56
3.2 Моделювання асинхронного електроприводу за скалярним законом з блоком 6-пульсного частотного перетворювача <i>Six Step VSI Induction Motor Driv</i> .....	58
3.3 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електропривода з векторним управлінням .....	66
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....	76
4.1 Визначення величини капітальних витрат нового варіанту .....	77
4.2 Розрахунок фонду заробітної платні .....	78
4.3 Розрахунок експлуатаційних витрат для базового і нового варіантів .....	80
4.4 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання .....	81
4.5 Розрахунок економічної ефективності .....	82
4.6 Техніко-економічне обґрунтування вибору системи електроприводу .....	82
5 РЕЗУЛЬТАТИВНА ЧАСТИНА .....	86
Висновки по кваліфікаційній роботі та пропозиції .....	86
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	87

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ

ТЕС – Теплова електростанція;  
АД – Асинхронний двигун;  
ЕП – Електропривод;  
ПЧ – Перетворювач частоти;  
АН – Автономний інвертор напруги;  
ШІМ – Широтно-імпульсна модуляція;  
ККД,  $\eta$  – Коефіцієнт корисної дії;  
 $\omega$  – Кутова швидкість (частота обертання), рад/с;  
М – Механічний момент сили, Н·м;  
Н, h – Тиск, Па;  
Q – Продуктивність, м<sup>3</sup>/с;  
Р, N – Потужність, Вт;  
I, i – Струм (сила електричного струму), А;  
 $\Psi$ ,  $\psi$  – Потокозчеплення, Вб;  
f – Частота, Гц;  
R, r – Електричний опір, Ом;  
T, t – Час, с;  
L, l – Індуктивність, Гн;  
S, s – Ковзання, %;  
J, j – Момент інерції, кг·м<sup>2</sup>.

## ВСТУП

Теплові електростанції мають дуже високим рівнем автоматизації, оскільки для них характерна безперервність протікають в них процесів. При цьому в будь-який момент часу кількість вироблюваної електричної енергії має відповідати навантаженню. Тому сучасні електростанції є високоавтоматизованим обладнанням.

1. Автоматизація котлів теплових електростанцій є одним з основних напрямків підвищення ефективності, зниження питомої витрати палива і забезпечення безаварійної роботи. Це дає істотні переваги і забезпечує зменшення кількості обслуговуючого персоналу, що підвищує продуктивність їх роботи і призводить до зміни характеру і зручність в роботі персоналу, підвищує точність підтримки параметрів випускається пара, підвищує безпеку праці і надійність роботи обладнання. Ефективність впровадження засобів автоматизації багато в чому залежить від якості налаштувань автоматичного регулятора. В даний час в теорії автоматичного управління розроблено безліч інженерних методів настройки автоматизованих систем і велика кількість книг по визначенню оптимальних параметрів, однак ці ефективні методи визначення оптимальних параметрів настройки систем автоматичного управління недостатньо використовуються в повсякденній практиці. Часто навіть оператори операцій і координатори **ПРОФЕСІЙНИХ ОРГАНІЗАЦІЙ** вибирають настройки регулятора, використовуючи тільки статичні характеристики елементів системи автоматичного управління. Це не гарантує роботу системи в перехідному режимі. Поряд зі зниженням вартості мікропроцесорів, вдосконалення технології виготовлення інтегральних схем дозволяє використовувати їх для автоматизації котелень.

Парові котли призначені для виробництва водяної пари, що досягається шляхом кип'ятіння води. Коли енергоблок працює в режимі реального часу, навантаження постійно змінюється, тому потужність з виробництва пари також повинна змінюватися. Для того щоб точно підтримувати необхідну кількість пара, необхідно змінити теплову потужність котлоагрегату. Цю проблему можна вирішити, змінивши продуктивність пілоприймача, що може бути забезпечено за допомогою частотно-регульованого електроприводу пілоприймача.

У даній кваліфікаційній роботі була досліджена і запропонована деформація для поліпшення електроприводу пилоприймача парового котла. Для реалізації даного проекту необхідно розрахувати потужність, вибрати електродвигун живильного насоса, вибрати систему управління, розробити базову електричну схему електроприводу, розробити математичну модель автоматизованої системи електроприводу, проаналізувати роботу на комп'ютері, розглянути проект з точки зору з економічної точки зору, виділіть питання безпеки.

### **Актуальність теми**

Актуальність даної теми визначається необхідністю забезпечення стабільної та економічної роботи живильного насоса з використанням сучасних методів частотного регулювання.

### **Мета дослідження**

Метою даної роботи є дослідження і вдосконалення електроприводу пилоприймача котлоагрегату теплової електростанції зі скалярним і векторним регулюванням частоти, що дозволяє поліпшити якісні показники регулювання подачі вугільного пилу і підвищити надійність і енергоефективність роботи котлоагрегату..

### **Об'єкт дослідження**

Об'єктом дослідження є процеси керування асинхронним електроприводом.

### **Предмет дослідження**

Предметом дослідження є асинхронний електропривод з векторним частотним керуванням.

### **Задачі дослідження**

1. Проаналізувати технічні характеристики, проблеми управління та особливості роботи пилживильника.

2. Запропоновано структуру системи управління та оптимізовано параметри схеми керування електроприводом.

3. На основі структури запропонованої системи управління розробити математичну модель асинхронного електроприводу з використанням векторно-частотного управління.

4. Провести аналіз динамічних властивостей електроприводу пилживильника

.

# 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНОГО НАПРЯМУ РОБОТИ

## 1.1 Опис технологічного процесу генерування електричної енергії

Теплоелектростанції (ТЕС) забезпечують постачання споживачів електричною енергією (рис. 1), що виробляється за рахунок спалювання органічного палива. Зазвичай їх будують поблизу родовищ палива, щоб уникнути дорогого транспортування.

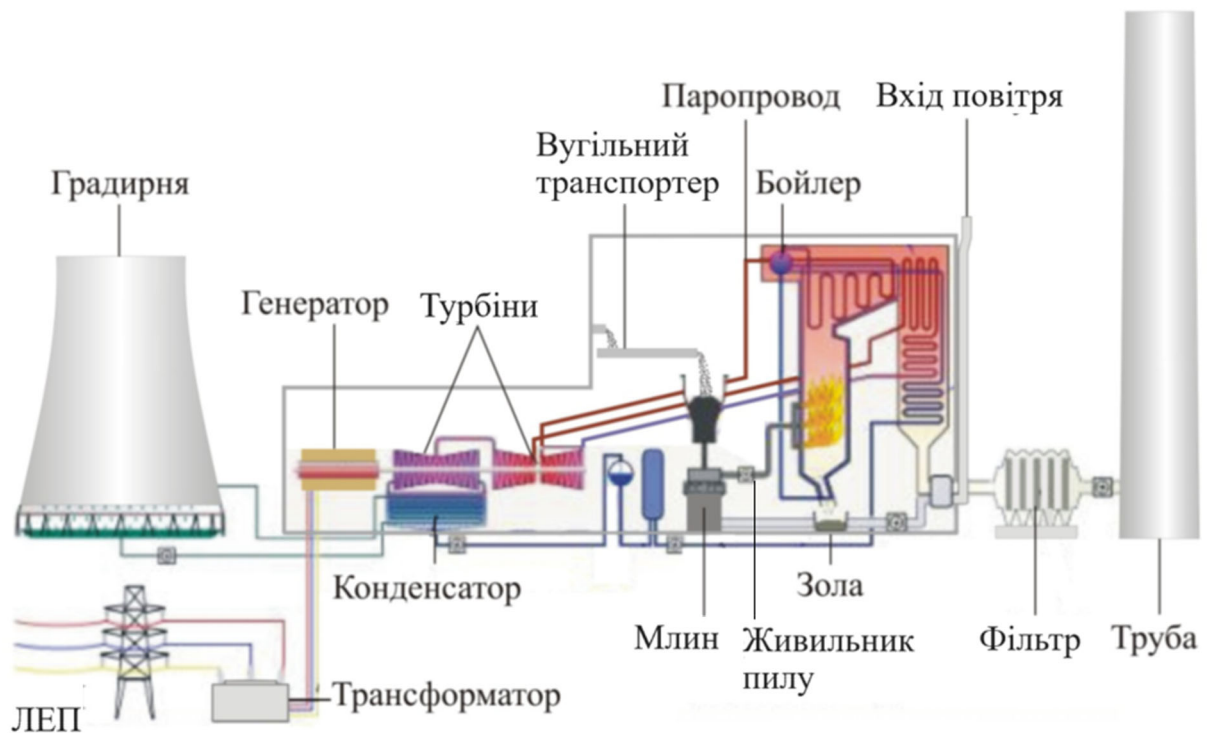


Рис. 1.1. Принципова схема роботи ТЕС

Принцип дії ТЕС ґрунтується на одержанні в парогенераторі водяної пари високого тиску з температурою  $540^{\circ}\text{C}$  за рахунок спалювання вугільного пилу, газу або мазуту. Отримана пара надходить до турбіни, де її потенційна енергія перетворюється на кінетичну енергію обертання ротора турбіни та електрогенератора. Відпрацьована пара потрапляє в конденсатор, усередині якого

розташовані латунні трубки, якими циркулює охолоджувальна вода. Пара обтікає трубки, конденсується, стікає і видаляється. Отримана вода надходить у деаератор, де видаляється кисень і додається очищена вода, а з деаератора вода потрапляє назад у котел. Процес отримання електроенергії ведеться безперервно.

Витрата охолоджувальної води становить 50 - 100 кг/1 кг пари.

Для охолодження води, підігрітої в конденсаторі, споруджуються градирні - зазвичай гіперболічні - вежі заввишки від 55 м до 150 м. Градирні бувають випарні (вода стикається з потоком повітря і охолодження відбувається, в основному, за рахунок випаровування) і сухі або радіаторні (для розсіювання теплоти використовується ефект теплопередачі). Втрати води в цьому випадку практично відсутні.

## **1.2 Транспортування, зберігання та підготовка палива**

Вугілля на ТЕС доставляється залізницею. Система паливоподачі сучасних ТЕС - це складний комплекс машин і механізмів, призначених для розвантаження залізничних потягів, зберігання, дроблення, розморожування і внутрішньостанційного транспортування палива за допомогою системи конвеєрних галерей і естакад. Розвантаження палива з вагонів здійснюється роторними вагоноперекидачами (рис. 1.2. (5)), з подальшим дробленням. Склади твердого палива можуть бути як відкритими, так і закритими. Закриті склади споруджують на ТЕЦ, розташованих у великих містах, в умовах обмеженої забудови і у віддалених північних районах. Вугілля, що надійшло на естакаду паливоподачі (рис. 1.2. (6)), прямує в дробильний пристрій (рис. 1.2. (8)), де проходить другу стадію дроблення, а потім - у головний корпус. Стрічковими конвеєрами галереї головного корпусу вугілля подають у бункери сирого вугілля (рис. 1.3. (11)). Паливо з бункерів сирого вугілля надходить на стрічкові живильники сирого вугілля (ПСУ - А,Б). Шляхом зміни швидкості стрічки від відповідного регулятора завантаження млина, регулюється подача палива в млин (рис. 1.3. (9)).

Вугілля, що надходить до барабана млина, піддається процесу розмелювання і сушіння. Вугільний пил, досягаючи завислого стану в потоці сушильно-вентилюючого агента, виноситься ним із барабана.

Паралельно з процесом розмелювання вугілля в барабані млина йде транспортування готового пилу певного фракційного складу і вологості потоком сушильно-вентилюючого агента.

Для сепарації пилу служить повітряно-прохідний відцентровий сепаратор.

Після сепаратора потік пилоповітряної суміші надходить до циклону, де відбувається відділення пилу від повітря. Пил під впливом відцентрових сил відкидається до стінки циклону, накопичується в його нижній частині і через течку пилу, на якій встановлені клапани, обсипається в бункер пилу.

Бункер пилу служить для розподілу пилу по пиложивильниках.

Подача пилу з проміжного бункера в пилопроводи здійснюється шістнадцятьма лопатевими пиложивильниками типу ППЛ-10, продуктивністю 10т/год кожен, встановленими в нижній частині бункера.

Транспортування пилу до пальників здійснюється потоком сушильно-вентилюючого агента, що скидається з тракту пилосистеми в топку через пилопровід під напором двох млинових вентиляторів типу ВМ-180/1100.



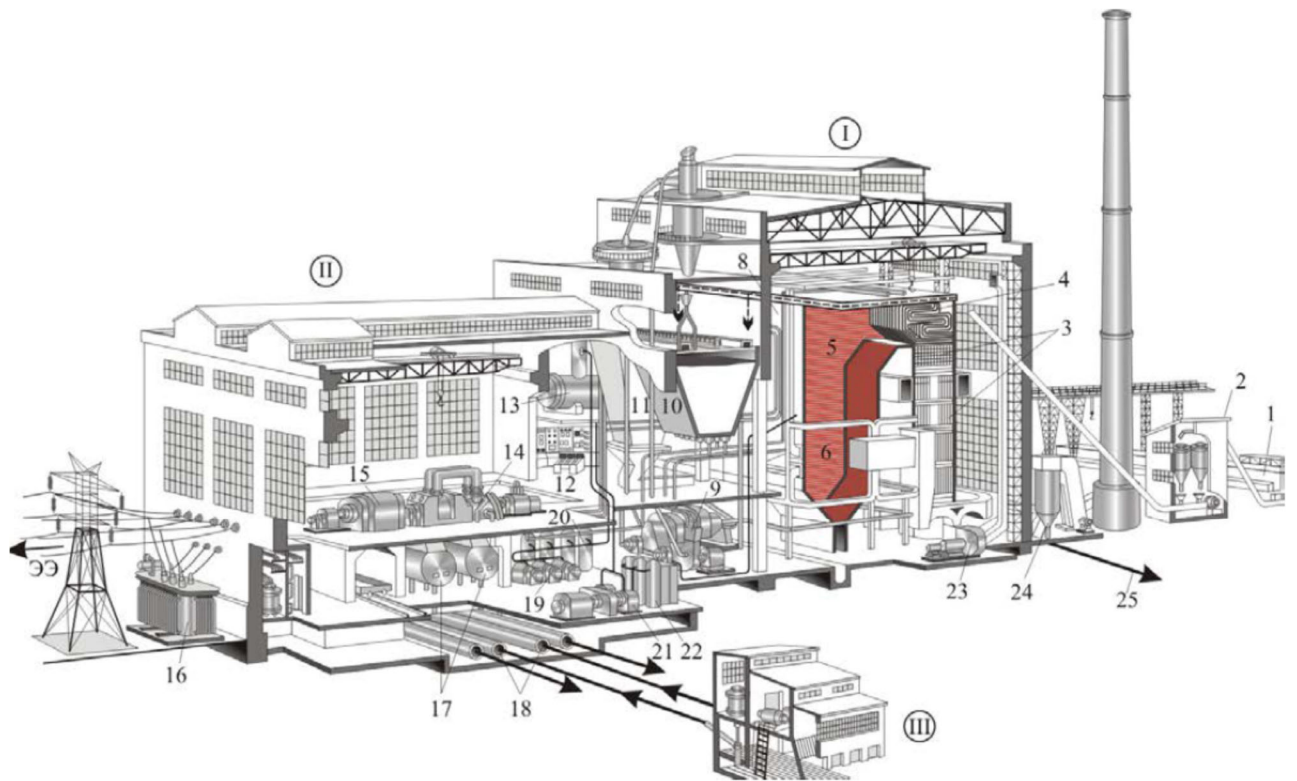


Рис. 1.3. Просторовий розріз головного корпусу ТЕС на твердому паливі

I - котельне відділення; II – машинне відділення (машинний зал); III – берегова водонасосна установка; 1 – вугільний склад; 2 – дробильна установка; 3 – водяний економайзер; 4 – пароперегрівач; 5 – паровий котел; 6 – топкова камера; 7 – пиловугільні пальники; 8 – паропровід від котла до турбіни; 9 – шаро-барабанний вугільний млин; 10 – бункер вугільного пилу; 11 – бункер сирого вугілля; 12 – щит керування блоком електростанції; 13 – деаератор; 14 – парова турбіна; 15 – електричний генератор; 16 – електричний підвищуючий трансформатор; 17 – парові конденсатори; 18 - трубопроводи охолоджувальної води; 19 – конденсатні насоси; 20 - регенеративні підігрівачі низького тиску; 21 – живильний насос; 22 – регенеративні підігрівачі високого тиску; 23 – дутьовий вентилятор; 24 - золоуловлювач; 25 - шлак, зола; ЕЕ – електрична енергія

### 1.3 Короткий опис існуючої системи регулювання живильників пилу

Для приводу пиложивильників використовуються шістнадцять електродвигунів постійного струму типу ПБ62У2 потужністю 6 кВт кожний ( $U = 220\text{В}$ ,  $I = 31\text{ А}$ ,  $n = 2900\text{ об/хв.}$ ), встановлених на позначці 25 м. котельного відділення.

Для групового безступінчатого регулювання частоти обертання електродвигунами постійного струму живильників пилу і сирого вугілля використовується система безступінчастого регулювання (СБР). Продуктивність пиложивильників регулюється шляхом зміни швидкості обертання приводного електродвигуна.

Пилосистему оснащено засобами централізованого контролю, дистанційного та автоматичного контролю, сигналізації, блокувань і захистів, що дають змогу вести режим її роботи з БЩУ.

Для групового безступінчастого регулювання частоти обертання електродвигунів постійного струму живильників пилу використовується система безступінчастого регулювання (СБР), що складається з чотирьох тиристорних перетворювачів типу ТЕ4-100/230. При цьому регулювання частоти обертання електродвигунів здійснюється одночасним впливом на зміну магнітних потоків головних полюсів за допомогою плавної зміни напруги на обмотках групи електродвигунів:

- група1 (ниткаА-8шт);
- група2 (ниткаБ-8шт);

Після проведення обстеження технічного стану системи ПП котла енергоблока ст. 4 є такі зауваження і недоліки:

- тиристорні перетворювачі ТЕ4-100/230 енергоблока №4 перебувають в експлуатації з 1988 року. Згідно з інструкцією з експлуатації, термін служби тиристорних перетворювачів становить 10 років або 10 000 годин (згідно з ОДЖ 468.249. Паспорт. Агрегат тиристорний неререверсивний АТ-100-230-У4);

- малоефективна робота системи вентиляції і, як наслідок цього, наявність високої температури в приміщенні РУСН-0,4 кВт 4ПП, де розташовані панелі тиристорних перетворювачів і трансформатори живлення, що негативно впливає на надійність зазначеної апаратури;

- відзначено низьку надійність електродвигунів постійного струму ПП у зв'язку з необхідністю працювати в умовах високих температур у межах до +450С і підвищеної запиленості вугільним пилом, а також наявністю щіткового апарату, який потребує періодичного контролю і заміни щіток;

- відзначено частий вихід з ладу реле типу РП-25 («розбивання» підп'ятника якоря через часте їхнє спрацьовування), реле типу РВ-235 (заклинювання годинникових механізмів) у схемі управління ПСУ;

- відзначено відмови елементів регуляторів ПП

У разі аварійного відключення або виведення в ремонт однієї з шаф СБР виводяться з роботи 4 живильники пилу.

Для підвищення надійності та точності керування ПП передбачається заміна електродвигунів постійного струму пилоривильників на трифазні асинхронні електродвигуни змінного струму з короткозамкненим ротором. Для керування продуктивністю буде використовуватися перетворювач частоти ПЧ.

## 2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЖИВИЛЬНИКІВ ПИЛУ КОТЛОАГРЕГАТУ ЯК ТОУ ТА РОЗРОБКА АСР ЖИВИЛЬНИКІВ ПИЛУ

### 2.1 Опис конструкції та кінематична схема живильника

Живильник ППЛ складається з таких основних вузлів: приймального бункера із затвором, дозатора, запобіжної муфти, черв'ячного редуктора, сполучної муфти та електродвигуна.

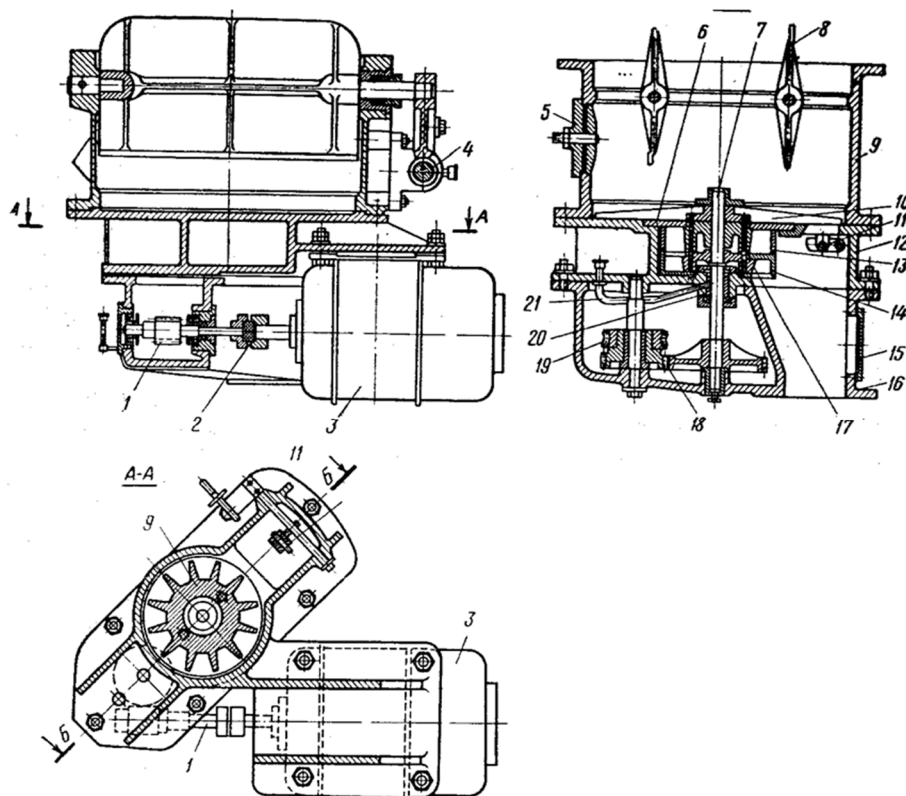


Рис. 2.1 – Живильник ППЛ-10

1 – черв'ячний вал; 2 – сполучна муфта; 3 – електродвигун; 4 – черв'як приводу шиберів; 5 – лючок; 6 – кришка коробки; 7 – основний вал; 8 – поворотний шибер; 9 – верхня частина корпусу; 10 – ворошитель; 11 – відвідний клапан; 12 – середня частина корпусу; 13 – коробка колеса, що подає; 14 – коробка вимірювального колеса; 15 – нижній лючок; 16 – нижня частина корпусу; 17 – мірювальне колесо; 18 – зубчасті колеса; 19 – черв'ячне колесо; 20 – сальникове ущільнення валу; 21 – трубка для підведення мастила

Вугільний пил з пилового бункера надходить у приймальний бункер живильника ППЛ і через отвори в крищі дозатора проходить у комірки подавального колеса дозатора, яке під час обертання подає вугільний пил у комірки мірильного колеса дозатора, звідки пил виходить у пиловидатний патрубок і далі надходить у пилопровод, що веде до пальників котельного агрегату.

Продуктивність пиложивильників регулюється шляхом зміни швидкості обертання приводного електродвигуна.

Для розрахунку потужності двигуна побудуємо кінематичну схему живильника пилу (рис. 2.2.). Обертальний момент від двигуна передається ворошителю, подавальному та дозуючому колесам через сполучну муфту, червячну та зубчасту передачу.

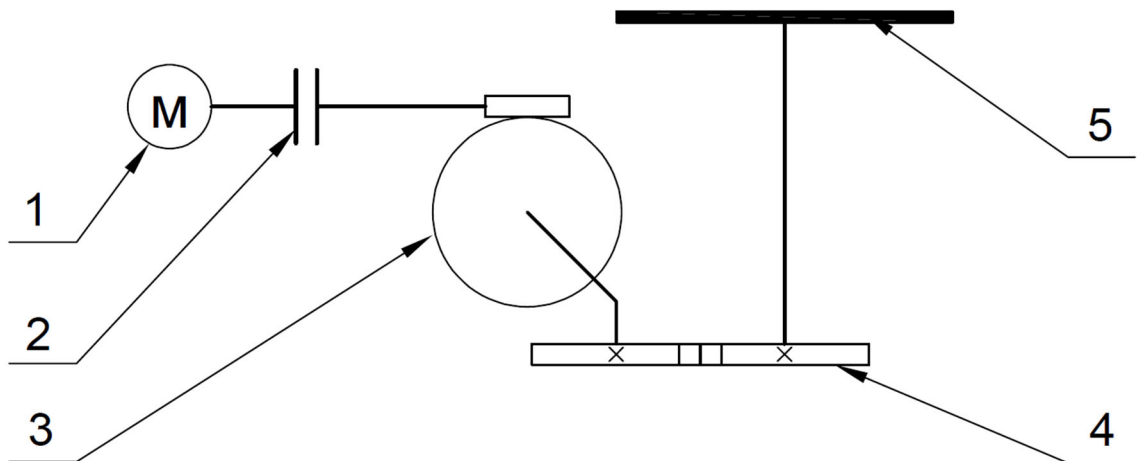


Рис. 2.2 – Кінематична схема живильника пилу

1 – електродвигун; 2 – сполучна муфта; 3 – черв'ячний передача; 4 – зубчата передача; 5 – ворошитель, подавальне та дозуюче колеса;

## 2.2 Вибір електродвигуна живильника пилу

Розрахуємо максимальний крутний момент механізму. Конструкція живильника розрахована на максимальну продуктивність 10 тон/год при частоті обертання привідного валу 2900 об/хвилину. Таким чином максимальна частота обертання становить:

$$\omega_{MAX}^{ДВ} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{2900}{60} = 304 \text{ рад/с}$$

Радіус робочого колеса ворухителя складає 0,2 метри. Миттєва витрата вугільного пилу складає 2,77 кг/с. Таким чином крутний момент на валу ворухителя буде складати:

$$M_{MAX}^{ВОР} = \frac{Q \cdot g}{0.2} = \frac{2.77 \cdot 9.8}{0.2} = 135,73 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Крутний момент на валу двигуна складатиме:

$$M_{MAX}^{ДВ} = \frac{M_{MAX}^{ВОР}}{i_{ЧП} \cdot i_{ЗП}} = \frac{135,73}{3.21 \cdot 3} = 14.06 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

ККД механічної передачі приймаємо рівним 0,8. Таким чином, потужність двигуна при максимальній продуктивності буде становити:

$$P_{MAX}^{ДВ} = \frac{M_{MAX}^{ДВ} \cdot \omega_{MAX}^{ДВ}}{\eta} = \frac{14.06 \cdot 304}{0.8} = 5342 \text{ Вт}$$

За розрахованою потужністю підбирається тип електродвигуна та визначаються його характеристики.

За отриманими даними обираємо асинхронний електродвигун типу АИР100L2 категорії розміщення У2, виконання ІМ1082 потужністю 5,5 кВт, дані якого наведено у таблиці 2.1, а зовнішній вигляд – на рисунку 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики електродвигуна АИР100L2

Тип	АИР100L2
$P$ , кВт	5,5
Номінальна частота обертання, об/хв	2900
ККД, %	85,7
$\cos \varphi$	0,88
Номінальний струм, А	11,1
$I_{п}/I_{н}$	7,5
$M_{п}/M_{н}$	2,2
$M_{max}/M_{н}$	2,3
$M_{min}/M_{н}$	1,6
Момент інерції $J$ , кг*м <sup>2</sup>	0,008
Маса, кг	31,5

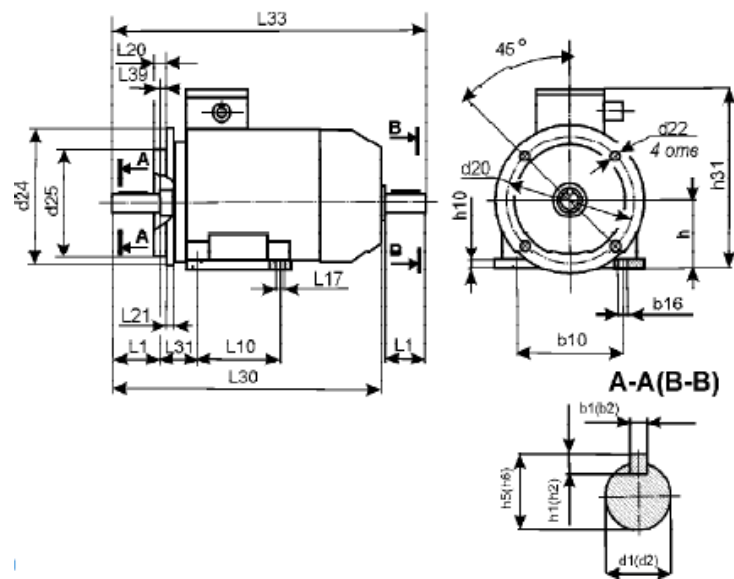


Рисунок 2.3 – Електродвигун АИР100L2 IM1081

Параметри електродвигунів АИР100L2 ІМ1081 5,5 кВт 3000 об/хв:

Тип – загальнопромисловий трифазний асинхронний;

Режим роботи – тривалий S1;

Термічний клас ізоляції обмоток F – до 150 °С;

Тип корпусу – силумін;

Ступінь захисту від вологи та пилу – IP54;

Діаметр жили обмоткового проводу – 1,12 мм;

Вага мідної проводки – 4,5 кг;

Розшифрування позначення АИР100L2У2ІМ1081:

АИР – тип електродвигуна

100 – умовний габарит

L – позначення довжини сердечника

2 – число пар полюсів

У2 – категорія розміщення

ІМ 1081 – монтажне виконання – лапи

Електродвигуни типу АИР100L2 5,5 кВт 3000 об/хв виробляються в Україні, Білорусії, Китаї та ін.

### **2.3 Прямий пуск нерегульованого електроприводу живильників пилу**

Прямий пуск асинхронного двигуна виконується за простою схемою підключення за допомогою традиційних релейно-контактних комутаційних апаратів (рисунок 2.4). Такий електропривод є нерегульованим, підтримує оберти, що відповідають точці перетину механічних характеристик двигуна та навантаження при частоті мережі 50 Гц. Такі електроприводи використовуються в схемах з дросельним принципом регулювання технологічного параметру, наприклад, з направляючим апаратом, включеним послідовно з вентилятором для підтримання заданого значення тиску повітря в пальнику котла. Їх перевагою є простота схеми підключення електроприводу вентилятора, недолік – значні пускові струми та

моменти, що перевищують номінальні в 5...8 разів, що може спричинити механічні та гідравлічні удари в електричній та гідравлічній мережах.

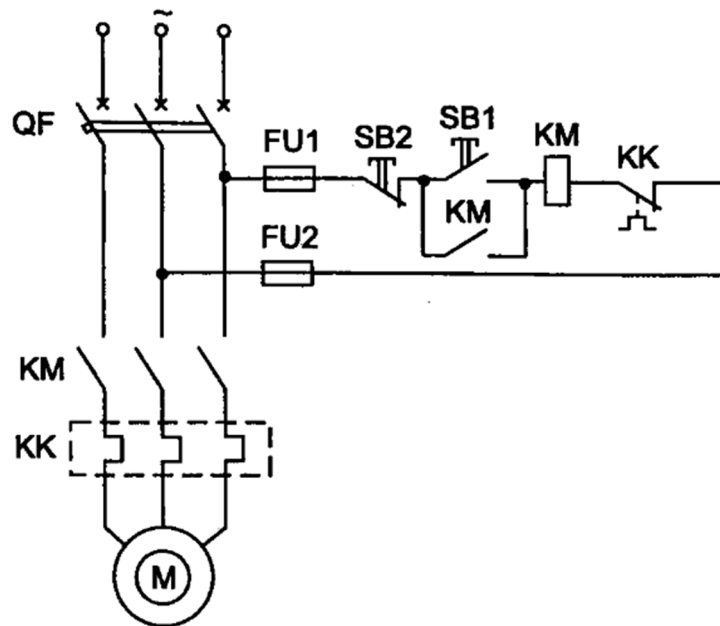


Рисунок 2.4 – Схема принципова електрична нерегульованого асинхронного електроприводу

Пуск електроприводу здійснюється за допомогою кнопки «Пуск» *SB1*, замикання якої включає напругу на обмотку магнітного контактора *KM*. Три контакти контактора підключають трифзну напругу до обмоток статора двигуна *M*, а четвертий контакт – шунтує кнопку *SB1* і виконує самопідхват конитактора *KM*. Оберти ротора двигуна постійні і не регулюються, тому потрібні витрати живильної води встановлюються зміною гідравлічного опору мережі, що є неефектним з точку зору енергозбереження. Захист двигуна від перевищень струму з боку електричної мережі здійснюється автоматичним вимикачем *QF*, а від перегрву при тривалих перевантаженнях – тепловим реле *KK*. Зупинка двигуна здійснюється кнопкою «Стоп» *SB2*.

## 2.4 Вибір перетворювача частоти

При виборі перетворювача за потужністю слід враховувати наступні моменти:

– паспортна потужність частотного перетворювача повинна бути більшою або дорівнювати паспортній потужності двигуна. При цьому треба враховувати те, що згідно з міжнародними стандартами для електродвигунів поняття потужність в відноситься до механічної потужності двигуна на валу, а не до споживаної від джерела живлення активної потужності, як це прийнято для інших споживачів електричної енергії.

– номінальний робочий струм частотного перетворювача завжди повинен бути більше номінального струму, споживаному електродвигуном, в іншому випадку електропривод блокуватиметься помилково за «перевищенням струму».

– потрібно також враховувати те, що пусковий струм двигуна обмежується перетворювачем за рівнем (120...170% від номінального струму частотного перетворювача) і за часом дії (звичайно до 60 с), тому, умови прямого пуску двигуна і пуску двигуна від перетворювача частоти відрізняються. При подачі номінальної напруги від мережі на двигун пускачем, пусковий струм може досягати  $7 \cdot I_n$ , а в умовах «важкого пуску»  $12 \cdot I_n$ .

Обираємо перетворювач частоти виробництва фірми LG Starvert iG5A технічні характеристики якого наведені в таблиці 2.2, зовнішній вигляд і розміри – в таблиці 2.3 і рисунку 2.5.

Таблиця 2.2 – Основні параметри ПЧ фірми LG Starvert iG5A

Параметр	Значення
Тип	SV055 iG5A-4
Номінальна потужність двигуна, кВт	5,5 кВт
Вихідні параметри	
Навантажувальна здатність	9,1 кВА
Струм при повному навантаженні	12 А
Напруга	3 фази, 380...480 В
Частота	0...400 Гц
Вхідні параметри	
Напруга	3 фази, 380...480 В
Частота	50...60 Гц ( $\pm 5\%$ )
Керування	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V/f</math> керування</li> <li>• Векторне керування без датчика</li> </ul>
Дискретність частоти налаштування	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Цифрова: 0,01 Гц (менше 99 Гц)</li> <li>• 0,1 Гц (100 Гц і більше)</li> <li>• Аналогова: 0,06 Гц при 60 Гц</li> </ul>
Точність налаштування частоти	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Цифрова: 0,01% від макс. частоти на виході</li> <li>• Аналогова: 0,1% від макс. частоти на виході</li> </ul>
U/f-характеристика	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Лінійна, Квадратична, Користувача</li> </ul>
Допустиме перевантаження	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 хвилина при 150%</li> <li>• 30 секунд при 200%</li> </ul>
Форсування моменту	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Автоматичне, ручне (0...15%)</li> </ul>
Багатофункціональні входи	5 перепрограмованих входів
Аналоговий вхід	0...10 В лінійний

Параметр	Значення
Вхідний сигнал	
Способи керування	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Вбудована панель керування</li> <li>• Багатофункціональні входи</li> <li>• Керування по протоколу ModBus</li> </ul>
Завдання частоти	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Аналоговий сигнал: 0-10 В, 4-20 мА</li> <li>• Панель керування</li> <li>• Комунікаційний порт (ModBus)</li> </ul>
Багатоступеневе керування	До 8 уставок швидкості (з використанням багатофункціональних входів)
Вибір часу розгону/гальмування	0,1...6000 с. Максимум 8 уставок з використанням багатофункціональних входів
Функції керування	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Гальмування постійним струмом</li> <li>• Обмеження частоти</li> <li>• Скачки частоти</li> <li>• Другий набір параметрів</li> <li>• Компенсація проковзування</li> <li>• Попередження реверсу</li> </ul>
Аварійна зупинка	Відключення силового виходу перетворювача
Автоматичний режим	По внутрішній логіці через налаштування багатофункціонального входу (5 каналів x 8 кроків)
<i>Jog</i> -режим	<i>Jog</i> -керування
Перезапуск при збої	Сигнал перезапуску при активній захисній функції
Вихідний сигнал	

Параметр	Значення
Умова спрацювання	Значення частоти; Перевантаження по струму; Перенапруга; Знижена напруга; Перегрів перетворювача; Робота; Стоп; Постійна швидкість;
Стан	Пошук швидкості; Вивід повідомлень про помилки (релейний вихід і вихід з відкритим колектором); Ву-pass перетворювача; Крок автоматичного режиму; Послідовність автоматичного режиму
Індикація	Вихідна частота; Вихідний струм; Вихідна напруга; Напруга постійного струму; Вихідний момент (вихідна напруга 0-10 В)
Захисні функції	
Відключення вводу	Перенапруга; Знижена напруга; Перевантаження по струму; Перегрів перетворювача; Перегрів двигуна; Відмова вентилятора; Перевантаження; Відсутність команди швидкості; Несправність пристрою; Помилка зв'язку; Обрив фази на вході/виході; Відмова блока живлення
Сигналізація	«Перекидання» двигуна; Перевантаження; Несправність датчика температури

Таблиця 2.3 – Геометричні розміри ПЧ

$P$ , кВт	$W$ , мм	$W1$ , мм	$H$ , мм	$H1$ , мм	$D$ , мм	$\Phi$	$A$ , мм	$B$ , мм	Вага, кг
5.5	180	170	220	210	170	4.5	5.0	4.5	3.66

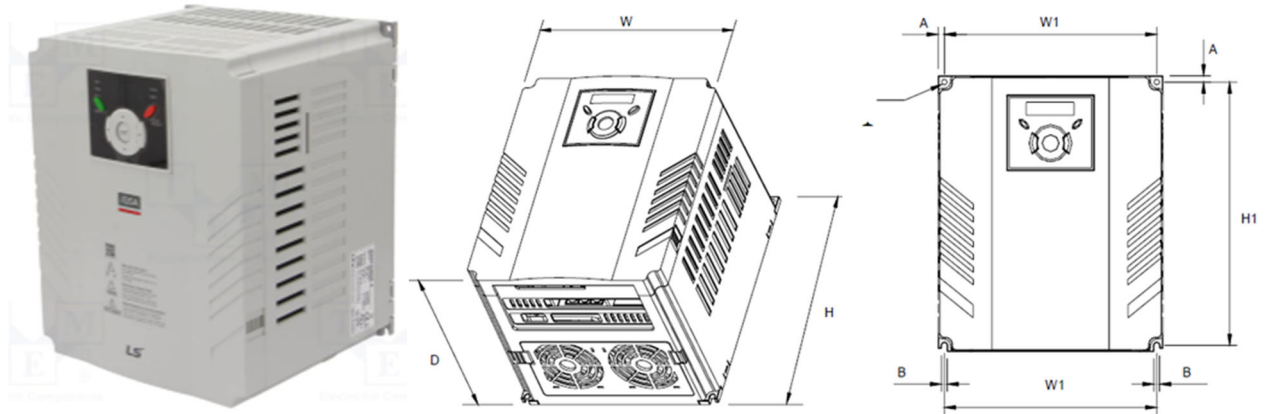


Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд та розміри ПЧ LG SV075iG5A-4

Призначення клем керування ПЧ наведено в таблиці 2.4, призначення клем ПЧ для підключення силових ланцюгів та електродвигуна – в таблиці 2.5.

Таблиця 2.4 – Клеми керування ПЧ

Клема	Функція	
MO	Багатофункц. вихід з відкритим колектором	
MG	Загальний MO	
24	Вихід 24В / 100мА	
P1	Багатофункціональний вхід	FX: Хід вперед
P2		RX: Хід назад
CN	Загальний вхідного сигналу	
P3	Багатофункціональний вхід (початкова установка)	VX: Аварійна зупинка
P4		JOG: поштовховими режим
P5		RST: Сигнал відключення
CN		Загальний вхідного сигналу
P6	Багатофункціональний вхід (початкова установка)	Багатоступ.частота – низька
P7		Багатоступ.частота – середня
P8		Багатоступ.частота – висока.
VR	Вихід 10 В для об'ємного опору	
V1	Вхід сигналу напруги для частоти : -10 ... +10 В	
I	Вхід сигналу струму для частоти: 0-20 мА	
AN	Многофункц. аналогів. вихідн. сигнал: 0-10 В	
3A	Багатофункціональний вихід реле	Вихід контакт-деталі А
3B		Вихід контакт-деталі У
3C		Загальний контакт-деталі
S+	Під'єднання сигналу зв'язку RS485	
S-		

Таблиця 2.5 – Силкові клеми ПЧ

Клема	Функція
R	Вхід промислової мережі
S	
T	
V1	Під'єднання опоры БД
V2	
U	Під'єднання двигуна
V	
W	
G	Заземлення

## 2.5 Розрахунок параметрів електродвигуна

Для виконання математичного моделювання електропривода живильника пилу необхідно розрахувати параметри схеми заміщення асинхронного двигуна (рисунок 2.6).

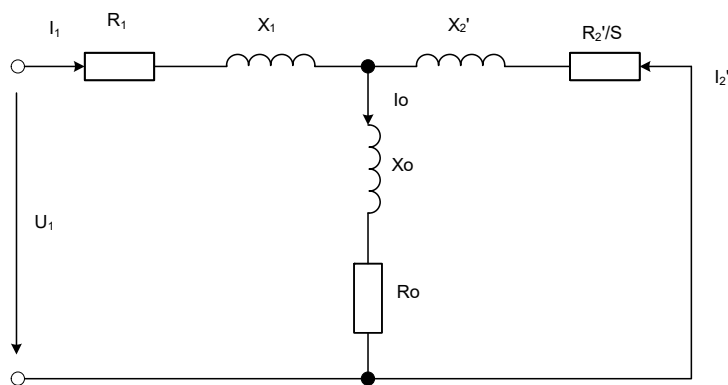


Рисунок 2.6– Схема заміщення фази АД

Асинхронний двигун складається із двох основних частин – статора і ротора. Між ними є зазор 0,2...0,3 мм, величина якого має великий вплив на робочі властивості машини. Для зменшення електромагнітних втрат статор і ротор збирають із окремих листів електротехнічної сталі товщиною 0,35...0,5 мм, ізольованих один від одного.

Вал обертається на підшипниках, що розташовані у підшипникових щитах.

В пази статора вкладають трифазну обмотку, що виконана із мідного або алюмінієвого проводу. У двигунів із короткозамкненим ротором обмотка ротора має вигляд алюмінієвих стержнів, що розташовані в пазах ротора і замкнені на торцевих частинах.

Основною характеристикою асинхронного двигуна є механічна характеристика. Робочі характеристики дають змогу визначити решту величин, які визначають режим роботи двигуна при різних навантаженнях. Ці характеристики можна розрахувати аналітично, знаючи параметри двигуна, а також можна зняти

експериментально, поступово навантажуючи двигун і вимірюючи при цьому всі необхідні величини.

Побудуємо робочі і пускові характеристики двигуна електроприводу моделі.

Параметри і схема заміщення:

$R_1, R_2'$  – активні опори первинної і вторинної обмоток,

$X_1$  і  $X_2'$  – реактивні опори первинної і вторинної обмоток,

$I_1$  і  $I_2'$  – струми опори первинної і вторинної обмоток.

Для знаходження параметрів схеми заміщення приймаються деякі допущення:

Струм холостого ходу у відносних одиницях (в.о.)  $I_{m0} = 0.5 \dots 0.25$ , що відповідає індуктивному опору кола намагнічування  $X_{m0} = 2 \dots 4$  в.о.

Активні опори статорної  $R_1$  і роторної (приведеної)  $R_2'$  обмотки співвідносяться наступним чином:  $R_1 = 0.55 \cdot R_k$ ,  $R_2' = 0.45 \cdot R_k$  і  $R_k = R_1 + R_2$ .

Індуктивний опір короткого замикання  $X_k = X_1 + X_2'$  у в.о. приблизно може бути знайдений як  $X_{k0} = 0,95 / I_{п0}$ , де  $I_{п0} = I_{п} / I_{н}$  – кратність пускового струму.

Для переходу від в.о. до абсолютних одиниць, їх необхідно помножувати на базовий опір  $Z_b$ , що дорівнює відношенню номінальних фазних величин напруги і струму  $Z_b = U_{нф} / I_{нф}$ .

Синхронна швидкість обертання:

$$n_c = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ об/хв,}$$

$$\omega_c = \frac{\pi n_c}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314,15 \text{ рад/с,}$$

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 2850}{30} = 298,5 \text{ рад/с.}$$

Номінальна потужність, що споживається із мережі:

$$P_{1H} = \frac{P_{2H}}{\eta_H} = \frac{5500}{0,88} = 6250 \text{ Вт.}$$

Номінальний струм:

$$I_H = \frac{P_H}{3U_\phi \cos \phi} = \frac{6250}{3 \cdot 220 \cdot 0,88} = 10,76 \text{ А.}$$

Номінальний момент:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{5500}{298,5} = 18,43 \text{ Нм.}$$

Механічні втрати:

$$\Delta P_{\text{мех}} = 1,25 \cdot 10^{-9} \omega_H^2 h^3 = 1,25 \cdot 10^{-9} \cdot 298,5^2 \cdot 10^3 = 111,3 \text{ Вт.}$$

Загальні втрати:

$$\Delta P = P_{1H} - P_{2H} = 6250 - 5500 = 750 \text{ Вт.}$$

Електричні і магнітні втрати:

$$P_{\text{ем}} = \Delta P - \Delta P_{\text{мех}} = 750 - 111,4 = 638,7 \text{ Вт,}$$

$$P_{\text{ел}} = 0,75 P_{\text{ем}} = 0,75 \cdot 638,7 = 479 \text{ Вт,}$$

$$P_{\text{маг}} = 0,25 \cdot P_{\text{ем}} = 0,25 \cdot 638,7 = 159,7 \text{ Вт.}$$

Активний опір намагнічуючого кола:

$$R_m = \frac{3U_H^2}{P_{\text{маг}}} = \frac{3 \cdot 220^2}{159,7} = 909,4 \text{ Ом.}$$

Активний опір короткого замикання:

$$R_{\kappa} = \frac{P_{el}}{mI_n^2} = \frac{479}{3 \cdot 10,76^2} = 1,379 \text{ Ом},$$

$$R_1 = 0,55R_{\kappa} = 0,55 \cdot 1,379 = 0,758 \text{ Ом},$$

$$R_2' = 0,45R_{\kappa} = 0,45 \cdot 1,379 = 0,62 \text{ Ом}.$$

Базовий опір:

$$Z_{\bar{o}} = \frac{U_H}{I_n} = \frac{220}{10,8} = 20,44 \text{ Ом}.$$

Індуктивний опір намагнічуючого кола:

$$X_m = X_{mo} Z_{\bar{o}} = 3 \times 20,44 = 61,33 \text{ Ом}.$$

Індуктивний опір короткого замикання і індуктивні опори первинної і вторинної обмоток:

$$X_{\kappa o} = \frac{0,95}{I_{no}} = \frac{0,95}{7,5} = 0,127 \text{ Ом},$$

$$X_{\kappa} = X_{\kappa o} Z_{\bar{o}} = 0,127 \times 20,44 = 2,59 \text{ Ом},$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_{\kappa}}{2} = \frac{2,59}{2} = 1,259 \text{ Ом}.$$

Індуктивна і активна складові намагнічуючого струму:

$$I_{mr} = \frac{U}{X_m} = \frac{220}{61,33} = 3,587 \text{ А},$$

$$I_{ma} = \frac{U}{R_m} = \frac{220}{909,4} = 0,242 \text{ А}.$$

Комплексне значення:

$$I_m = I_{ma} - jI_{mr} = 0,178 - j2,038 \text{ А}.$$

Далі, для довільних значень ковзання  $s$ , що знаходяться у інтервалі  $0 < s < 1,2 \cdot s_H$ , послідовно розраховую:

Повний опір вторинної гілки, Ом

$$Z_2' = R_2'/s + jX_2'.$$

Вхідну провідність та опір роторної та намагнічуючої гілок,

$$G_e = 1/Z_2' + 1/R_m + 1/(jX_m); \quad Z_e = 1/G_e.$$

Загальний опір, Ом

$$Z_o = Z_1 + Z_e.$$

Струм первинної обмотки (комплекс та модуль), А

$$I_{1c} = U/Z_o; \quad I_1 = \text{mod}(I_{1c}).$$

Напруга між вузлами  $a$  та  $b$  схеми заміщення, В

$$U_{ab} = I_{1c} \cdot Z_e.$$

Струм роторної гілки (модуль), А

$$I_2 = \text{mod} \left( \frac{U_{ab}}{Z_e} \right).$$

Коефіцієнт потужності

$$\cos\varphi = \text{Re}(I_{1c})/I_1.$$

Первинна потужність, Вт

$$P_1 = m \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi.$$

Кутова швидкість, рад/с

$$\omega = \omega_c \cdot (1 - s).$$

Корисна потужність, Вт

$$P_2 = 0.995 \cdot P_1 - m \cdot I_1^2 \cdot R_1 - m \cdot I_2' \cdot R_2' - U_{ab}^2 / R_m.$$

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Момент, Нм

$$M = m I_2^2 R_2' / (s \omega_c).$$

Результати розрахунків при зміні ковзання  $s$  наведені в таблиці 2.6.

Пускові характеристики розраховані аналогічно, результати в таблиці 2.7.

Таблиця 2.6 – Розрахунок робочих характеристик

$s$	$I_1, A$	$\cos\varphi$	$P_1, Вт$	$\omega,$ об/хв	$P_2, Вт$	$M, Нм$	$\eta$
0,001	3,628	0,160	383,3	313,8	88,1	0,71	0,230
0,006	4,245	0,533	1493,2	312,3	1175,6	4,21	0,787
0,011	5,371	0,730	2588,0	310,7	2223,8	7,63	0,859
0,016	6,737	0,824	3665,3	309,1	3231,4	10,94	0,882
0,021	8,207	0,872	4723,0	307,6	4197,4	14,15	0,889
0,026	9,720	0,898	5759,2	306,0	5121,1	17,26	0,889
0,031	11,245	0,912	6772,2	304,4	6002,0	20,26	0,886
0,036	12,766	0,921	7760,5	302,8	6839,8	23,15	0,881
0,041	14,274	0,926	8722,9	301,3	7634,6	25,92	0,875
0,046	15,762	0,928	9658,2	299,7	8386,6	28,58	0,868
0,051	17,227	0,929	10565,8	298,1	9096,1	31,12	0,861

Таблиця 2.7 – Розрахунок пускових характеристик

$s$	$I_1, A$	$M, Нм$
0,00	3,63	0,71
0,10	30,28	50,48
0,20	47,99	64,53
0,30	58,11	63,39
0,40	64,17	58,09
0,50	68,04	52,32
0,60	70,66	47,06
0,70	72,53	42,53
0,80	73,92	38,66
0,90	74,98	35,38
1,00	75,82	32,56

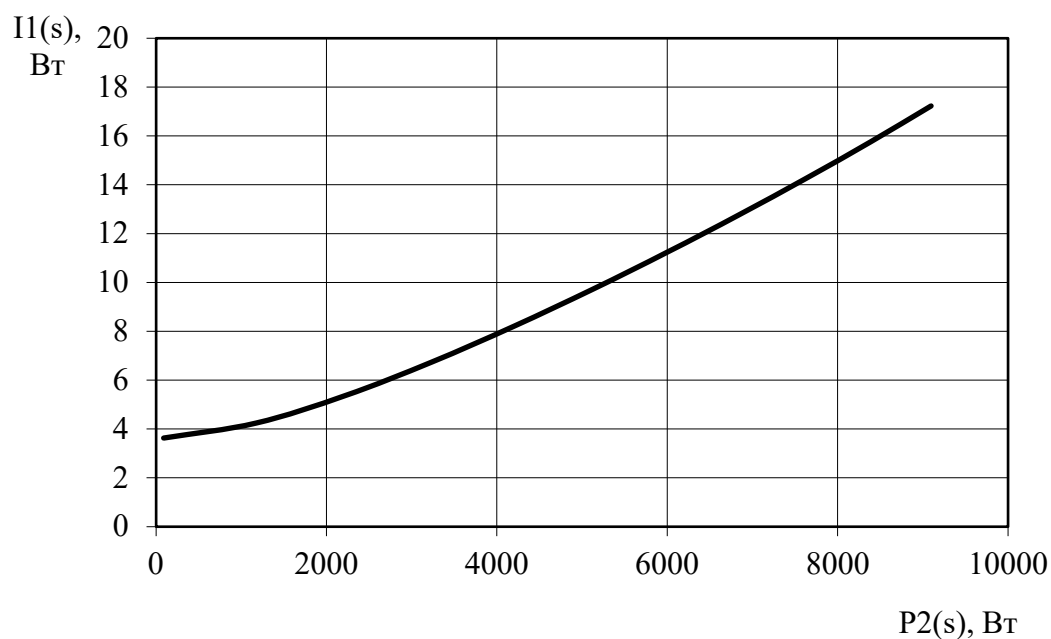


Рисунок 2.7 – Залежність струму від навантаження на валу

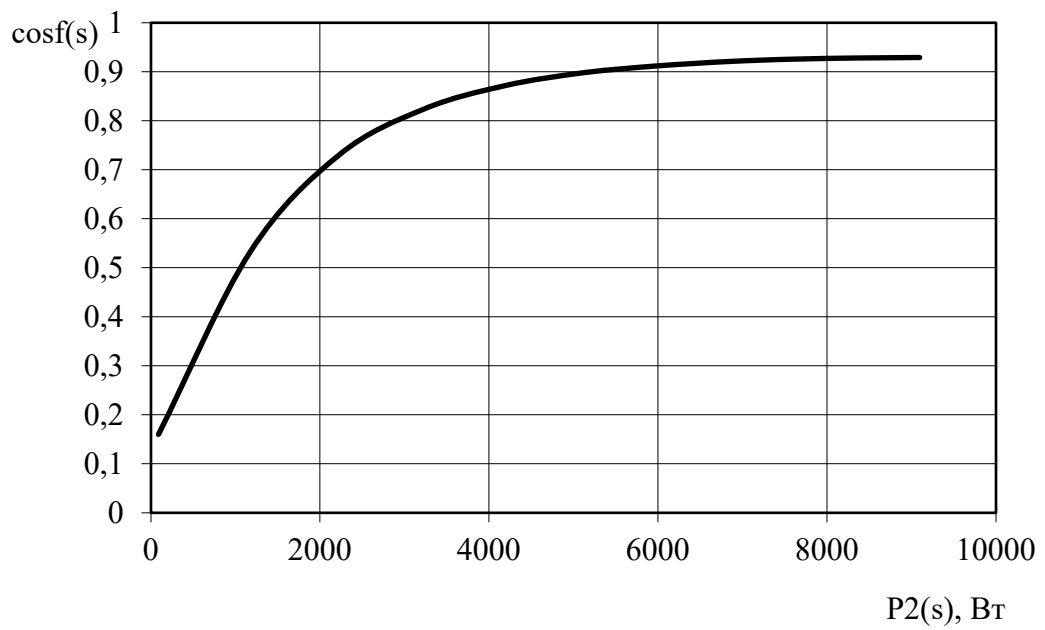


Рисунок 2.8 – Залежність коефіцієнта потужності від навантаження на валу

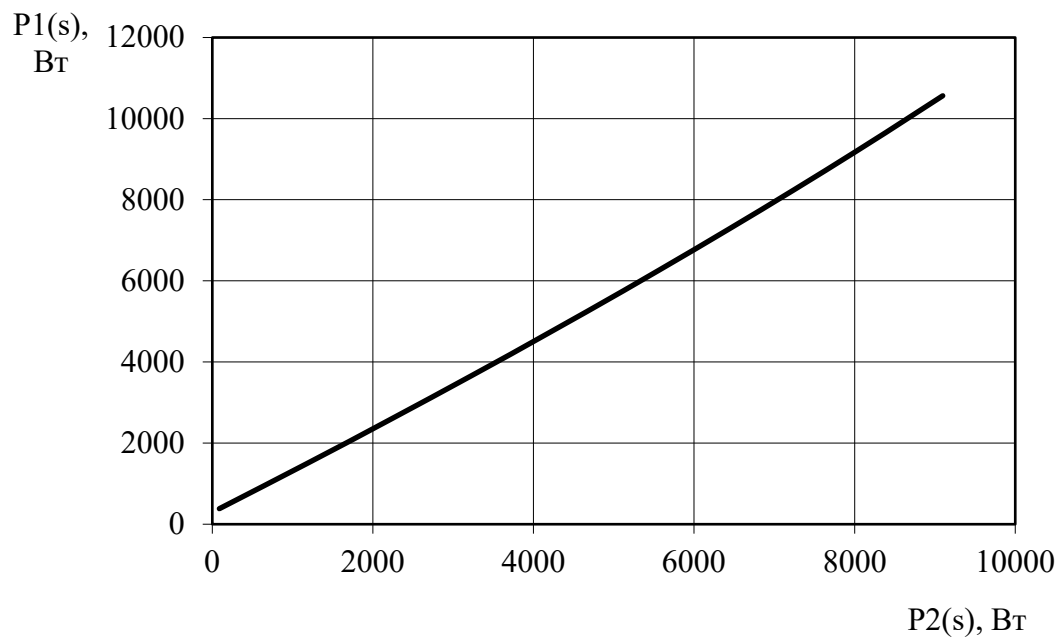


Рисунок 2.9 – Залежність споживаної потужності від навантаження на валу

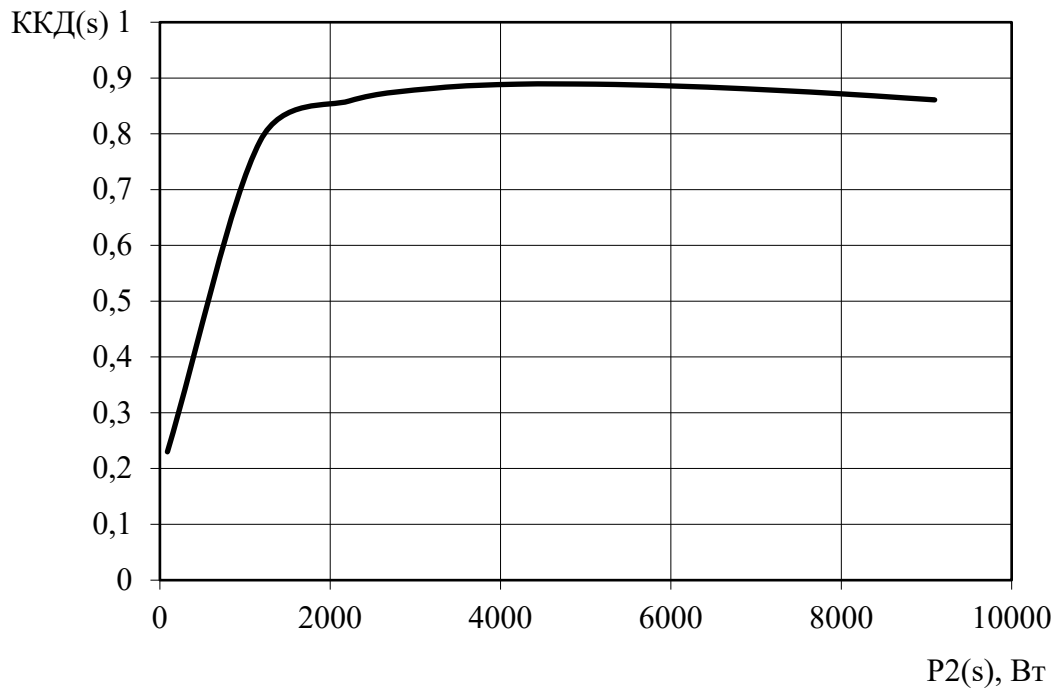


Рисунок 2.10 – Залежність ККД від навантаження на валу

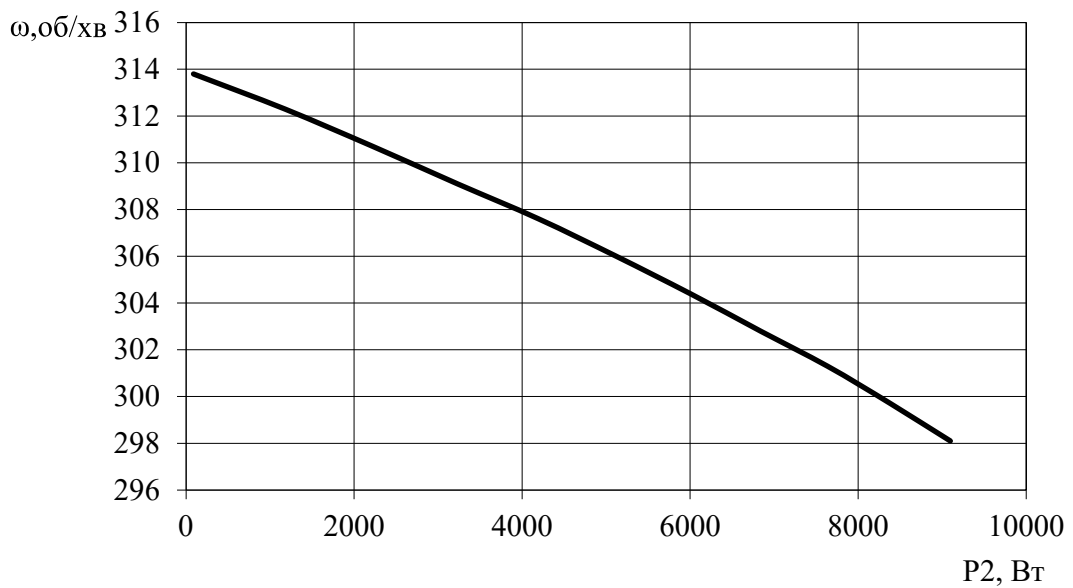


Рисунок 2.11 – Залежність кутової швидкості від навантаження на валу.

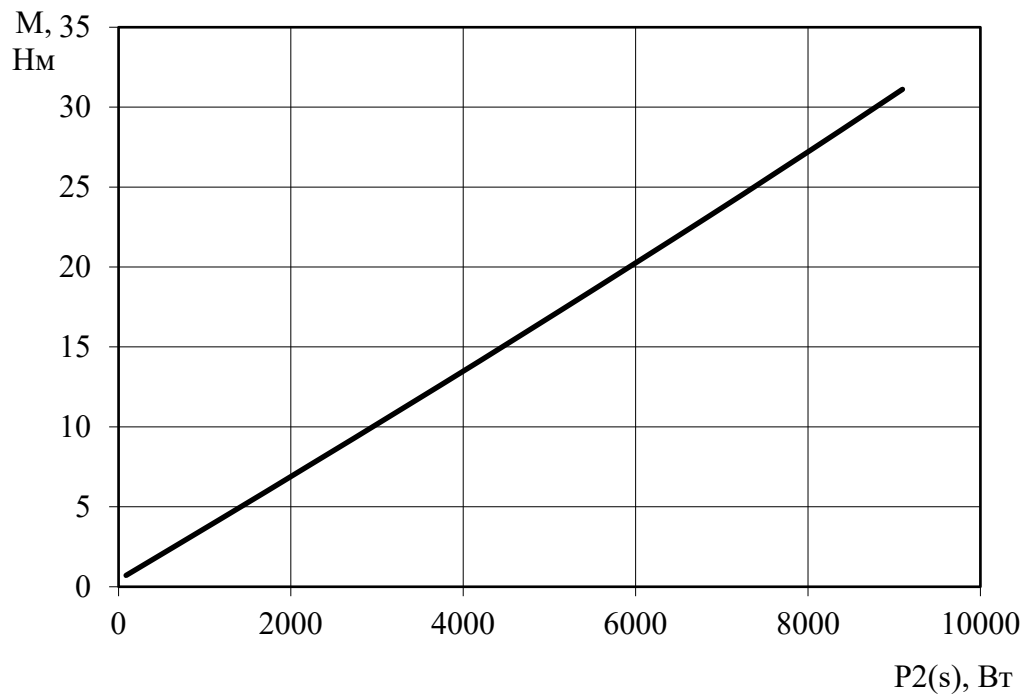


Рисунок 2.12 – Залежність електромагнітного моменту від навантаження

## 2.6 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

Для математичного моделювання асинхронного двигуна необхідно визначити параметри його схеми заміщення. Поряд з різними експериментальними способами існує можливість непрямого розрахунку параметрів АД, виходячи з довідкових даних. Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна для однієї фази представлена на рисунку 2.13.

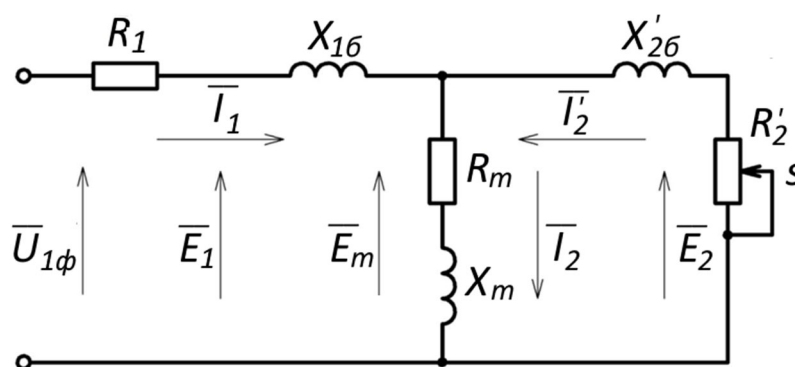


Рисунок 2.13 – Схема заміщення асинхронного двигуна

Основні рівняння асинхронного двигуна, що відповідають прийнятій схемі заміщення:

$$\bar{U}_{1\phi} - \bar{E}_m - j \cdot \bar{I}_1 \cdot X_1 + \bar{I}_1 \cdot R_1 = 0,$$

$$\bar{E}_m + j \cdot \bar{I}_2' \cdot X_2' + \frac{\bar{I}_2'}{s} \cdot R_2' = 0,$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2' - \bar{I}_2 = 0.$$

Векторна діаграма струмів, ЕРС і напруг, що відповідають вищенаведеним рівнянням, зображена на рисунку 2.14.

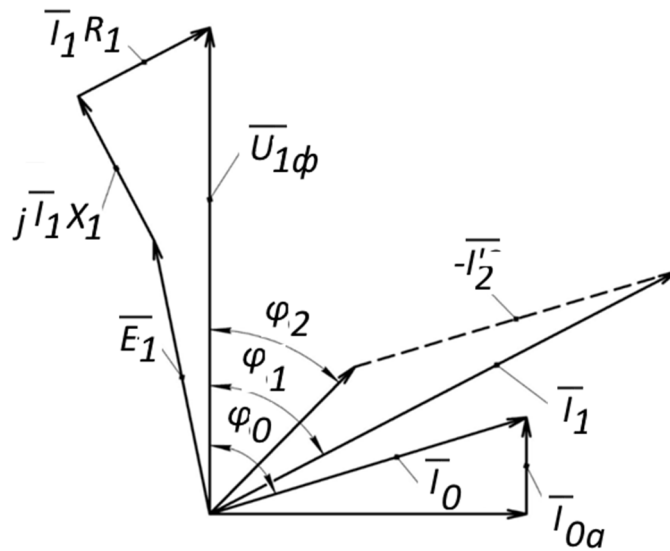


Рисунок 2.14 – Векторна діаграма асинхронної машини

Визначимо параметри Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна за його каталожними даними.

Синхронна кутова частота обертання двигуна:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314,16 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номінальна кутова швидкість обертання двигуна:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 2900}{30} = 303,69 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номінальне ковзання

$$s_H = 1 - \frac{f_H}{f_0} = 1 - \frac{2900}{3000} = 0,0333$$

Номинальний момент двигуна:

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{5500}{303,69} = 18,11 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номинальна фазна напруга і номінальний фазний та лінійний струми статора

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$$

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{5500}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,857} = 11,08 \text{ А}.$$

Струм фази статора при частковому завантаженні

$$I_{1p'} = \frac{p' \cdot P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos\varphi_{p'} \cdot \eta_{p'}} = \frac{0,75 \cdot 5500}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,85} = 8,38 \text{ А}$$

де  $\eta_{p'} = 0,85$  – ККД при частковому завантаженні;

$\cos\varphi_{p'} = 0,88$  – коефіцієнт потужності при частковому завантаженні;

$p' = P/P_{\text{н}} = 0,75$  – коефіцієнт завантаження двигуна;

Коефіцієнт потужності при частковому завантаженні  $p' = 0,75$  значно відрізняється від коефіцієнта потужності при номінальному навантаженні, причому ця відмінність у значній мірі залежить від потужності двигуна і для відомих серій асинхронних двигунів з достатньою для практики точністю підпорядковується залежності, що наведена на рисунку 2.15.

Критичне ковзання

$$s_k = s_{\text{н}} \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - (1 - 2 \cdot s_{\text{н}} \cdot \beta \cdot (m_k - 1))}}{1 - 2 \cdot s_{\text{н}} \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} =$$

$$= 0,033 \cdot \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - (1 - 2 \cdot 0,033 \cdot 1,5 \cdot (2,3 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,033 \cdot 1,5 \cdot (2,3 - 1)} = 0,169$$

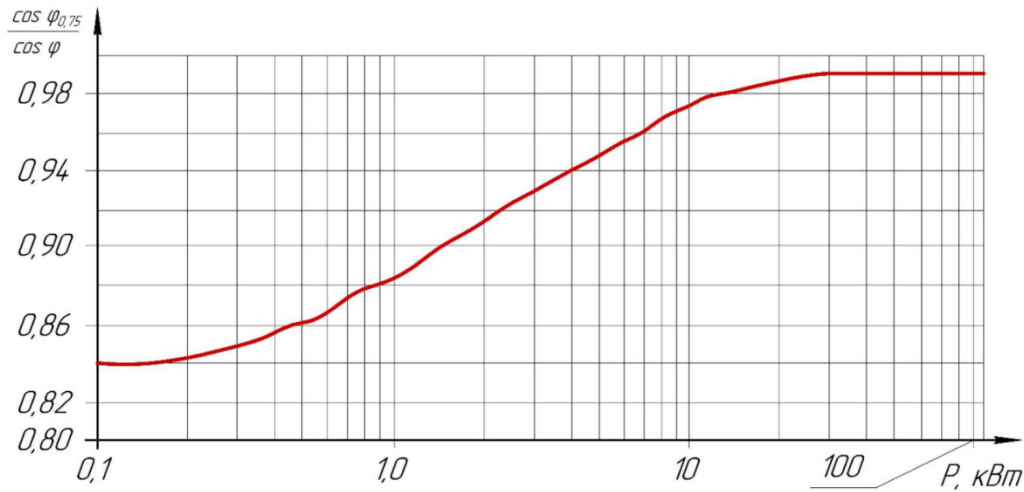


Рисунок 2.15 – Залежність  $\frac{\cos \varphi_{0.75}}{\cos \varphi_n}$  від потужності асинхронного двигуна

Струм холостого ходу асинхронного двигуна:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p'}^2 - (I_{1\phi H} \cdot p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}{1 - (p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{8,38^2 - (11,08 \cdot 0,75 \cdot (1 - 0,033) / (1 - 0,75 \cdot 0,033))^2}{1 - (0,75 \cdot (1 - 0,033) / (1 - 0,75 \cdot 0,033))^2}} = 2,278 \text{ A.}$$

Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора. Визначаємо значення ряду проміжних коефіцієнтів:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\phi H}} = 1 + \frac{2,278}{2 \cdot 7,5 \cdot 11,08} = 1,0137,$$

$$R'_2 = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot k_{\max} \cdot P_H \cdot C_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_K}\right)} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,033)}{2 \cdot 2,3 \cdot 5500 \cdot 1,0137^2 \cdot (1,5 + 1/0,169)} = 0,7228 \text{ Ом}$$

Активний опір статора в номінальному режимі

$$R_1 = R'_2 \cdot \beta \cdot C_1 = 0,7228 \cdot 1,5 \cdot 1,0137 = 1,099 \text{ Ом}$$

Визначимо параметр  $\gamma$ , який дозволяє знайти індуктивний опір короткого замикання в номінальному режимі:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = \sqrt{1/0,1687 - 1,5^2} = 5,736$$

Тоді опір короткого замикання:

$$X_{KH} = R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 0,7228 \cdot 5,736 \cdot 1,0137 = 4,202 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір розсіювання статорної обмотки:

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,42 \cdot 4,202 = 1,765 \text{ Ом}$$

Індуктивність розсіювання обмотки статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1,765}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0056 \text{ Гн}$$

Індуктивний опір розсіяння обмотки ротора, приведений до обмотки статора, в номінальному режимі

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{\text{кн}}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{4,202}{1,0137} = 2,404 \text{ Ом}$$

Індуктивність розсіювання роторної обмотки, що приведена до статорної:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{2,404}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0077 \text{ Гн}$$

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

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\text{фн}} \cdot \cos\varphi - R_1 \cdot I_{1\text{фн}})^2 + (U_{1\text{фн}} \cdot \sin\varphi - X_{1\sigma} \cdot I_{1\text{фн}})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0,88 - 11,08 \cdot 1,099)^2 + (220 \cdot 0,475 - 11,08 \cdot 1,765)^2} = 199,72 \text{ В}$$

Індуктивний опір намагнічування визначиться як:

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{199,72}{2,277} = 87,717 \text{ Ом}$$

Результуюча індуктивність гілки намагнічування:

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{87,717}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,2792 \text{ Гн}$$

Значення номінального потокозчеплення:

$$\Psi_{2\text{н}} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot I_{\text{м}} = \sqrt{2} \cdot 2,277 \cdot 0,279 = 0,899$$

Еквівалентна індуктивність обмотки статора:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_\mu = 0,0056 + 0,2792 = 0,2848 \text{ Гн}$$

Еквівалентна індуктивність обмотки ротора:

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_\mu = 0,00765 + 0,2792 = 0,2869 \text{ Гн}$$

Коефіцієнт розсіювання:

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 + L'_2} = 1 - \frac{0,279^2}{0,2848 + 0,2869} = 0,8636 .$$

Параметри схеми заміщення зведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Параметри схеми заміщення електродвигуна АИР100S2

$R_1, \text{ Ом}$	$X_{1\sigma}, \text{ Ом}$	$L_{1\sigma}, \text{ Гн}$	$X_\mu, \text{ Ом}$	$L_\mu, \text{ Гн}$	$R'_2, \text{ Ом}$	$X'_{2\sigma}, \text{ Ом}$	$L'_{2\sigma}, \text{ Гн}$	$X_{кн}, \text{ Ом}$
1,0989	1,765	0,0056	87,717	0,2792	0,7228	2,4044	0,0077	4,2024

## 2.7 Побудова механічної характеристики електропривода

Номінальний режим роботи живильника відповідає максимальному значенню повного ККД і характеризується наступними параметрами:

- номінальний ККД  $\eta_n = 85,7 \%$ ;
- номінальна швидкість обертання  $n_n = 2900 \text{ об/хв}$ ,  $\omega_n = 303,53 \text{ рад/с}$ ;

Вираз для механічної характеристики живильника пилу при роботі з постійним значенням ККД  $\eta_i$  має такий вигляд:

$$M_{\text{нас}}(n) = a \cdot n + c ,$$

де  $a$  і  $c$  – коефіцієнти постійних і змінних втрат живильника пилу в режимі роботи з постійним значенням ККД.

Коефіцієнт змінних втрат живильника для навантаження 90 %:

$$a = \frac{0,9 \cdot M_H}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{0,9 \cdot 14,06}{2900} = 0,0436.$$

Коефіцієнт постійних втрат живильника:

$$c = 0,3 \cdot 14,06 = 4,22 .$$

Після підставлення чисельних значень коефіцієнтів рівняння механічної характеристики живильника пилу в режимі роботи з номінальним ККД має вигляд:

$$M(n) = 0,0436 \cdot n + 4,22 \text{ Н} \cdot \text{м} . \quad (3.1)$$

Механічна характеристика живильника пилу, розрахована за виразом (3.1), наведена на рисунку 2.17 лінією червоного кольору.

## 2.8 Побудова природної механічної характеристики двигуна

Задаючись діапазоном ковзання  $s$  від 1 до 0,00001 з кроком 0,01, побудуємо природну механічну характеристику асинхронного двигуна (при частоті 50 Гц) за виразом:

$$M_{\text{ем}}(s) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ X_{\text{кн}}^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]}$$

Природна механічна характеристика  $M_{em}(n)$  електродвигуна АИР100S2 наведена на рисунку 2.17 для  $n(s) = n_0 \cdot (1 - s)$ .

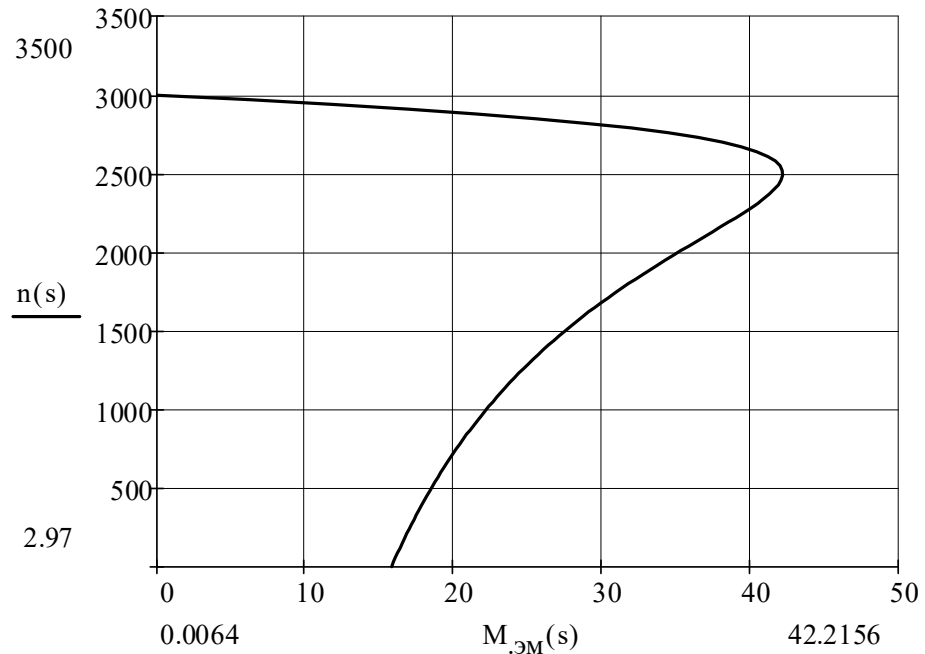


Рисунок 2.16 – Природна механічна характеристика  $M_{em}(n)$  електродвигуна АИР100S2.

По збудованій механічній характеристиці проведемо аналіз основних даних, а також порівняємо їх з паспортними.

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 2900}{30} = 303,69 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номінальний момент за паспортними даними:

$$M_{H(\text{паспорт})} = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{5500}{303,69} = 18,11 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критичний момент за паспортними даними:

$$M_{\text{к(паспорт)}} = m_{\text{к}} \cdot M_{\text{н(паспорт)}} = 2,3 \cdot 18,11 = 41,65 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковий момент за паспортними даними:

$$M_{\text{п(паспорт)}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{н(паспорт)}} = 2,82 \cdot 18,11 = 39,84 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Критичний момент за формулою Клосса:

$$M_{\text{к}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2})} =$$
$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314,16 \cdot 1,0137 \cdot (1,099 + \sqrt{1,099^2 + 4,202^2})} = 41,65 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номінальний момент за формулою Клосса:

$$M_{\text{н}} = \frac{2 \cdot M_{\text{к}} \cdot (1 + a \cdot s_{\text{к}})}{\frac{s_{\text{к}}}{s_{\text{н}}} + \frac{s_{\text{н}}}{s_{\text{к}}} + 2 \cdot a \cdot s_{\text{к}}} =$$
$$= \frac{2 \cdot 41,65 \cdot (1 + 1,520 \cdot 0,169)}{\frac{0,169}{0,033} + \frac{0,033}{0,169} + 2 \cdot 1,520 \cdot 0,169} = 18,14 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де  $a = \frac{R_1}{R_2'} = \frac{1,099}{0,723} = 1,520$

Пусковий момент за формулою Клосса при  $s_{\text{п}} = 1$ :

$$M_{\text{п}} = \frac{2 \cdot M_{\text{к}} \cdot (1 + a \cdot s_{\text{к}})}{\frac{s_{\text{к}}}{s_{\text{п}}} + \frac{s_{\text{п}}}{s_{\text{к}}} + 2 \cdot a \cdot s_{\text{к}}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 41,65 \cdot (1 + 1,520 \cdot 0,169)}{\frac{0,169}{1} + \frac{1}{0,169} + 2 \cdot 1,520 \cdot 0,169} = 15,84 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

З отриманих даних випливає, що побудована механічна характеристика справедлива тільки на робочій ділянці, тому що значення критичного і номінального моментів практично збігаються з розрахованими за паспортними даними, що говорить про правильність визначених параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна. Однак, значення пускового моменту, розраховане за паспортними даними, набагато більше величини розрахункового пускового моменту. Це пояснюється тим, що при розрахунках не було враховано ефект витіснення струму в обмотці ротора.

## 2.9 Побудова сімейства механічних характеристик

Побудова сімейства механічних характеристик виконується в робочому діапазоні обертів живильника 1000...3000 об/хв за рівнянням

$$M_{\text{ем}}(s, f_1) = \frac{3 \cdot (U_{1\Phi\text{н}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}})^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \cdot s \cdot \left[ (X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}})^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2 \right]}$$

Для побудови графіків механічних характеристик в пакеті Mathcad залежність швидкості двигуна від частоти та ковзання прийнята у вигляді

$$n_1(s, f_1) = n_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \cdot (1 - s) .$$

Сімейство штучних механічних характеристик електродвигуна АИР100S2 наведено на рисунку 2.17.

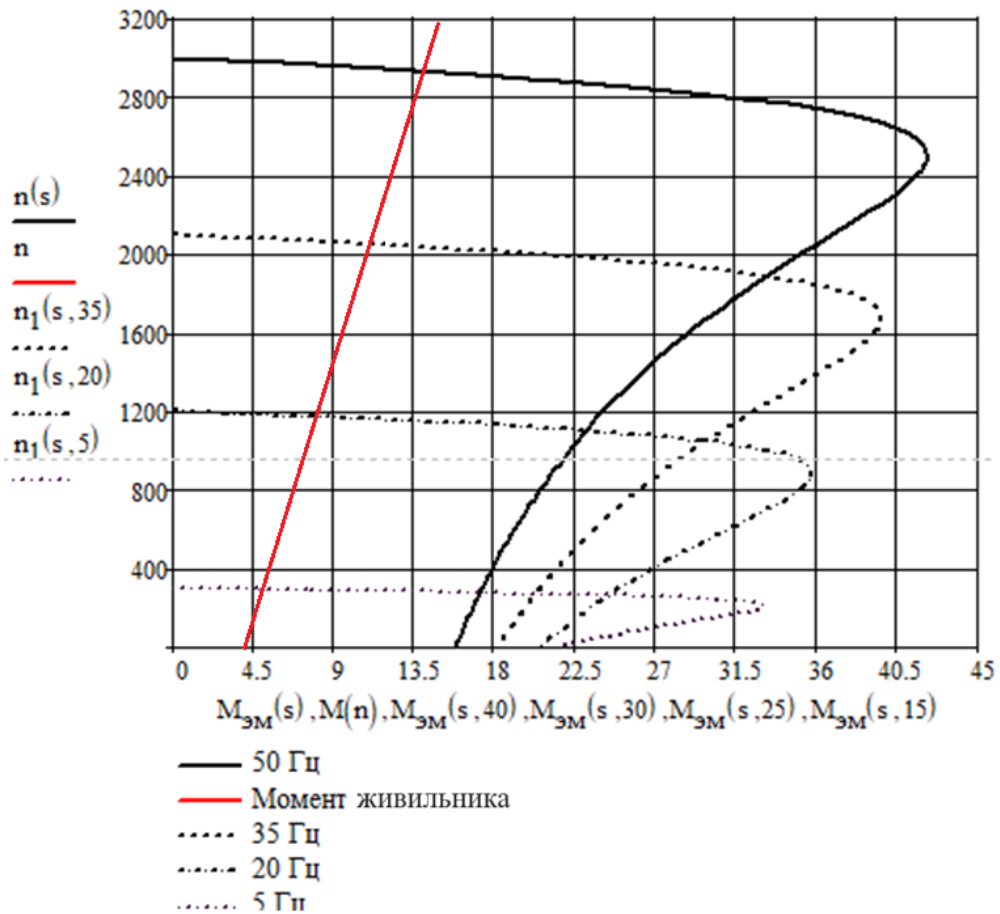


Рисунок 2.17 – Штучні механічні характеристики електродвигуна АІР100S2

## 2.10 Побудова природної електромеханічної характеристики двигуна

Природну електромеханічну характеристику  $\omega(I_1)$  розрахуємо за виразом:

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

де

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

$$\sin\varphi_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2}},$$

Задаючи діапазон ковзання  $s$  від 0 до 1, будемо електромеханічну характеристику асинхронного двигуна за формулами для струмів обмоток статора і ротора.

Електромеханічна характеристика асинхронного двигуна АИР100S2, що розрахована в математичній системі MathCAD, представлена на рисунку 2.18.

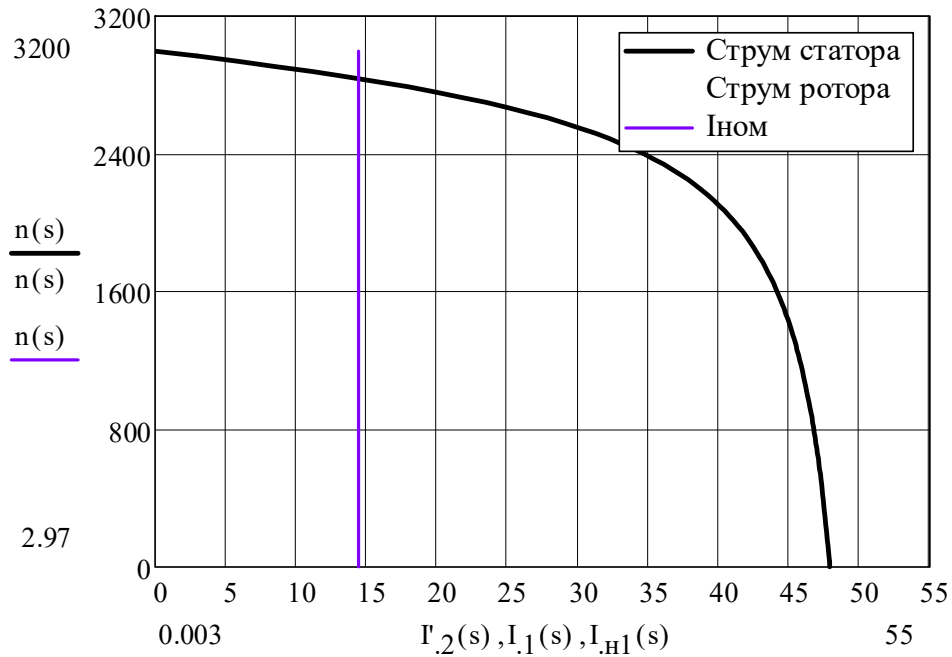


Рисунок 2.18 – Електромеханічна характеристика електродвигуна АИР100S2

Визначимо номінальний струм статора асинхронного двигуна  $I_{1H}$  при номінальній швидкості обертання  $n_H = 2900$  об/хв,  $\omega_H = 303,53$  рад/с.

Номінальний струм ротора двигуна при номінальній кутовій швидкості:

$$I'_{2H} = \frac{U_{1\phi H}}{\pm \sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2}} = \frac{220}{\pm \sqrt{4,202^2 + \left(1,099 + \frac{0,723}{s}\right)^2}} = 9,47 \text{ A}$$

Синус кута між вектором фазної напруги  $\overline{U_{1j}}$  і пов'язаним вектором струму ротора  $\overline{-I'_{2}}$ :

$$\sin\varphi_{2H} = \frac{X_{KH}}{\sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2}} = \frac{20,44}{\pm\sqrt{4,202^2 + \left(1,099 + \frac{0,723}{s}\right)^2}} = 0,181$$

Номінальний струм статора двигуна:

$$I_{1H} = \sqrt{I_0^2 + I'_{2H}{}^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{2H} \cdot \sin\varphi_{2H}} =$$

$$= \sqrt{2,277^2 + 9,470^2 + 2 \cdot 2,277 \cdot 9,470 \cdot 0,181} = 10,13 \text{ A}$$

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

#### 3.1 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електропривода при прямому пуску

Схема моделі прямого пуску електропривода живильника пилу в пакеті моделювання Matlab-Simulink з використанням бібліотеки SimPowerSystem наведена на рисунку 3.1. Момент навантаження двигуна – лінійний, з параметрами з виразу (3.1).

Параметри схеми заміщення асинхронного двигуна АИР100S2, взяті з таблиці 2.8 розрахункових параметрів заміщення двигуна, наведені на рисунку 3.2. Розрахунковий момент інерції живильника пилу  $J = J_{дв} + J_{н} = 0,008 + 0,017 = 0,025$  кг·м<sup>2</sup>. На рисунку 3.3 наведені параметри трифазного блоку живлення Three-Phase Source і блоку двокоординатного будувача XY-score.

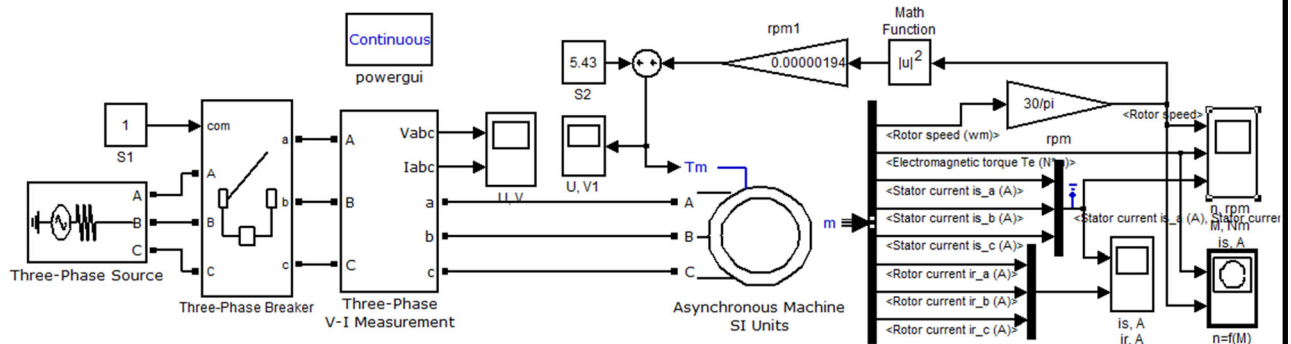


Рисунок 3.1 – Схема моделі прямого пуску електропривода живильника пилу

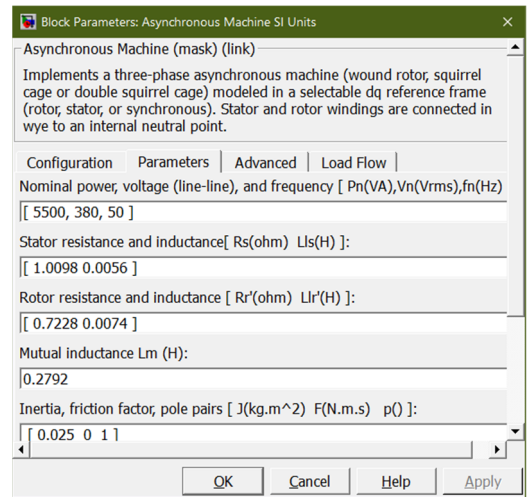
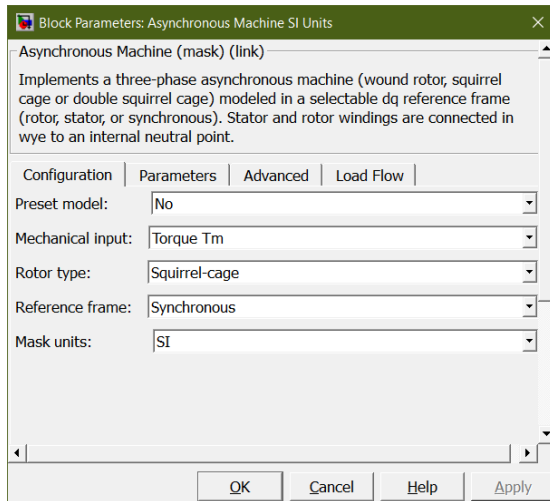


Рисунок 3.2 – Параметри асинхронного двигуна потужністю 5,5 кВт

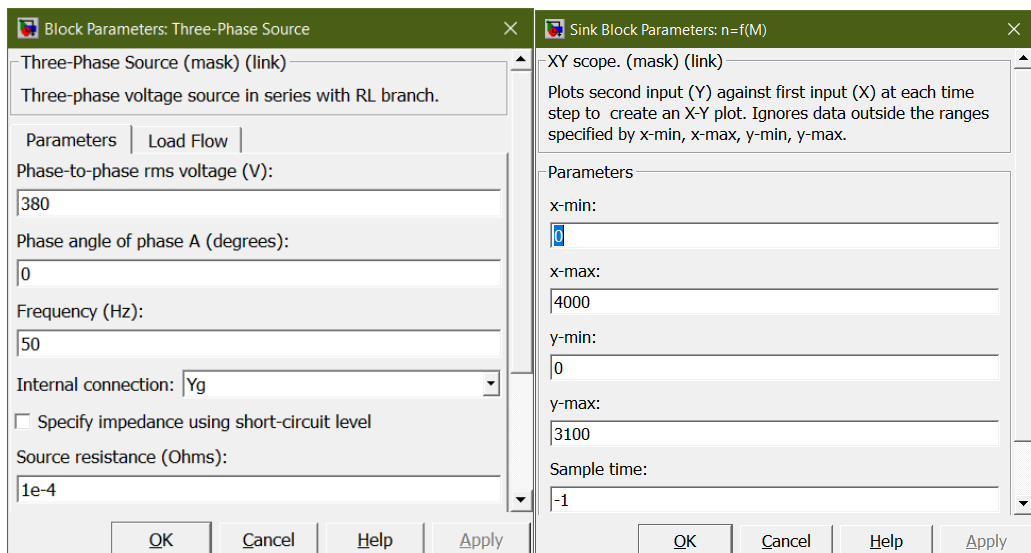


Рисунок 3.3 – Параметри трифазного блоку живлення Three-Phase Source і блоку двокоординатного будувача XY-score

Результати моделювання електропривода живильника пилу на базі трифазного асинхронного привода наведені на рисунку 3.4.

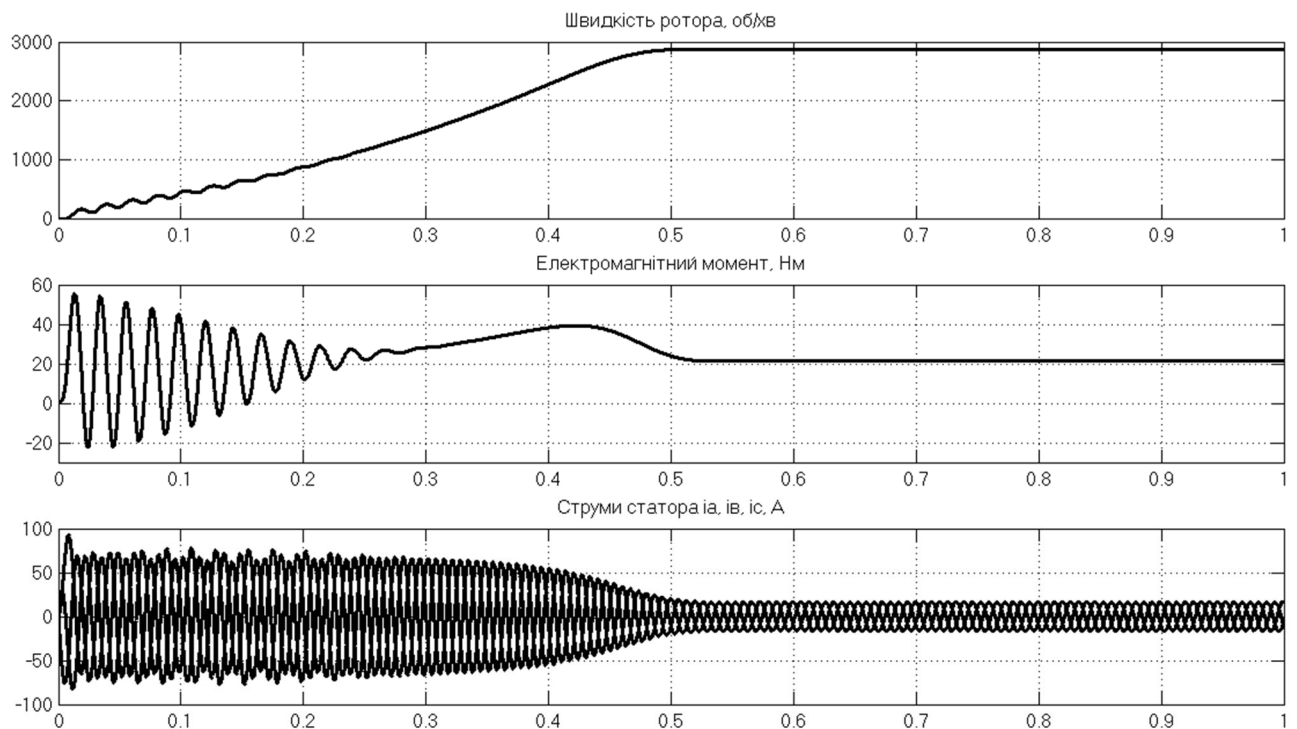


Рисунок 3.4 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при прямому пуску електропривода

Як видно з графіків на рисунках 3.4, 3.5 час встановлення обертів і моменту при прямому пуску електропривода складає біля 0,5 с, пусковий електромагнітний момент досягає біля 55 Н·м, що в майже в 3 рази більше номінального, пусковий струм статора досягає 90 А, що майже в 7 разів перевищує номінальний.

### 3.2 Моделювання асинхронного електроприводу за скалярним законом з блоком 6-пульсного частотного перетворювача Six Step VSI Induction Motor Driv

В основі електронної моделі електроприводу живильника пилу котлоагрегату лежить блок частотного електроприводу з асинхронним двигуном Six Step VSI Induction Motor Drive бібліотеки Sim Power Systems.

Six-Step VSI Induction Motor Drive (асинхронний двигун з 6-пульсним управлінням) – функціональна схема системи високого рівня, показана на рисунку

3.5, складається з семи основних блоків, що поставляються з бібліотекою SimPowerSystems:

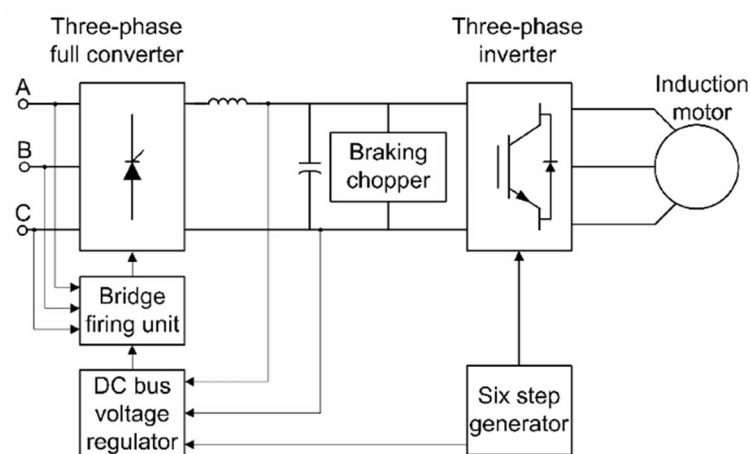


Рисунок 3.5 – Структурна схема блоку привода Six-Step VSI Induction Motor Drive

- 1) Induction Motor – асинхронний двигун;
- 2) Three-phase inverter – трифазний інвертор;
- 3) Three-phase full converter – трифазний тиристорний випрямляч;
- 4) Bridge firing unit – блок запуску моста.

Три інші блоки належать до бібліотеки Electric Drives.

- 5) DC bus voltage regulator – регулятор напруги на шині постійного струму;
- 6) Six step generator – 6-пульсний генератор;
- 7) Braking chopper – фільтр напруги на шині постійного струму.

Примітка. У програмному забезпеченні SimPowerSystems блок Six-Step VSI Induction Motor Drive звичайно називається приводом двигуна AC1.

Схема моделі привода в Simulink подана на рисунку 3.6.

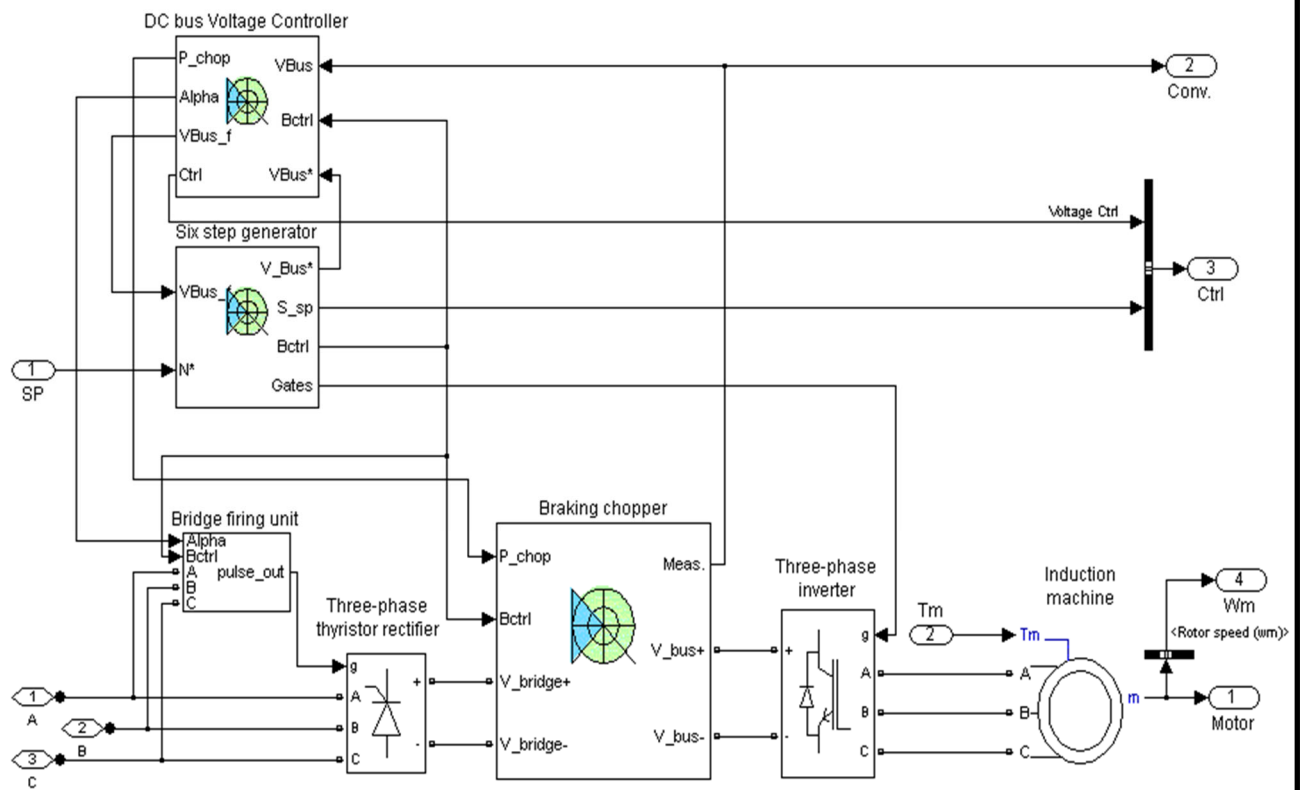


Рисунок 3.6 – Схема 6-пульсного управління асинхронного двигуна

Блок запуску моста Bridge firing unit використовується для перетворення кута відкриття тиристорів, що забезпечується регулятором напруги на шині постійного струму залежності від імпульсу, що подається на тиристорний затвор, а мостовий блок запуску включає в себе режекторний фільтр, застосовуваний для вимірювання напруги усунення гармонік.. Для генерації імпульсів використовується дискретний синхронізований блок генератора шести імпульсів. Додаткова інформація про цей блок міститься в довідці до блоку Synchronized 6-Pulse Generator.

Регулятор напруги на шині постійного струму DC bus voltage regulator (рисунок 3.7) заснований на ПІ-регуляторі та логіці гістерезисного переривника. Коли напруга на шині зменшується, ПІ-регулятор зменшує кут відкриття. Коли напруга на шині збільшується, ПІ-регулятор збільшує кут відкриття.

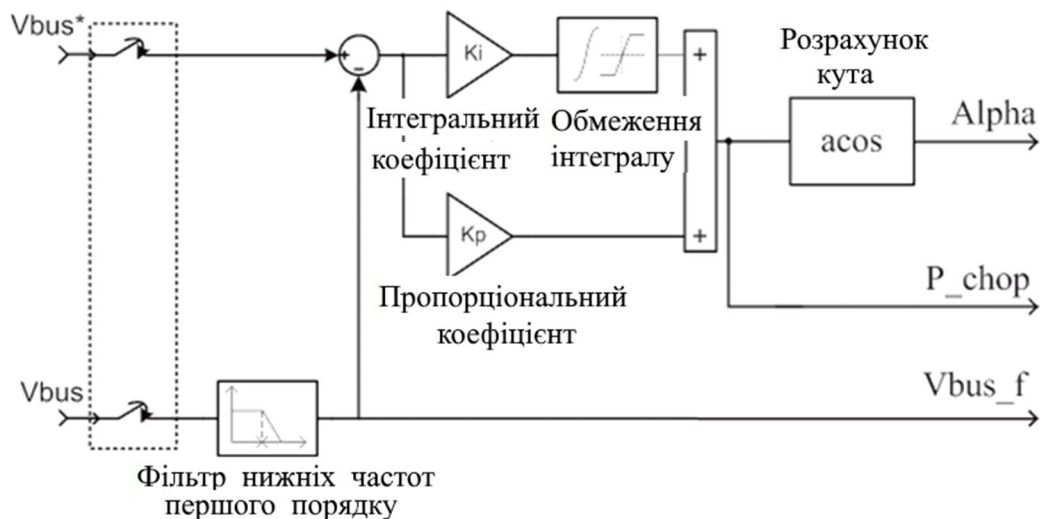


Рисунок 3.7 – Схема ПІ-регулятора напруги на шині постійного струму  
DC bus voltage regulator

Логіка переривання заснована на гістерезисному управлінні. Коли напруга досягає верхньої межі гістерезису, регулятор напруги постійного струму перемикається в режим гальмування, включається переривник і тиристорний міст відключається. У режимі переривання пропорційний режим залишається активним, але інтегральний коефіцієнт посилення скидається, оскільки динаміка переривання дуже висока, а інтегральний коефіцієнт посилення марний. Коли напруга на шині досягає нижньої межі гістерезису, інтерпретатор гальм відключається і тиристорний міст знову включається.

6-пульсний генератор (Six step generator), показаний на наступному рисунку 3.8, містить шість компараторів для створення сигналів перемикавання з шістьма кроками. Деяка додаткова логіка дозволяє змінювати швидкість інвертування двох фаз.

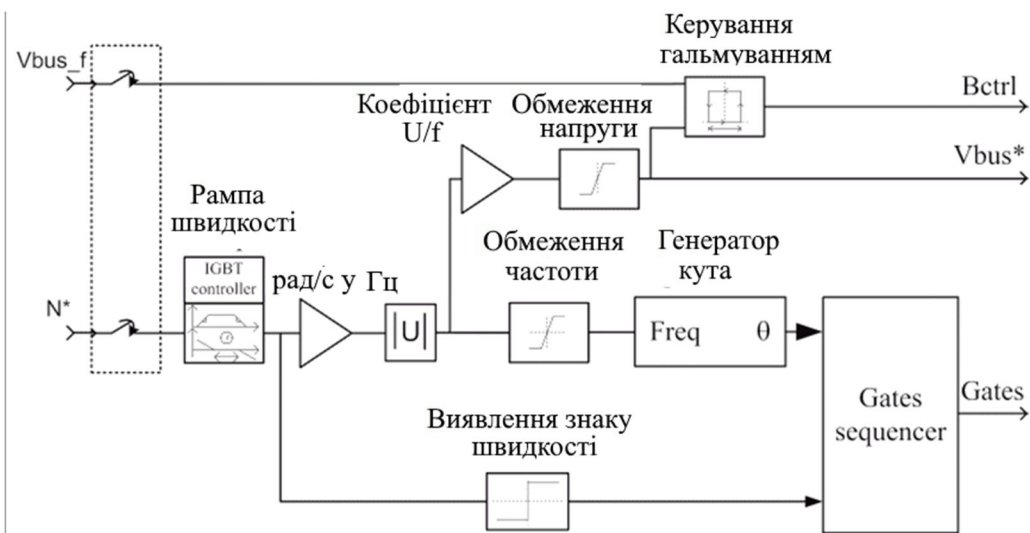


Рисунок 3.8 – Схема 6-імпульсного генератора Six step generator

Примітки. У приводі мотора АС1 швидкість двигуна не регулюється по замкнутому контуру. Натомість уставка швидкості використовується тільки для визначення напруги та частоти двигуна, що застосовуються шестиступінчастим інвертором, щоб підтримувати відношення  $U/F$  (або потік двигуна) постійним від 0 до номінальної швидкості. При швидкості вище номінальної двигун працює з ослабленням потоку; тобто напруга підтримується постійною з її номінальним значенням, тоді як частота збільшується пропорційно заданому значенню швидкості.

При зміні швидкості буде потрібно невелика затримка при перетині нульової швидкості, що зведе потік в повітряному зазорі до нуля.

У розробленій електронній моделі (рисунок 3.9), окрім вказаного блоку електроприводу наявні джерело живлення, блок завдання швидкості і блок, що моделює навантаження на електродвигун. На рисунку 3.10 подана схема підсистеми demux.

Параметри асинхронної машини задано згідно з розрахунками, виконаними у розділі 2, таблиця 2.8 (рисунок 3.11). Результати моделювання із вихідними параметрами представлено на рисунках 3.12, 3.13. Завдання швидкості двигуна, що стрибком змінюється у момент часу 0,2 с від 0 до 3000 об/хв, перетворюється системою керування електроприводом на таке, що плавно змінюється від 0 до 3000 об/хв з моменту часу 0,2 с до моменту 1,7 с. Реальна швидкість двигуна слідує за



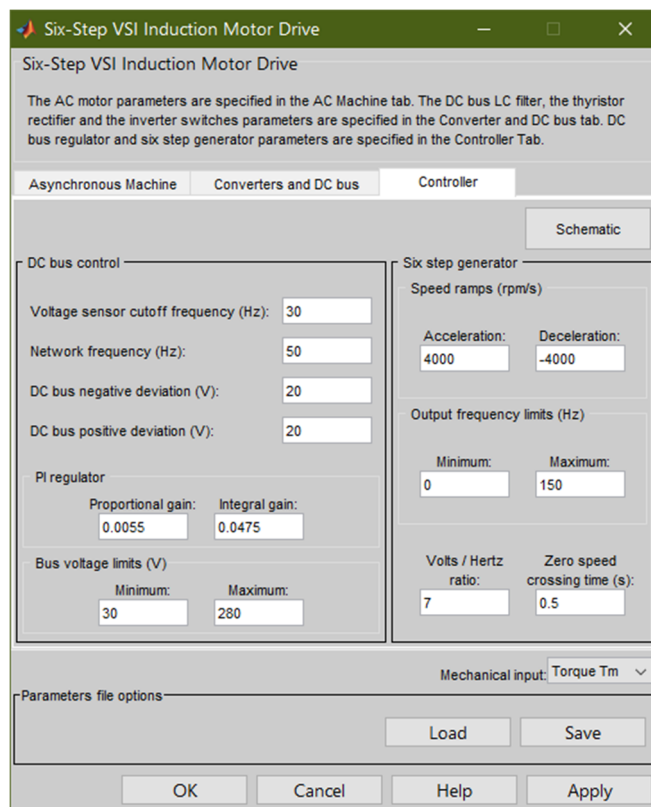
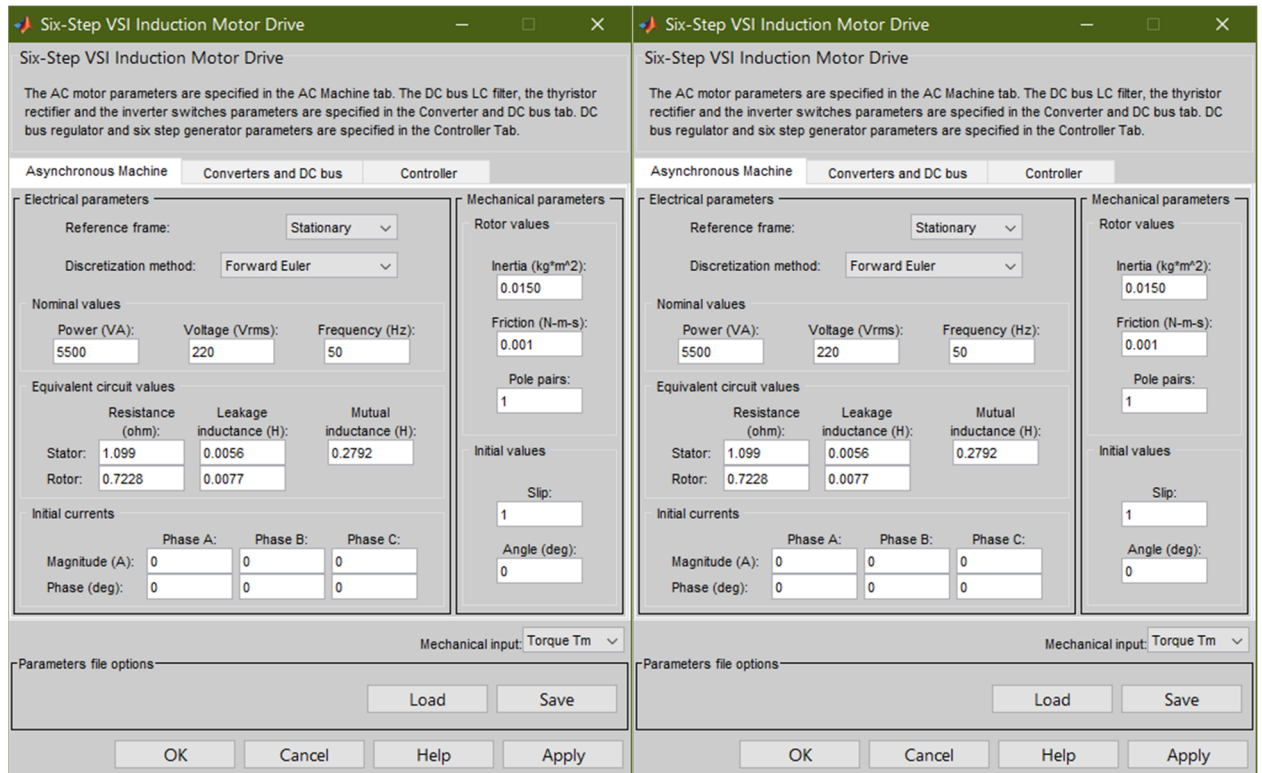


Рисунок 3.11 – Вікна налаштування блоку асинхронної машини  
Six Step VSI Induction Motor Drive

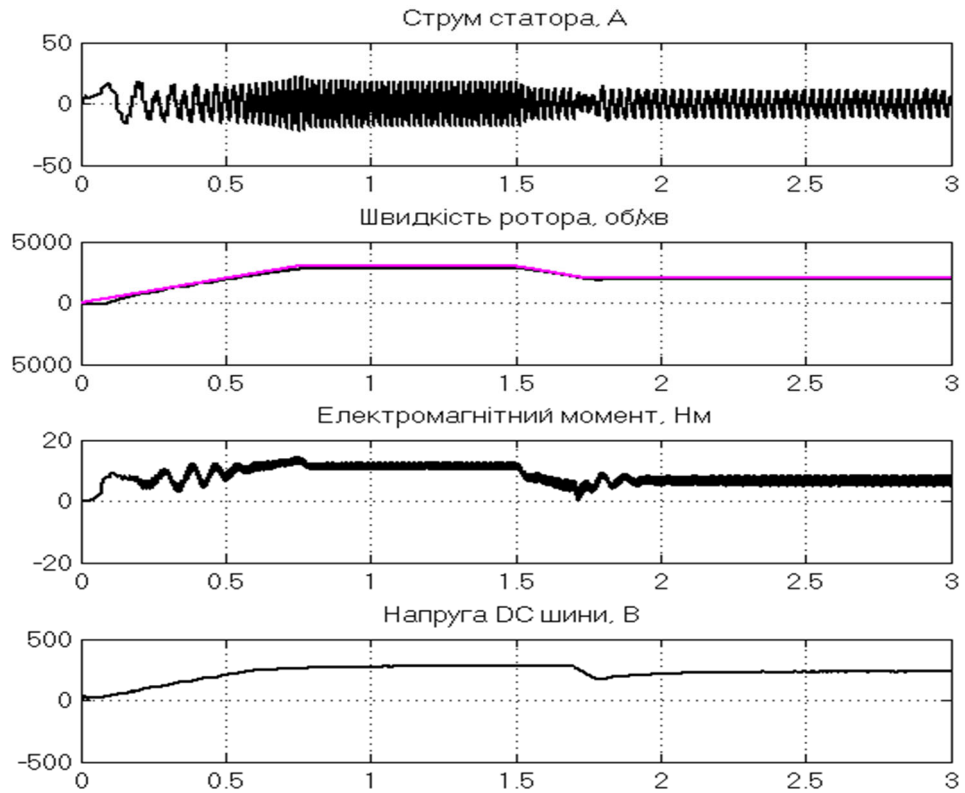


Рисунок 3.12 – Результати моделювання електроприводу при  $J = 0,025 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$

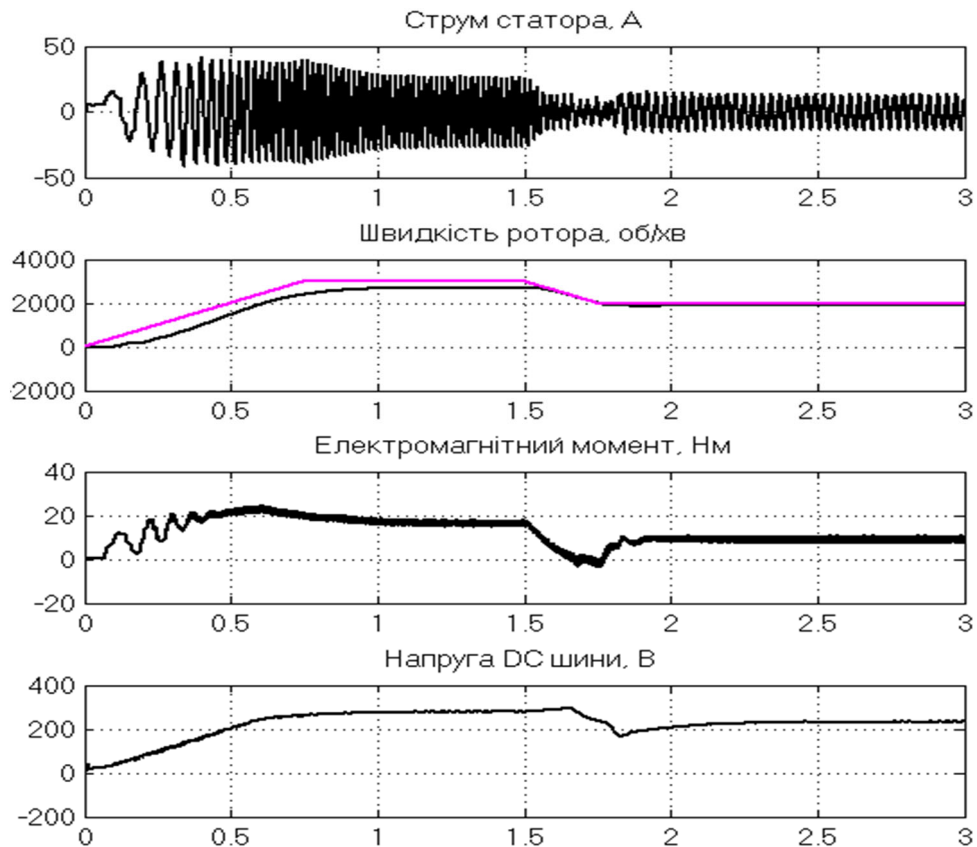


Рисунок 3.13 – Результати моделювання електроприводу при  $J = 0,06 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$

### 3.3 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електропривода з векторним управлінням

При проектуванні джерела живлення необхідно врахувати, що при гальмуванні двигуна запасена в ньому енергія повинна десь прийматися [4].

Коли в якості джерела застосовується батарея (акумулятор), енергія, що віддається двигуном, йде на зарядку батареї (батарея-акумулятор приймає струм будь-якого знаку). При використанні напівпровідникового випрямляча струм може протікати лише одного напрямку. Тому при перекачуванні енергії від двигуна через інвертор до випрямляча відбувається накопичення енергії в конденсаторі за рахунок збільшення напруги на ньому.

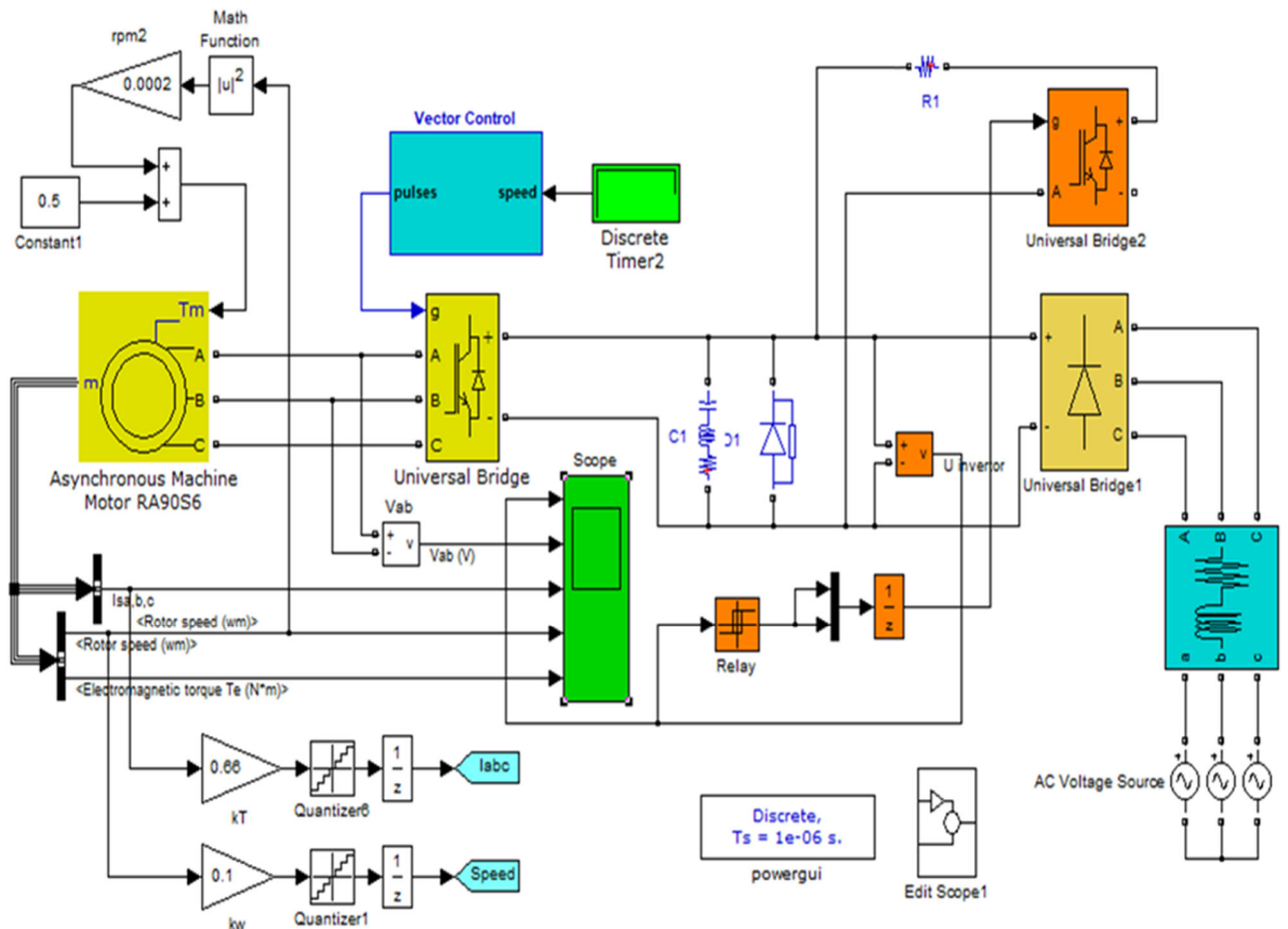


Рисунок 3.14 – Модель електроприводу із трифазним джерелом живлення інвертора

При збільшенні напруги на конденсаторі C1 більше 600 В за допомогою схеми управління включається ключ (Universal Bridge1) і підключає паралельно конденсатору так званий «гальмівний» резистор. Фактично надмірна енергія двигуна гаситься на резисторі. При невеликій потужності приводу (до 20...50 кВт) таке рішення можна прийняти, за більших потужностей двигуна необхідно шукати інші рішення.

Некерований напівпровідниковий підсилювач Universal Bridge отримує живлення від мережевої трифазної напруги та забезпечує напругу порядку 550 В. Фільтрування випрямленої напруги здійснюється конденсатором C1. Роль конденсатора подвійна: по-перше, зменшити пульсацію напруги випрямляча; по-друге, знизити внутрішній опір джерела за імпульсного навантаження.

Реалізація комутації «гальмівного» резистора R1 виконана на однофазному перетворювачі Universal Bridge1, у якого використовується лише верхній транзистор (ключ). Налаштування блоку показано на рисунку 3.15.

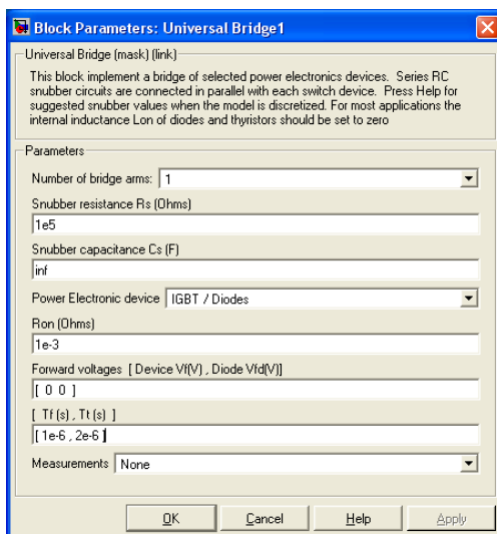


Рисунок 3.15 – Вікно налаштування блоку Universal Bridge1

Управління виконане від блоку Relay. Так як в однофазному перетворювачі Universal Bridge1 два транзистори, то на виході блоку Relay включаємо

мультиплексор на два входи – обидва транзистори управляються одним сигналом. Налаштування блоку Relay показано на рисунку 3.16.

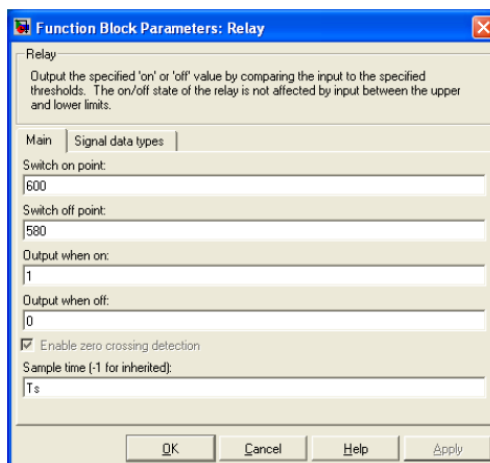


Рисунок 3.16 – Вікно налаштування блоку Relay

Увімкнення ключа з резистором R1 здійснюється при напрузі на виході випрямляча (на конденсаторі C1) 600 В і більше, виключення – при зниженні напруги до 580 В і нижче.

На рисунку 3.2 показані розраховані параметри схеми заміщення асинхронного двигуна та трифазного інвертора. Напруга живлення інвертора прийнято 600 В, яке забезпечує елемент VDC. Завдання швидкості забезпечують два блоки Speed та Speed1, установка навантаження здійснюється також двома блоками Torque та Torque1. По два блоки прийнято для розширення можливостей комбінування швидкістю та навантаженням.

Параметри ланцюгів зворотних зв'язків за частотою обертання та струму прийняті розрахунковими.

Процес моделювання в даній моделі прийнято з фіксованим кроком із використанням дискретної обчислювальної програми. Крок моделювання Ts задається у спеціальному вікні, доступ до якого можливий при зверненні до головного меню (File Model Properties Callbacks). У зв'язку з цим форма представлення налаштувань блоків моделі специфічна та у вікні Sample (Sampling) Time необхідно вказувати символ Ts. Відповідні перебудови було виконано. Крім

того, для прискорення рішення використано процедуру Accelerator. Перед початком моделювання Simulink створює додатковий файл, на який використовується час.

Для візуалізації результатів моделювання використовується осцилограф Scope. Центральною ланкою електроприводу є векторна схема управління, модель якої подана на рисунку 3.17.

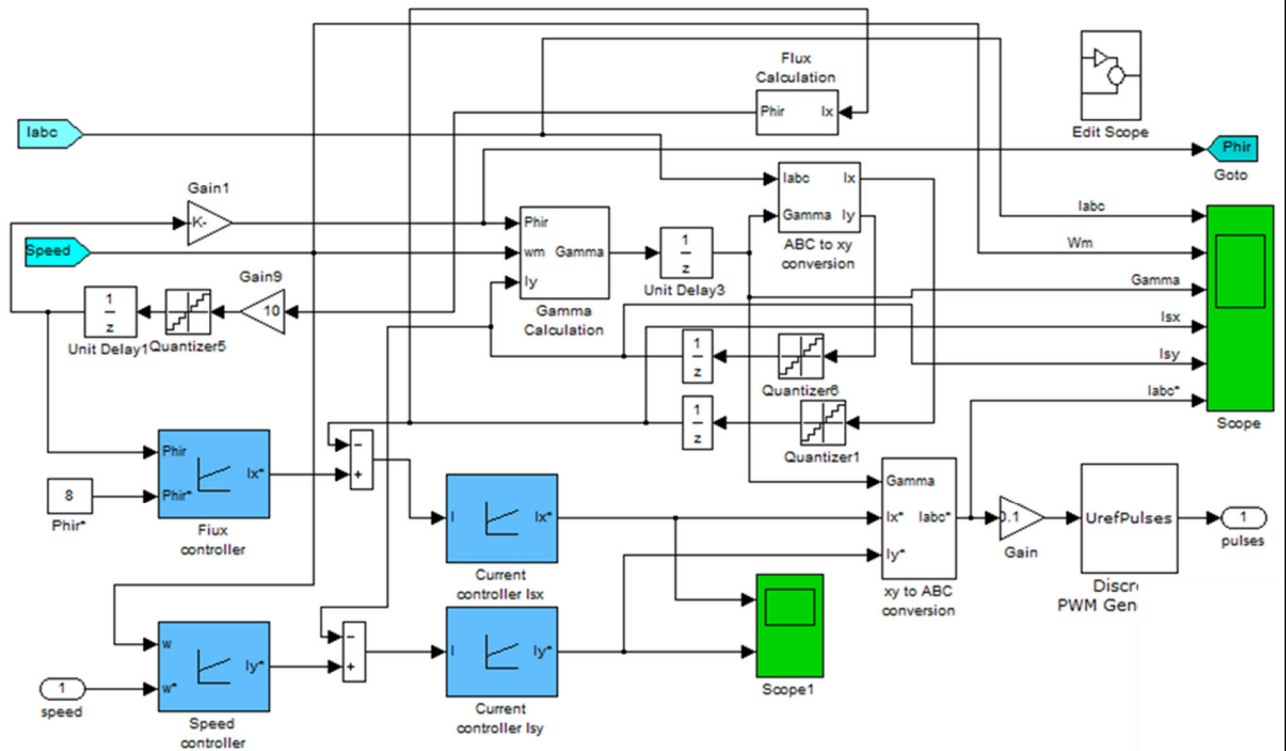


Рисунок 3.17 – Модель схеми керування приводом Vektor Control

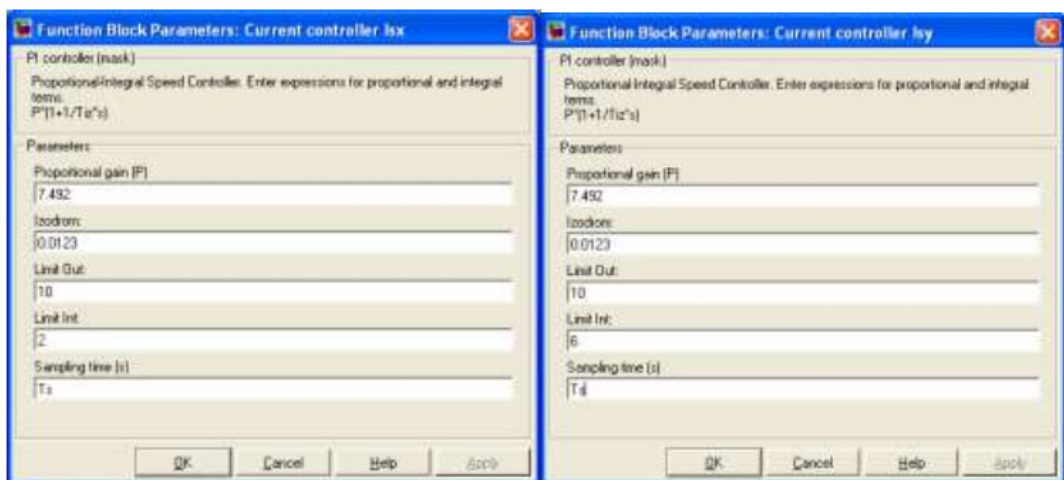


Рисунок 3.18 – Вікна введення параметрів регуляторів струму

Частина елементів схеми стандартна: це регулятори струму, потоку та швидкості. Відмінність цих моделей регуляторів від раніше використаних полягає у застосуванні дискретних інтеграторів та заповненні вікна Sampling time символом Ts. Оптимальні налаштування цих регуляторів розраховуються на одержання оптимальних за модулем перехідних процесів у відповідних контурах.

Основні значення параметрів регуляторів занесені без зміни.

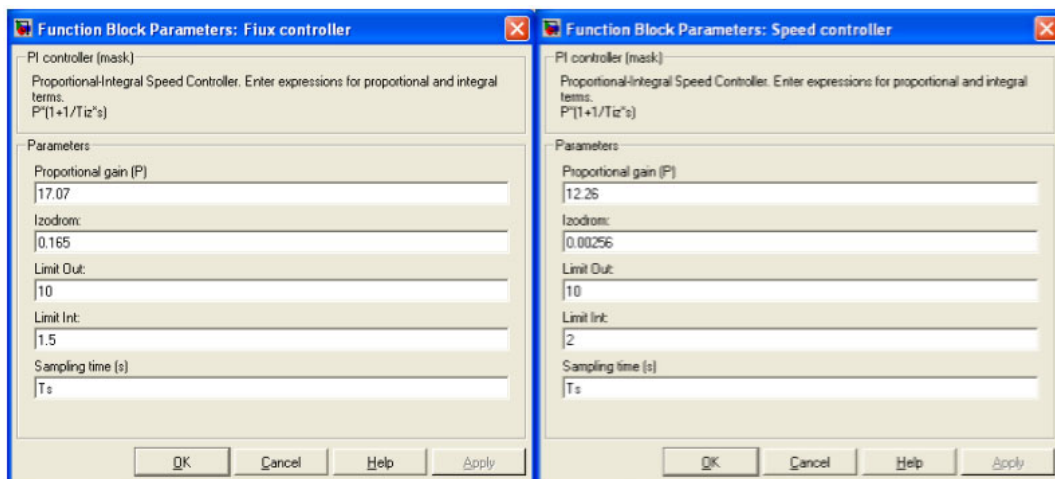


Рисунок 3.19 – Вікна введення параметрів регуляторів потоку та швидкості

На блок Vector Control (рисунок 3.17) від двигуна надходять два сигнали, доступні для вимірювання – трифазний струм статора та частота обертання ротора. Інші сигнали обчислює схема векторного управління. Насамперед, має бути обчислена частота обертання координат  $\omega_k$  (частота інвертора) та поточний кут повороту координат  $\gamma$ . Цю функцію виконує блок Gamma Calculation, схема моделі якого показана рисунку 3.20.

Блок реалізує два рівняння  $\gamma = \frac{1}{s}(\omega_k)$ . та  $\omega_u = \omega_k = p\omega_m + k_R R_R \frac{i_{Sy}}{\psi_{Rx}}$ .

Оскільки рівняння записані в абсолютних одиницях, а  $\omega_m$  діє в схемі в машинних одиницях, то на вході  $\omega_m$  (рисунок 3.21) з'явився підсилювач з коефіцієнтом підсилення 10. З цієї ж причини з'явився підсилювач на вході  $I_y$  з коефіцієнтом підсилення 1/0,66. Кут повороту системи координат формує

дискретний інтегратор, у схемі управління інтегратором передбачено скидання вихідної напруги інтегратора до нульового рівня при досягненні значення  $2\pi$ .

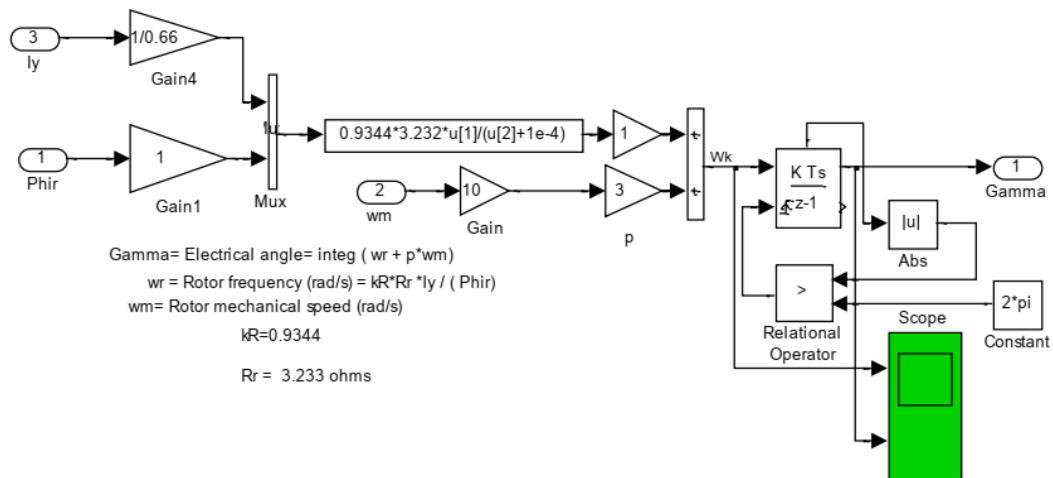


Рисунок 3.20 – Схема моделі блоку Gamma Calculation

Далі, регулятори струму в контурах потоку і швидкості виробляють завдання на струм статора двигуна у двох фазах і в системі координат, що обертається. Необхідно перевести завдання в нерухому систему та подати сигнал трифазним. Це завдання виконує блок xy to ABC conversion. В одному блоці поєднані два згадані вище перетворювачі (рисунок 3.21).

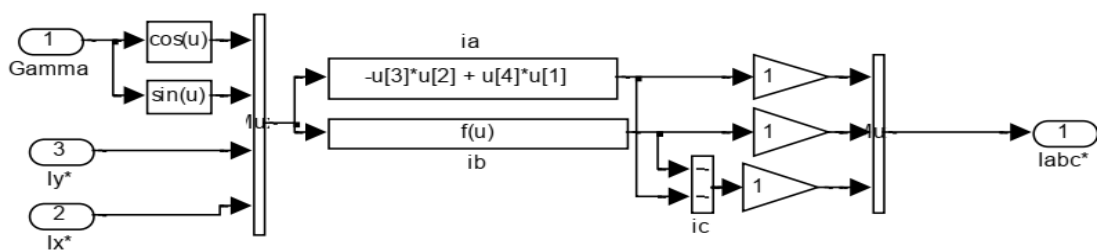


Рисунок 3.21 – Схема моделі блоку xy to ABC conversion

Перетворення йдуть у машинних одиницях, тому масштабні коефіцієнти не запроваджуються. На виході блоку маємо трифазне завдання на потрібній поточній частоті роботи інвертора.

Трифазний сигнал завдання, необхідної частоти та амплітуди струму статора, надходить у блок керування інвертором Discrete PWM Generator. Вікно установки параметрів блоку керування інвертором показано на рисунку 3.22. Особливістю схеми керування інвертором є завдання несучої частоти 1250 Гц, що удвічі менше значення частоти комутації (пульсацій). Максимальне значення амплітуди вхідного сигналу завдання будь-якої полярності 10 В.

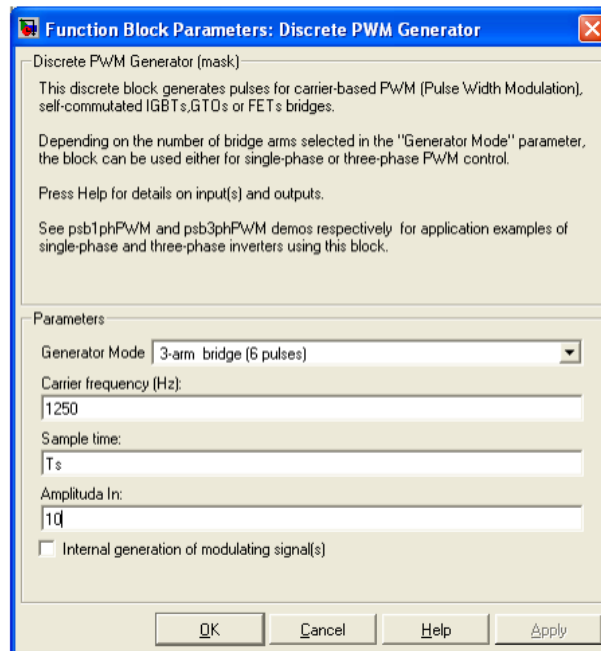


Рисунок 3.22 – Вікно введення параметрів блоку Discrete PWM Generator

Вихідні сигнали блоку Discrete PWM Generator забезпечують управління шістьма транзисторами інвертора та упаковані у мікропроцесорну шину.

Інвертор відпрацьовує завдання: на обмотках двигуна з'являється напруга та струм. Управління струмове, тому регулятори струму керують струмами статора по осях  $x$  і таким чином, щоб швидше відпрацювати завдання при обмеженні струму на допустимому рівні.

Сигнал зворотного зв'язку за дійсним струмом статора, квантований і затриманий після обробки на обумовлені раніше значення, надходить на блок ABC to xy conversion і перетворюється на двофазний і перетворюється на систему

координат, що обертається. Схема моделі блоку показано на рисунку 3.23. Перетворення здійснюються у машинних одиницях.

Отримані після вироблення сигнали зворотних зв'язків за струмом своїм осям), квантовані за рівнем і затримані на час обробки, надходять у ланцюг порівняння із заданими значеннями на регулятори струму.

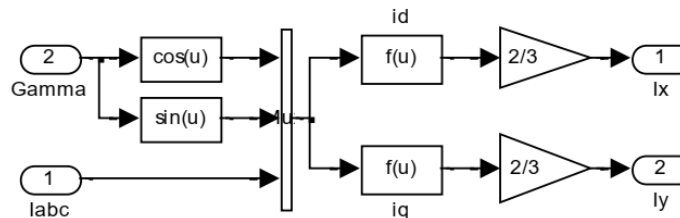


Рисунок 3.23 – Схема моделі блоку ABC to xy conversion

Оскільки елементів зворотного зв'язку по магнітному потоку немає, то доводиться ланцюг намагнічування двигуна моделювати за даними розрахунку схеми заміщення. Схема моделі ланцюга намагнічування двигуна представлена на рисунку 3.24.

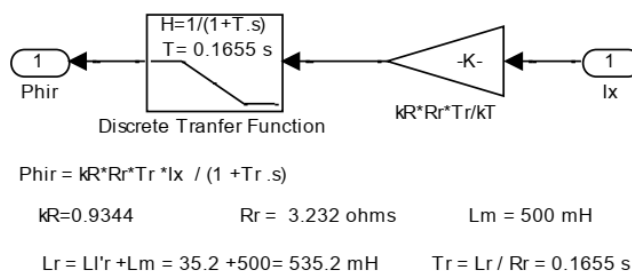


Рисунок 3.24 – Схема моделі ланцюга намагнічування двигуна

Модель складена відповідно до виразу

$$\psi_{Rx} = \frac{T_R}{(1 + T_R s)} k_R R_R i_{Sx},$$

Єдина відмінність полягає у наявності коефіцієнта зворотного зв'язку, щоб перевести машинний струм  $I_{sx}$  в абсолютний. Сигнал, сформований на виході цього блоку, використовується як зворотний за потоком в контурі потоку.

Квантування та відставання, введені в контур зворотного зв'язку, характеризують час, витрачений на обчислення моделі з постійною точністю.

Останній блок області редагування, який включений в схему управління приводом з векторним управлінням, дозволяє відкрити головне меню графічних діаграм, створених в процесі моделювання.

У головному меню відображаються всі функції редагування та обробки, які Simulink надає для створеної діаграми. Щоб відкрити меню, необхідно відкрити порожній екран області видимості і запустити імітацію перед моделюванням. На екрані відображаються результати моделювання та головне меню.

Найбільш напружений режим роботи приводу – генераторний (рекуперативний). Такий режим можливий за активного моменту опору і в цьому режимі вирішальну роль виконує «гальмівний» резистор R1. Тому навантаження на двигун подаватимемо по входу Та.

Опір гальмівного резистора R1 прийнято 5 Ом, ємність конденсатора C1 взята 300 мкФ. Програми управління частотою обертання та активним моментом у часі занесені до таймерів Timer1 та Timer та представлені на рисунку 3.25.

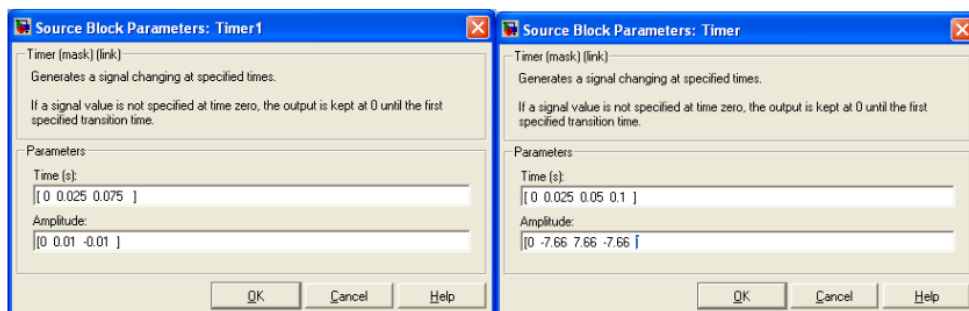


Рисунок 3.25 – Часові програми керування частотою обертання та активним моментом опору

На рисунку 3.26 представлені результати моделювання роботи електроприводу з векторним керуванням, укомплектованого повністю необхідним обладнанням.

Перший висновок, який необхідно зробити, це принципово інший характер реакції приводу на управління та збурення.

Перерегулювання стало чітко вираженим фактом і є наслідком дії активного моменту. Однак завдання щодо частоти обертання виконується досить акуратно, хоча через великі перерегулювання чіткість відпрацювання заданої частоти обертання в цьому масштабі дещо розмита.

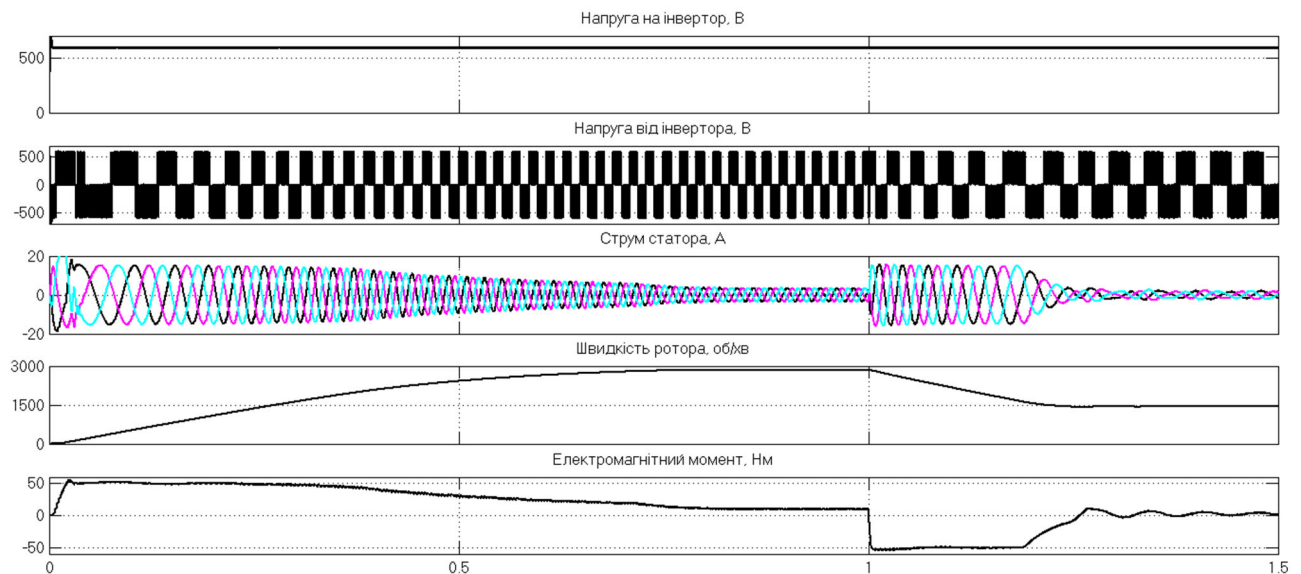


Рисунок 3.26 – Результати моделювання електроприводу з векторним керуванням при роботі на активне навантаження при переході з великої на середню швидкість

І, третє, напруга джерела живлення вибирається у 600 В, за винятком моменту включення приводу до мережі.

Як видно з результатів моделювання, розроблений електропривод впевнено працює у діапазоні 1000 з різним характером навантаження, при впливі навантаження номінального значення астатичні властивості системи не порушуються у всьому діапазоні частоти обертання.

## 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

У кваліфікаційній роботі розглянуто автоматизований електропривод живильника пилу котлоагрегату. Для реалізації даного рішення власник залучає власні кошти, несе витрати по розробці, впровадженню та експлуатацію нової розробки.

Головний шлях до якісного зсуву у виробничих силах – перехід до якісного інтенсивного розвитку, для реалізації якого необхідна велика сила по створенню машин, механізмів і технологій по впровадженні в практику досягнень науки та техніки. При цьому особливого значення набувають: вибір найбільш надійних шляхів підвищення ефективності виробництва, якості продукції, принципи наукового обґрунтованого ціноутворення.

Модернізація електроприводу живильника пилу котлоагрегату виконується за рахунок заміни базової системи керування на систему на основі перетворювача частоти. В порівнянні з базовою системою керування нова система має такі переваги:

- а) покращення показників економії електроенергії;
- б) зменшення похибки керування;
- в) підвищенням ефективності та надійності системи;

Визначимо ефективність застосування нової системи керування електроприводу шляхом співставлення показників базового і нового варіантів.

При співставленні варіантів технічних рішень по впровадженню нових видів обладнання і технологічних процесів використовують метод порівняльної економічної ефективності. При цьому методі основними показниками є мінімум приведених затрат  $Z$ , який є сумою річних експлуатаційних затрат  $C$  і капітальних вкладень  $K$ , приведених до однієї розмірності в відповідальності з нормативним коефіцієнтом ефективності  $E_n$ .

Капітальні вкладення включають в себе всі одноразові витрати: відпускну ціну нової техніки, затрати на її транспортування, монтаж і наладку, затрати на демонтаж старого обладнання та інше.

$$Z = C + E_n \cdot K, \quad (4.1)$$

де  $E_n = 0,08 \dots 0,15$  (для нової техніки  $E_n = 0,15$ ).

Повні економічні витрати:

$$Z_e = Z_{en} + Z_{op} + Z_{ab} + Z_{mb}, \quad (4.2)$$

де індекси **б** і **н** відносяться до базового і нового варіантів.

Термін окупності:

$$T_{ок} = \frac{K_n - K_b}{Z_b - Z_n}, \quad (4.3)$$

де  $T_{ок}$  – строк окупності додаткових капітальних затрат.

#### 4.1 Визначення величини капітальних витрат нового варіанту

Кошторис на обладнання для базового і нового варіантів приведений в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Визначення кошторису витрат для нового і старого варіантів

Найменування електрообладнання	Кіль- кість, шт.	Кошторисна вартість			
		Базова		Нова	
		за шт.,	Всього,	за шт.,	Всього,
		грн	грн	грн	грн
Релейно-контакторна система	1	800	800	-	-
Двигун АИР100L2 5,5 кВт	1	6506	6506	6506	6506
Автоматичний вимикач Eaton (Moeller) PL6-C16/3	2	593	1186	593	1186

Найменування електрообладнання	Кількість, шт.	Кошторисна вартість			
		Базова		Нова	
		за шт.,	Всього,	за шт.,	Всього,
		грн	грн	грн	грн
Автоматичний вимикач Eaton (Moeller) PL6-C4/2	1	930	930	930	930
Автоматичний вимикач Eaton (Moeller) PL6-C2/2	1	513	513	513	513
Перетворювач частоти LG Starvert SV055 iG5A-4	1	-	-	2331	23315
Мікропроцесорний регулятор МТР-8	1	8444	8444	8444	8444
Клемно-блочний з'єднувач КБЗ-24-17	1	800	800	800	800
Блок вентиляний двоклапанний датчиків тиску БВ-113-40	2	1818	3636	1818	3636
Зрівняльна судина моделі 5424	1	900	900	900	900
Датчик рівня Сапфір-22-ДД-2410	1	4970	4970	4970	4970
Всього			28685		51200
Транспортні витрати (13%)			3729		6656
Всього ціна обладнання			32414		57856
Монтажні роботи (10%)			2868		5120
Капітальні вкладення всього			35282		62976

#### 4.2 Розрахунок фонду заробітної платні

Розрахуємо оплату праці по існуючому тарифу. Так як установка є установкою з напругою до 1000 В, де напруга живлення  $U = 0,4$  кВ, то згідно ПУЕ обслуговувати дану установку може 2 робітники, у яких розряд не нижче четвертого, а група допуску не нижче ніж третя по електробезпеці.

Постійна заробітна плата електромеханіка 4-го розряду по існуючому тарифу складає

$$Z_T = 14260 \text{ грн.} \quad (4.4)$$

Оплата праці за шкідливі умови праці:

$$P_{yn} = Z_T \cdot H_{yn} = 14260 \cdot 0,04 = 570,4 \text{ грн,} \quad (4.7)$$

де  $H_{yn}$  – надбавка за умови праці, що для четвертого розряду складає 4%.

Всього постійна заробітна плата 1 робітника складає:

$$Z_{\text{пост}} = Z_T + P_{yn} = 14260,0 + 570,4 = 14830,4 \text{ грн.} \quad (4.8)$$

Оплата премій  $K_{п} = 15 \dots 20\%$ .

$$P_{\text{пр}} = \frac{Z_T \cdot K_{п}}{100} = \frac{14830,4 \cdot 15}{100} = 2224,56 \text{ грн.} \quad (4.9)$$

Всього основна заробітна плата:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{пост}} + P_{\text{пр}} = 14830,4 + 2224,56 = 17054,96 \text{ грн.} \quad (4.10)$$

Розрахуємо додаткову заробітну плату:

$$Z_{\text{дод}} = Z_T \cdot 0,1 = 14260,0 \cdot 0,1 = 1426 \text{ грн.} \quad (4.11)$$

Знайдемо відрахування на єдиний соціальний внесок, що складають 22% від суми додаткової та основної заробітної плати.

$$Z_{\text{ВВ}} = 0,22 \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{дод}}) = 0,22 \cdot (17054,96 + 1426,0) = 4065,81 \text{ грн.} \quad (4.12)$$

Загальний фонд оплати праці 2 працівників складає:

$$\Phi = (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{дод}} + Z_{\text{ВВ}}) \cdot 2 \cdot 12 = (17054,96 + 1426,0 + 4065,81) \cdot 2 \cdot 12 = 541122,51 \text{ грн} \quad (4.13)$$

#### 4.3 Розрахунок експлуатаційних витрат для базового і нового варіантів

Розмір капіталовкладень для базового і нового варіантів:

$$K_{\text{б}} = 35282 \text{ грн,} \quad K_{\text{н}} = 62976 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію при встановленні перетворювача частоти зменшується на 30 %:

$$Z_{\text{енб}} = P \cdot \Phi \cdot m_0 \cdot K, \quad (4.14)$$

де  $P$  – потужність двигунів;

$\Phi$  – кількість робочих годин в день;

$m_0$  – кількість робочих днів у році;

$K$  – вартість електроенергії.

Для привода живильника пилу:

$$Z_{\text{енб}} = 5,5 \cdot 24 \cdot 200 \cdot 3,6 = 95040 \text{ грн,}$$

$$Z_{\text{енн}} = Z_{\text{енб}} - 0,3 \cdot Z_{\text{енб}} = 95040 - 0,3 \cdot 95040 = 66528 \text{ грн.} \quad (4.15)$$

#### 4.4 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання

При використанні частотного перетворювача можлива безперервна робота електродвигуна, зменшуються пускові струми, втрати в кабелях, збільшується надійність всієї установки, тобто кількість поломок зменшується, а отже надійність системи електроприводу зростає. Заплановані витрати на поточний ремонт і обслуговування при базовому варіанті становлять 10%, а при новому 3%.

$$Z_{\text{сп}} = 0,1 \cdot K_6 = 0,1 \cdot 35282 = 3528,2 \text{ грн.} \quad (4.16)$$

$$Z_{\text{нр}} = 0,03 \cdot K_{\text{н}} = 0,03 \cdot 62976 = 1889,28 \text{ грн.} \quad (4.17)$$

Витрати на амортизаційні відрахування:

$$Z_a = \sum N_{ai} \cdot K_i, \quad (4.18)$$

де  $N_a$  – норма амортизаційних відрахувань;

$$Z_{\text{аб}} = 0,5 \cdot 35282 = 17641 \text{ грн.}$$

$$Z_{\text{ан}} = 0,5 \cdot 62976 = 31488 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали для ремонту та обслуговування при базовому варіанті складають 20%, а при новому 5% від фонду оплати праці:

$$Z_m = 0,2 \cdot \Phi \quad (4.19)$$

$$Z_{\text{мб}} = 0,2 \cdot 541122,51 = 108224,5 \text{ грн.}$$

$$Z_{\text{мн}} = 0,05 \cdot 541122,51 = 27056,13 \text{ грн.}$$

Повні експлуатаційні витрати:

$$Z_e = Z_{ен} + Z_{ор} + Z_{ао} + Z_{мо} \quad (4.20)$$

$$Z_{оо} = 95040 + 3528,20 + 17641 + 108224,5 = 224433,7 \text{ грн,}$$

$$Z_{ен} = 66528 + 1889,28 + 31488 + 27056,12 = 126961,41 \text{ грн.}$$

#### 4.5 Розрахунок економічної ефективності

Розрахуємо річний економічний ефект за експлуатаційними витратами згідно формули (4.2):

$$Z_{еф} = 67619,28 - 48342,02 = 19277,26 \text{ грн.}$$

Термін окупності:

$$T_{ок} = \frac{K_n - K_o}{Z_o - Z_n} = \frac{46278 - 24107}{67619,28 - 48342,02} = 1,15 \text{ року.} \quad (4.21)$$

Отже, модернізація для даного типу обладнання є економічно доцільною. Малий термін окупності пояснюється порівняно невеликою різницею капітальних вкладень для базового та нового варіантів.

#### 4.6 Техніко-економічне обґрунтування вибору системи електроприводу

Для даного технологічного процесу можна використати такі системи: релейно-контакторну, ПЧ-АД.

Для розгляду економічної сторони вигідності тієї чи іншої системи використовуємо метод зведених витрат:

$$Z = E_n \cdot K + C, \quad (4.22)$$

де  $E_n$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності ( $E_n = 0,2$ ),

$K$  – капіталовкладення;

$C$  – собівартість:

$$C = C_a + C_o + C_{\Delta W}, \quad (4.23)$$

де  $C_a$  – амортизаційні відрахування;

$$C_a = E_a \cdot K, \quad (4.24)$$

$C_o$  – витрати на обслуговування і ремонт:

$$C_o = E_o \cdot K, \quad (4.25)$$

де  $E_a = 0,05$  – нормативний коефіцієнт амортизаційних відрахувань;

$C_{\Delta W}$  – витрати на електроенергію:

$$C_{\Delta W} = m_o \cdot \Delta W, \quad (4.26)$$

де  $E_o = 0,015$  – нормативний коефіцієнт витрат на обслуговування і ремонт;

$m_o = 2,0218$  грн/кВт-год – вартість електроенергії;

$\Delta W$  – кількість витраченої електроенергії за рік:

$$\Delta W = \Delta P \times T_p, \quad (4.27)$$

де  $T_p$  – річний час роботи обладнання ( $T_p = 400$  год).

Витрати потужності, кВт:

$$\Delta P_{1,2} = k_s \cdot P_n \times (1 - \eta_o) / \eta_o, \quad (4.28)$$

де  $k_3 = 0,7$  – коефіцієнт завантаження,

$\eta_0 = 0,88$  – ККД двигуна.

Термін окупності:

$$T = \frac{K}{3}. \quad (4.29)$$

Результати розрахунків зводимо до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Порівняння варіантів систем

Показники	Тип системи	
	Релейно-контакторна	ПЧ-АД
Потужність двигуна $P_n$ , кВт	5,5	
Капіталовкладення $K$ , грн	35282	62976
$E_a$	0,05	
Амортизаційні відрахування $C_a = E_a \cdot K$ , грн.	1764,1	3148,8
$E_o$	0,015	
Витрати на обслуговування і ремонт $C_o = E_o \cdot K$ , грн.	529,23	944,64
Вартість електроенергії $m_o$ , грн/кВт-год	3,6	
Коефіцієнт завантаження $k_3$	0,7	
Річний час роботи $T_p$ , год	4800	
ККД $\eta_0$	0,86	0,86
Витрати потужності $\Delta P = k_3 \cdot P_n \cdot (1 - \eta_0) / \eta_0$ , кВт	0,627	0,627
Кількість витраченої електроенергії за рік $\Delta W = \Delta P \cdot T_p$ , кВт	3008,37	3008,37
Витрати на електроенергію $C_{\Delta W} = m_o \cdot \Delta W$ , грн	10830,14	10830,14
Собівартість $C = C_a + C_o + C_{\Delta W}$ , грн.	13123,47	14923,58

Показники	Тип системи	
	Релейно-контакторна	ПЧ-АД
Нормативний коефіцієнт економічної ефективності $E_n$	0,2	
Зведені витрати $Z = E_n \cdot K + C$ , грн.	20179,87	27518,78
Термін окупності $T = K/Z$ , р.	1,75	2,29

З економічної точки зору швидко окупляться обидві системи, але релейно-контакторна система є менш надійною і потребує більших витрат на ремонт та обслуговування. Тому вибираємо систему ПЧ-АД з терміном окупності 2,29 року.

## 5 РЕЗУЛЬТАТИВНА ЧАСТИНА

### Висновки по кваліфікаційній роботі та пропозиції

У кваліфікаційній роботі розглянуто електропривод живильника пилу котлоагрегату, розраховано потужність і обрано приводний асинхронний двигун типу АИР100L2 потужністю 5,5 кВт. Розроблено електричну принципову схему електроприводу. Розраховано параметри математичної моделі двигуна і побудовано електронну модель системи електроприводу, яку досліджено у середовищі Matlab. Виявлено, що використання перетворювача частоти з скалярним законом регулювання асинхронного двигуна підтримує задані оберти з точністю до 5 %, а з векторним – біля 1...1,5 %.

В економічній частині роботи наведені розрахунок ефективності і термін окупності витрат на автоматизований електропривод котельної установки: Річний економічний ефект складає 27518 грн., термін окупності 2,29 року.

Пропозиції щодо автоматизації електроприводу живильника пилу котлоагрегату мають практичний характер, обґрунтовані теоретичними розрахунками, та можуть бути впроваджені у виробництво.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила устройства электроустановок: 7-е изд., перераб. и дополн. - М.: Энергоатомиздат, 2003. - 776 с.
2. Электротехнический справочник: В 3 т. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - Т.2.: Электротехнические изделия и устройства / Под. общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И.Н. Орлов) и др. 1986. - 712 с.
3. Кацман М.М. Электрические машины. - М.: Высшая школа, 1991.
4. Кацман М.М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу. - М.: Высшая школа, 2000.
5. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. - М.: Мастерство, 2007.
6. Морозов Э.В. и др. Справочник электрика предприятий по хранению и переработки зерна. – М.: Агропромиздат, 1989.
7. Методические указания к выполнению электротехнической части ДП для студентов механических специальностей / А.А. Галиулин, П.Н. Монтик, Е.П. Штепа. - Одесса: ОНАПТ, 2011.
8. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MayLab 6.0: 2001. – 320 с.
9. Герман-Галкин С.Г. Проектирование мехатронных систем на ПК. - СПб КОРОНА-Век, 2008.
10. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): уч. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 320 с.
11. <https://lowara.ua/lowara-multistage.php>
12. <https://lowara.ua/catalog/data/sv.pdf>