

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



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:

«Модернізація електроприводу компресора скрапленого кисню»

Здобувач: Тонкус Р. О.

IV курсу, групи АЕМ-40

Керівник: доцент Ревенюк Т. А.

Кваліфікаційна робота бакалавра допускається до захисту.

Рішення кафедри від «_____» _____ 2024 р., протокол №_____.

Завідувач кафедри ЕтаМ _____ Петро ОСАДЧУК

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Автоматизації та робототехніки

Кафедра: Електромеханіки та мехатроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Галузь знань: 14 – Електрична інженерія

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри ЕтаМ

д.т.н., доц. Осадчук П.І.

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

здобувачу вищої освіти

Тонкус Руслану Олександровичу

Тема роботи: «Модернізація електроприводу компресора скрапленого кисню».

Керівник роботи: Ревенюк Тетяна Анатоліївна, к.ф.-м.н., доцент.

2 Затверджено наказом ОНТУ № 797-03 від 19.12.2023 р.

Строк подання студентом роботи: 12.06.2024 р.

Вихідні дані до роботи: Компресорна установка ВШ-4.2/200, для стиснення повітря у складі стаціонарних газороздільних станцій до тиску 20МПа (200 кгс/см²), частота обертання колінчастого валу компресору $n_{KB} = 1000 \dots 1500$ об/хв.

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

Вступ. 1. Загальна частина. Технічні характеристики компресорної установки.

2 Розрахунково-конструкторська частина. Опис технологічної схеми компресорної установки

3 Дослідження роботи електроприводу компресорної установки на моделі.

4. Організація та технологія монтажу, ремонту і обслуговування та техніка безпеки праці при обслуговуванні електроприводу компресорної установки.

5 Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електро-приводу.

6. Висновки.

Список використаних джерел. Додатки.

5 Перелік демонстраційного матеріалу: слайди презентації (12 шт.): 1 Титульний. 2 Мета, задачі, методи. 3 Технологічна схема компресорної установки 4 Розрахунок потужності двигуна, технічні характеристики. 5 Статичні характеристики електроприводу. 6 Структурна схема перетворювача частоти. 7 Принципова електрична схема силової частини. 8 Модель електроприводу компресорної установки з прямим пуском. 9 Результати моделювання приводу з прямим пуском. 10. Модель модернізованого електроприводу компресорної установки. 11 Результати моделювання приводу після модернізації. 12 Висновки.

6 Консультанти розділів проекту (роботи)

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

--	--	--	--

7 Дата видачі завдання: 07.02.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим.
1	Вступ. Загальна характеристика роботи. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.	05.03.2024	
2	Розрахунково-конструкторська частина. Опис технологічної схеми компресорної установки. Загальна характеристика компресорної установки, як об'єкта управління. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми привода компресорної установки. Параметрична схема та методи регулювання швидкості обертання електроприводу компресорної установки. Формулювання вимог до електроприводу компресорної установки, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок статичних характеристик двигуна.	20.04.2024	
3	Дослідження роботи електроприводу компресорної установки. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу компресорної установки. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи електроприводу компресорної установки до і після модернізації.	15.05.2024	
4	Організація та технологія монтажу, ремонту і обслуговування та техніка безпеки праці при обслуговуванні електроприводу конвеєра хлібопекарської печі.	03.06.2024	
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 бакалавра	17.06.2024	
8	Перевірка роботи на добросовісність. Рецензування роботи	18.06.2024	
9	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	25.06.2024	

Здобувач-дипломник _____ Тонкус Р. О.

Керівник _____ Ревенюк Т. А.

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 _____ Тонкус Р. О..

РЕФЕРАТ

Тонкус Руслан Олександрович «Модернізація електроприводу компресора скрапленого кисню». Кваліфікаційна робота бакалавра. Одеса: ОНТУ, 2024. – 78 с. Іл.: 18. Табл.: 8.

У кваліфікаційній роботі описано автоматизований електропривод компресорної установки, області його застосування та конструктивні особливості. Сформульовано вимоги до електроприводу, розраховано навантаження та обрано двигун для приводу компресорної установки.

Вибрано систему електроприводу «перетворювач частоти - асинхронний двигун», обрано та досліджено закон керування за допомогою перетворювача частоти.

Розраховано електричні параметри схеми вмикання двигуна. Змодельовано перехідні процеси двигуна при прямому пуску та в комбінації з перетворювачем частоти, побудовано механічні та електромеханічні статичні характеристики.

Розраховано економічний ефект від модернізації електроприводу компресорної установки та наведено заходи з охорони праці та техніки безпеки.

Ключові слова: компресорна установка, автоматизований електропривод, перетворювач частоти, математична модель, частотне регулювання обертів, механічна характеристика.

ABSTRACT

Tonkus Ruslan Oleksandrovysh "Modernization of the electric drive of the liquefied oxygen compressor". Bachelor's qualifying work. Odesa: ONTU, 2024. – 78 p. Illustration: 18. Table: 8.

The qualification work describes the automated electric drive of the compressor unit, its areas of application and design features. The requirements for the electric drive have been formulated, the load has been calculated and the engine has been selected to drive the compressor unit.

The electric drive system "frequency converter - asynchronous motor" was selected, the control law using the frequency converter was selected and investigated.

The electrical parameters of the engine start-up circuit are calculated. Transient processes of the engine during direct start and in combination with a frequency converter were simulated, mechanical and electromechanical static characteristics were constructed.

The economic effect of the modernization of the electric drive of the compressor unit is calculated, and measures for occupational health and safety are given.

Keywords: compressor unit, automated electric drive, frequency converter, mathematical model, frequency regulation of revolutions, mechanical characteristics.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА.....	10
1.1 Технології виробництва рідкого кисню.....	10
1.2 Криогенний метод розділення повітря.....	11
1.3 Технічні характеристики компресорної установки.....	14
1.4 Загальна характеристика електроприводу компресору.....	16
2 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	18
2.1 Вимоги до електроприводу компресорної установки.....	18
2.2 Розрахунки для вибору двигуна.....	19
2.3 Механічна характеристика електродвигуна.....	21
2.4 Розрахунки параметрів лінії живлення електродвигуна.....	24
2.5 Вибір захисного обладнання.....	26
2.6 Релейно-контакторна схема включення електродвигуна.....	30
2.7 Застосування перетворювача частоти.....	31
2.8 Вибір перетворювача частоти.....	42
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	47
3.1 Постановка задачі моделювання роботи електропривода на ПЕОМ.....	47
3.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення двигуна електропривода станції газорозділення.....	50
3.3 Моделювання прямого пуску двигуна електропривода.....	54
3.4 Моделювання пуску двигуна електропривода з ПЧ.....	56
3.5 Висновки і пропозиції.....	58
4 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ.....	59
4.1 Монтаж та обслуговування компресорної установки.....	59
4.2 Роботи з обслуговування компресорної установки.....	60

					КРБ.ЕтаМ.141.797-03.1.9			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Тонкус Р. О.				Модернізація електроприводу компресора скрапленого кисню	Літ.	Аркуш	Аркушів
Керівник	Ревенюк Т. А.						7	78
					ОНТУ, АЕМ-40			
Зав.кафедри	Осадчук П.І.							

4.3	Роботи з ремонту компресорної установки.	61
4.4	Охорона праці при обслуговуванні компресорної установки.	63
5	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	65
5.1	Розрахунок економічної ефективності.	65
5.2	Розрахунок капітальних вкладень.....	67
5.3	Розрахунок річного фонду заробітної плати.	68
5.4	Розрахунок витрат на електроенергію.	71
5.5	Розрахунок витрат на обслуговування та ремонт.	72
5.6	Розрахунок терміну окупності.	74
	ВИСНОВКИ	75
	Перелік використаних джерел.....	76

ВСТУП

Жодне виробництво не обійдеться без використання електродвигунів чи приводів. І саме технологічне обладнання для виробництва продукції є основним споживачем електроенергії на підприємствах. У Європі більшість обладнання має регульоване керування, що дозволяє змінювати навантаження та режим роботи. В свою чергу, це не лише економить електроенергію, а й збільшує ресурс роботи цього обладнання. В нашій державі, нажаль, показники з використання енергозберігаючого устаткування на підприємствах значно нижчі.

Вирішити цю проблему не просто, тому що повна заміна виробничого обладнання буде потребувати великих капітальних вкладень, що по карману далеко не кожному підприємству. Але все ж можна модернізувати навіть застарілі агрегати так, щоб вони працювали більш ефективно та використовували менше електроенергії.

В роботі виконано обґрунтування та розрахунок електроприводу компресорної установки.

Актуальність теми: Впровадження частотно-регулюючі системи керування дозволяє суттєво підвищити продуктивність виробництва, шляхом створення відповідних алгоритмів керування приводом.

Об'єкт дослідження: Методи підвищення надійності та енергоефективності трифазних асинхронних двигунів з коротко замкнутим ротором.

Предмет дослідження: Причини виникнення відмов в елементах електроприводу при його експлуатації.

Мета: Зменшення електроенергії, що споживається електроприводом, підвищення його надійності та зменшення витрат на експлуатацію.

Завдання дослідження: Модернізувати електропривод компресора скрапленого кисню, виконати розрахунок основних параметрів електрообладнання.

Методи дослідження: Математичне моделювання роботи електродвигунів та пуско-захисної апаратури в електроприводах з трифазними асинхронними двигунами.

Практичне значення: Підвищення ресурсів двигунів та приводів, зменшення затрат на обслуговування та ремонт, економія електроенергії.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Технології виробництва рідкого кисню.

Сучасність ставить дедалі більші виклики до ефективності різноманітних технологічних процесів. І один з таких процесів, це виробництво рідкого кисню різного ступеню чистоти. Останнім часом, особливо після пандемії COVID-19, виникла потреба у великих об'ємах рідкого кисню «медичної якості», тобто об'ємна частка кисню у рідині повинна бути не менше за 99,5% (ГОСТ 6331-78).

Існують три основні способи виробництва рідкого кисню.

Хімічний спосіб. Цей спосіб використовує властивості деяких речовин виділяти кисень. Наприклад такі як перекис барію, або бертолетова сіль. Такі речовини як перекис натрію та перекис калію виділяють кисень при взаємодії із парами води та двоокисом вуглецю. Можливо отримати кисень з повітря, за допомогою поперемінного окислення та відновлення окислів хрому. Зараз хімічні способи отримання кисню використовуються лише в лабораторних умовах для наукових досліджень.

Спосіб електролізу води. Для цього способу використовують воду, в яку додано 20%-й розчин натрію із пропусканням через неї постійного струму. При цьому газоподібний кисень виділяється на аноді, а водень на катоді. Цей процес використовують здебільшого для отримання саме водню, та при умові низької вартості електроенергії.

Спосіб розділення повітря. Атмосферне повітря являє собою суміш різноманітних газів які не поєднані між собою мімічними зв'язками. Відповідно можна ці гази можна розділити створивши для цього відповідні умови. Розрізняють три методи розділення повітря. Адсорбційний, мембранний та криогенний методи.

Адсорбційний метод полягає в вибіркового поглинанні того чи іншого газу різними адсорбентами. Повітря, під тиском, подається до адсорберу, де в залежності від його типу відбувається поглинання або кисню, або азоту. Після досягнення рівноваги між процесами адсорбції та десорбції проводять регенерацію адсорбенту,

тобто видаляють в поверхні адсорбенту поглинену речовину. Це робиться або скиданням тиску, або підвищенням температури. Найчастіше використовують скидання тиску. Попри переваги адсорбційного методу, отримати кисень високої чистоти за його допомогою дуже складно, тому він найчастіше використовується для отримання азоту.

Мембранний метод наразі є найбільш перспективним і «молодим» якщо не потрібні гази високої чистоти. Цей метод полягає у вибірковому проникненні газів крізь матеріал спеціальних мембран, які являють собою пористі полімерні волокна із нанесеним на них газороздільним шаром. При проходженні повітря крізь мембранний модуль, молекули азоту затримуються мембраною, в той час як молекули кисню, аргону та інших складових газів повітря проходять крізь неї та виводяться у навколишнє середовище. Цей метод також найчастіше використовується для отримання азоту.

Для отримання великих об'ємів кисню, із високими вимогами до його чистоти, використовують третій і найпоширеніший метод розділення повітря – криогенний метод, або метод глибокого охолодження. В основі цього методу лежить явище різниці температур кипіння скраплених газів.

Цей метод є одним з найбільш енерговитратних, тому його оптимізація та підвищення енергоефективності мають велике значення, особливо в умовах дефіциту електроенергії і зростання її вартості.

1.2 Криогенний метод розділення повітря.

Атмосферне повітря це суміш різноманітних газів. Найбільшу частку в ньому становить азот, вона складає приблизно 78%. Далі за об'ємом йдуть кисень 21% та аргон 0,9%. На останні 1,1% припадає частка інших інертних газів, вуглекислий газ, водяний пар та інші гази у надмалих концентраціях.

В процесі розділення, атмосферне повітря, через пилові фільтри, всмоктується багатоступеневим компресором та направляється до вологовідділювача і декарбонізатору. У вологовідділювачі відбувається максимальне видалення вологи

яка конденсується при стисненні повітря, а у декарбонізаторі, який заповнений розчином їдкого натру, відбувається видалення вуглекислоти. Це робиться для запобігання замерзання трубопроводів на наступних, низькотемпературних, етапах процесу.

Після осушення та видалення вуглекислоти, стисле повітря поступає у детандер. Це частина газороздільної установки де відбувається різке розширення стислого повітря, а відповідно його охолодження та скраплення. Отримане таким чином рідке повітря піддають перегонці або ректифікації. На цьому етапі і відбувається розділення скрапленого повітря на основні складові.

Процес розділення скрапленого повітря на складові базується на різниці температур кипіння цих складових. Так, різниця температур кипіння рідкого азоту та рідкого кисню становить 13°C . Так, при підвищенні температури рідкого повітря до $-195,8^{\circ}\text{C}$, з нього починає випаровуватись азот, бо температура кипіння рідкого азоту становить саме $-195,8^{\circ}\text{C}$. При цьому, якщо не підіймати температуру до -185°C , то рідина що залишається буде все більше насичена киснем та аргоном. При температурі -185°C починає випаровуватись аргон, а кисень вже при температурі -183°C . При цьому процесі, розділені гази відводяться для накопичення до спеціальних накопичувачів, з яких вже відбувається їх відвантаження споживачам.

Повторюючи цей процес, скраплення та ректифікації багатократно, можна отримати складові гази необхідної чистоти.

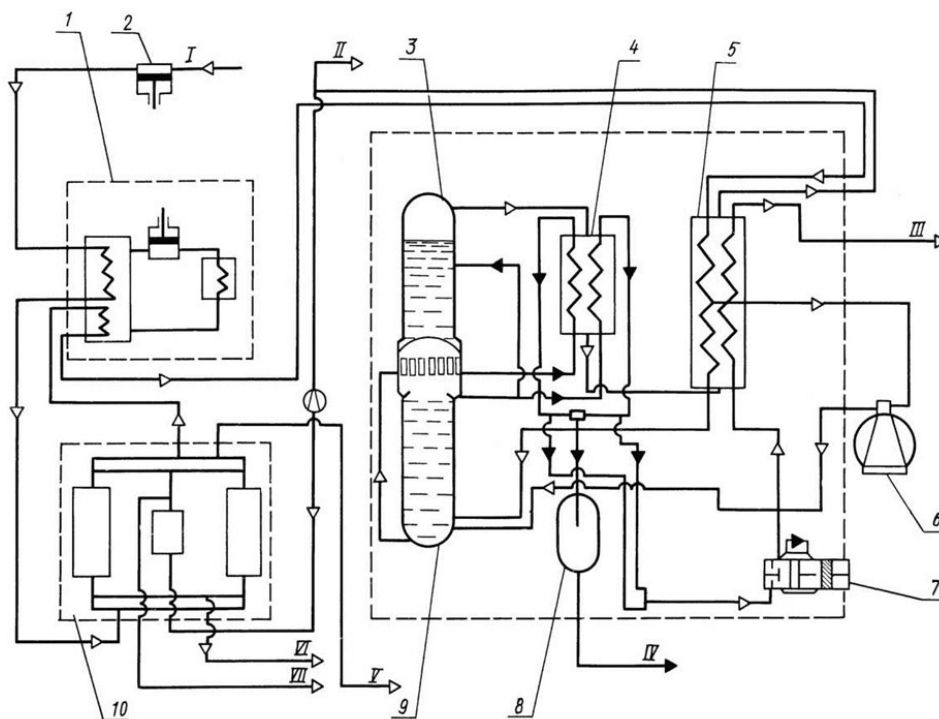


Рисунок 1.1 – Схема газороздільної установки АрКр.

1 – секція попереднього охолодження; *2* – повітряно-компресорна установка; *3* – верхня ректифікаційна колона; *4* – переохолоджувач; *5* – теплообмінник; *6* – детандер; *7* – насос для скрапленого газу; *8* – накопичувач; *9* – нижня ректифікаційна колона; *10* – установка очищення повітря

I – повітря до компресору; *II* – скид в атмосферу; *III* – проміжні продукти; *IV* – вихід скрапленого газу; *V* – сухе повітря; *VI* – скид в атмосферу; *VII* – тепле повітря для нагріву ректифікатора.

На рисунку 1.1 наведена схема поширеної у промисловості газороздільної установки АрКр, для виробництва скрапленого кисню та скрапленого азоту. Атмосферне повітря *I*, всмотується першим ступенем компресора *2*, та подається до секції попереднього охолодження *1*, де наступними секціями компресору *2* відбувається очищення повітря від вологи та вуглекислоти і подальше стискання очищеного повітря. Після цього етапу, очищене стиснуте повітря подається до теплообміннику *5* для більш глибокого охолодження.

Також з секції *I* може відбуватися відбір теплого повітря *V* для інших потреб виробництва, *VI* для скидання в атмосферу при необхідності ремонту та обслуговування, та *VII* для підігріву ректифікаційної установки.

Після теплообміннику *5*, стиснуте та глибоко охолоджене повітря подається у детандер *6*, де воно піддається різкому розширенню і згідно адіабатичним процесам відбувається його охолодження та скраплення. Отримане таким чином скраплене повітря подається до нижньої ректифікаційної колони *9*, де відбувається його первинне розділення на складові.

З верхньої ректифікаційної колони *3*, продукти розділення подаються до переохолоджувача *4*, а вже з нього до накопичувачів *8*, з яких і відбувається вихід готової продукції *IV* для відвантаження.

1.3 Технічні характеристики компресорної установки.

Для надійного та безпечного функціонування газороздільних установок, окрім вимог до холодильного обладнання, також необхідно забезпечити надійне та безперебійне постачання стислого повітря. На вітчизняних хімічних виробництвах, у складі станцій газорозділення, є розповсюдженими моделі компресорних установок ВШ-4.2/200.

Компресорна установка ВШ-4.2/200 (далі компресор), призначена для стиснення повітря у складі стаціонарних газороздільних станцій до тиску 20МПа (200 кгс/см²).

Компресор виконаний на базі W-образної п'ятиступеневої шестициліндрової машини простої дії із кутами розвалу циліндрів у 60°.

На рисунку 1.2 наведена загальна конструкція компресору.

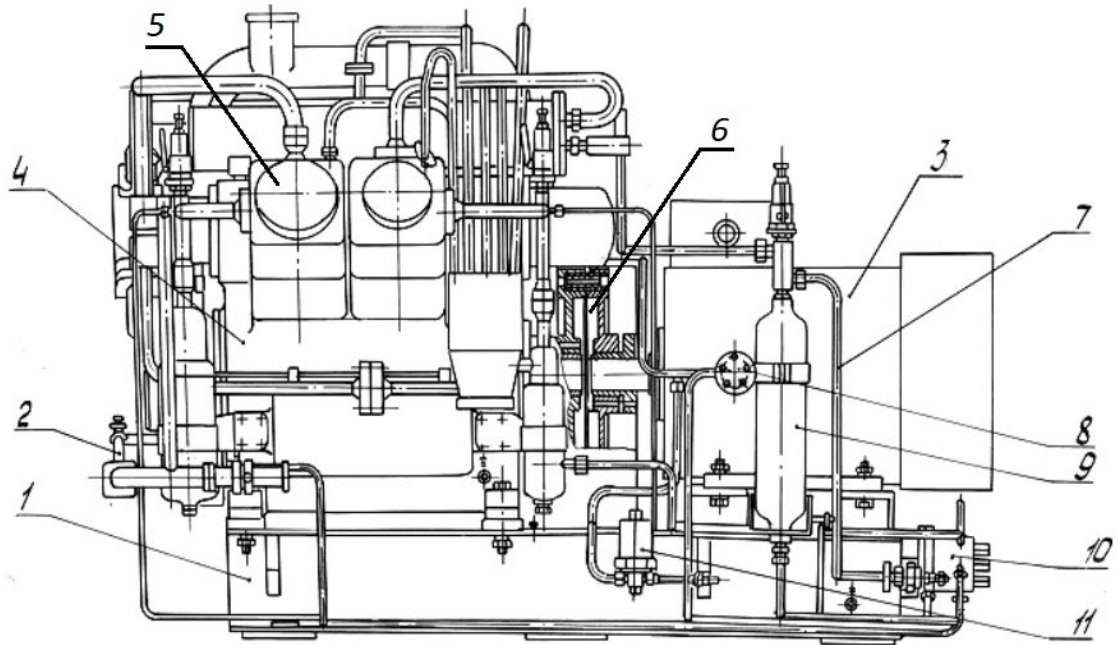


Рисунок 1.2 – Загальна схема компресору ВШ=4.2/200:

1 – рама; 2 – водопровід та маслопровід; 3 – електродвигун; 4 – компресорна машина; 5 – головки циліндрів; 6 – маховик; 7 – повітропровід; 8 – вентиль ручної продувки; 9 – водомасловідділювач; 10 – розвантажувальний пристрій; 11 – вентиль запорний.

Компресорна машина 4 та електродвигун 3 встановлюються на загальну раму 1 та поєднуються за допомогою маховика 6, який передає обертальний момент з валу електродвигуна до колінчастого валу компресорної машини. При цьому маховик закритий захисним огородженням.

Повітря поступає на всмоктування в I ступінь компресора, після якої нагнітається до охолоджувача I ступені. В цьому охолоджувачі відбувається також відділення крапель води та масла у водомасловідділювачі I ступені. Далі повітря поступає на всмоктування II ступені компресора. Цей процес повторюється до виходу повітря з V ступені. Після неї стиснуте повітря проходить через холодильник та водомасловідділювач V ступеню, з якого вже подається до станції газорозділення.

В таблиці 1.1 наведені основні технічні характеристики компресору.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики компресору ВШ-4.2/200

Параметр	Значення
Стискаємий газ	Повітря
Продуктивність, м ³ /хв	4,2±0,2
Вхідний тиск	атмосферний
Вихідний номінальний тиск, кгс/м ²	200,0
Вихідний тиск по ступеням стискання, кгс/м ²	
I ступінь	2,4 - 3,0
II ступінь	8,5 - 10,5
III ступінь	28,0 - 37,0
IV ступінь	75,0 - 96,0
V ступінь	199,0 - 200,0
Частота обертання валу компресору, об/хв	1450
Потужність електроприводу, кВт	90
Мережа живлення електродвигуна, В	3Ф 380В 50 Гц
Мережа живлення систем керування, В	220В 50 Гц
Габаритні розміри, мм	2300x1550x1600
Вага, кг	2000

1.4 Загальна характеристика електроприводу компресору.

В якості електроприводів різноманітного виробничого обладнання, для перетворення електричної енергії в механічну, у промислових машинах використовують електродвигуни. В залежності від потреб та особливостей, це можуть бути як електродвигуни постійного струму, так і електродвигуни змінного струму.

Найчастіше, в діапазоні потужностей до 250 кВт, для електроприводів використовують трифазні асинхронні двигуни із короткозамкненим ротором. В більшості випадків ці двигуни розраховані на живлення від мережі напругою 380В 50 Гц. Як правило, асинхронні електродвигуни із короткозамкненим ротором обирають з серії АІР, АІРС та їх модифікацій під специфічні потреби. Електродвигуни цих серій зарекомендували себе як надійні, прості в обслуговуванні та ефективні.

Якщо потужність задіяного асинхронного електродвигуна не перевищує 8 – 10 кВт, то як правило його включають за схемою прямого пуску. Ця схема найпростіша, але має великі недоліки. І головний з цих недоліків, це великий пусковий струм, який може перевищувати номінальний більше ніж у 8 разів, що приводить до великого навантаження на мережу живлення, а також на пристрої автоматичного захисту.

Для двигунів більшої потужності радять виконувати пуск за послідовною схемою, тобто три включенні обмотки статора підключені за схемою «зірка», а при досягненні певних обертів переключати обмотки статора на підключення за схемою «трикутник». Такий метод дозволяє зменшити пусковий струм до 2 разів. Але він все ще може перевищувати номінальний у 4 рази. Цей метод також має один з великих недоліків, а саме зменшення пускового моменту електродвигуна майже у 3 рази, що може призвести до недопустимих режимів обладнання та навіть виходу його з ладу.

Для приводу в дію компресору ВШ-4.2/200 використовується трифазний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором з серії АІР номінальною потужністю $P_{НОМ} = 90,0$ кВт, та частотою обертання ротора $n_{НОМ} = 1450$ об/хв.

Для живлення електродвигуна та систем керування використовується чотирипровідна трифазна мережа змінного струму з робочим нейтральним проводом 3 PEN 380/220 В 50 Гц.

Компресор працює у довготривалому режимі із незначними змінами у навантаженні, а отже це відповідає режиму роботи електродвигуна S1.

2 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Вимоги до електроприводу компресорної установки.

Компресор ВШ-4.2/200 призначений для стискання атмосферного повітря та нагнітання його до станції газорозділення. Має продуктивність $4,2 \text{ м}^3/\text{хв}$, та забезпечує на виході тиск стислого повітря $200 \text{ кгс}/\text{м}^2$.

Без модернізації електроприводу компресору, керування тиском на його виході можливо лише за допомогою стравлювання надлишку стиснутого повітря через запобіжні клапани. Цей метод не є ефективним, через те що в атмосферу скидається повітря, на стискання якого вже була витрачена енергія. Якщо ж задіяти частотне регулювання обертами електродвигуна за допомогою перетворювача частоти, то з'являється можливість плавного регулювання тиску за рахунок зниження частоти обертання ротора.

В приміщенні або на відкритій ділянці з працюючою компресорною установкою необхідно виділити шумонебезпечну зону з рівнем звуку вище за 80дБа. Границю цієї зони необхідно виділити відповідними знаками безпеки.

Електропривод компресорної установки ВШ-4.2/200 має відповідати наступним вимогам:

1. Інтервал частоти обертання колінчастого валу компресору:

$$n_{KB} = 1000 \dots 1500 \text{ об/хв.}$$

2. Точність регулювання частоти обертів:

$$\Delta N_{KB} = 5,0\%.$$

3. Напруга мережі живлення електроприводу:

$$3 \text{ PEN } 380 \text{ В } 50 \text{ Гц.}$$

4. Напруга мережі живлення системи керування та автоматики:

$$220 \text{ В } 50 \text{ Гц.}$$

Керуюче обладнання, та обладнання автоматики, розташовують у зачинених шафах які встановлюються в окремому приміщенні. З цього приміщення здійснюється живлення електродвигуна, та контроль запобіжних механізмів. Кабелі

живлення повинні мати мідні жили і бути прокладені або в спеціальних лотках, або у металевих трубах, які в свою чергу повинні бути приєднані до контуру заземлення.

Система керування повинна забезпечувати необхідні режими роботи установки. Повинна бути індикація наявності напруги живлення. Також система повинна блокувати включення електродвигуна компресора при знятому захисному кожуху маховика, та унеможливити його неконтрольоване включення після короткочасного зникнення напруги живлення.

На дублюючій панелі, безпосередньо на компресорній установці, також повинна бути індикація наявності напруги живлення, робочих та аварійних режимів, а також органи аварійного вимикання компресору.

2.2 Розрахунки для вибору двигуна.

Виходячи зі специфіки технологічних процесів при виробництві скраплених газів можна зробити висновок, що електродвигун, який приводить в дію компресор, працює в довготривалому режимі із навантаженням яке має незначні зміни. Тобто ТВ > 60%, а це відповідає умовам режиму роботи S1.

Для вибору двигуна, нам необхідно розрахувати його потужність яка необхідна для роботи компресорної станції. А саме урахувати витрати на стискання повітря до заданого тиску.

Щоб визначити потужність компресору скористуємося формулою:

$$P_{\text{КОМП}} = \frac{Q \cdot A}{1000 \cdot \eta_{\text{КОМП}}} \quad (2.1)$$

де Q – продуктивність компресору, м³/с;

A – робота яку необхідно витратити на стискання 1м³ повітря до заданого тиску, Дж/кг;

$\eta_{\text{КОМП}}$ – ККД компресору, $\eta_{\text{КОМП}} = 0,9$ (для компресорів із крейцкопфом);

Q ми беремо з таблиці 2.1 та приводимо м³/с:

$$Q = 4,2 / 60 = 0,07 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Робота A знаходиться за формулою:

$$A = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T \cdot \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right) \quad (2.2)$$

де k – показник адіабати, який для повітря становить $k = 1,4$;

R – газова стала, яка для повітря дорівнює $R = 286,6$ Дж/(кг·К);

T – температура повітря в градусах Кельвіна, $T = 293\text{К}$

p_1 та p_2 , відповідно початковий та кінцевий тиск, $p_1 = 0,102$ МПа, $p_2 = 19,6$ МПа.

Підставляючи ці значення до формули (2.2) отримаємо:

$$A = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 286,6 \cdot 293 \cdot \left(\left(\frac{19,6}{0,102} \right)^{(1,4-1)/1,4} - 1 \right) = 1026429 \text{ Дж/кг}.$$

Отже, підставивши це значення роботи до формули (2.1) ми можемо розрахувати потужність компресора $P_{КОМП}$:

$$P_{КОМП} = \frac{0,07 \cdot 1026429}{1000 \cdot 0,9} = 75,3 \text{ кВт}.$$

Щоб визначити необхідну потужність на валу двигуна скористуємося наступною формулою:

$$P_{ДВ} = K_{ЗП} \cdot \frac{P_{КОМП}}{\eta_0} \quad (2.3)$$

де $K_{ЗП}$ – коефіцієнт запасу потужності, який для багатоступневих компресорів приймають $K_{ЗП} = 1,1$;

$P_{КОМП}$ – розрахована потужність компресора, $P_{КОМП} = 75,3$ кВт;

η_0 – ккд системи передачі, для прямої передачі $\eta_0 = 0,95$.

Підставимо ці значення до формули (2.3) і отримаємо значення потужності двигуна $P_{ДВ}$:

$$P_{ДВ} = 1,1 \cdot \frac{75,3}{0,95} = 87,3 \text{ кВт}$$

Виходячи з отриманих значень потужності та паспортних даних компресора, маємо наступні параметри для вибору електродвигуна: Потужність двигуна $P_{ДВ} = 87,3$ кВт, швидкість обертання ротору $n_0 = 1500$ об/хв, режим роботи двигуна S1 та трифазна мережа живлення 380 В 50 Гц.

Отже, з серії АІР вибираємо трифазний двигун із короткозамкненим ротором моделі АІР250М4. В таблиці 2.1 наведені його основні технічні характеристики.

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики двигуна АІР250М4.

$P_{НОМ},$ кВт	$n_0,$ об/хв	ккд η %	\cos Φ	$S,$ %	Момент $M_{НОМ},$ Нм	$M_{П}/M_{Н}$	$M_{М}/M_{Н}$	$I_{НОМ},$ А	$I_{П}/I_{Н}$	Рівень шуму, дБ	Вага, кг
90,0	1500	93,9	0,88	1,33	584,7	2,2	2,3	165,5	6,8	86	500

Ці дані нам знадобляться в наступному розділі для розрахунку і побудови механічної характеристики.

2.3 Механічна характеристика електродвигуна.

Механічна характеристика електродвигуна це залежність частоти обертання ротору від обертового моменту. В явному вигляді отримати цю залежність немає можливості, тому використовують її графічне представлення. Для побудови цього графіку, нам необхідно знайти залежність обертового моменту електродвигуна від такого параметру як ковзання. Ця залежність описується формулою Клосса:

$$M = \frac{2M_{\text{МАКС}}}{\frac{S_{\text{НОМ}}}{S_{\text{К}}} + \frac{S_{\text{К}}}{S_{\text{НОМ}}}}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.4)$$

де $M_{\text{МАКС}}$ – максимальний обертальний момент;

$S_{\text{НОМ}}$ – значення номінального ковзання;

$S_{\text{К}}$ – значення критичного ковзання.

Щоб розрахувати значення $M_{\text{МАКС}}$ нам необхідно знайти номінальну активну потужність $P_{\text{НОМ}}$, номінальний момент $M_{\text{НОМ}}$.

$$P_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}} \cdot 1000}{\eta_{\text{НОМ}}} \quad (2.5)$$

де $P_{\text{НОМ}}$ і $\eta_{\text{НОМ}}$ значення з таблиці 2.1 які ми підставляємо до формули 2.5

$$P_{\text{НОМ}} = \frac{90 \cdot 1000}{0,939} = 95,86 \text{ кВт}$$

Далі знайдемо номінальний момент $M_{\text{НОМ}}$:

$$M_{\text{НОМ}} = 9550 \cdot \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} \quad (2.6)$$

$$M_{\text{НОМ}} = 9550 \cdot \frac{90}{1480} = 580,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Взявши з таблиці 2.1 коефіцієнти відношення $M_{\text{МАКС}}/M_{\text{НОМ}}$ та $M_{\text{ПУСК}}/M_{\text{НОМ}}$ за наступними формулами отримаємо значення $M_{\text{МАКС}}$ та $M_{\text{ПУСК}}$:

$$M_{\text{МАКС}} = K_{\text{М}} \cdot M_{\text{НОМ}} \quad (2.7)$$

$$M_{\text{ПУСК}} = K_{\text{П}} \cdot M_{\text{НОМ}} \quad (2.8)$$

Підставляючи в ці формули отриманні значення розрахуємо моменти:

$$M_{МАКС} = 2,3 \cdot 580,7 = 1335,7 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{ПВСК} = 2,2 \cdot 580,7 = 1277,6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Також, щоб скористатися формулою Клосса, нам необхідно знайти значення параметра критичного ковзання S_K :

$$S_K = S_{НОМ} \cdot \left(K_M + \sqrt{K_M^2 - 1} \right) \quad (2.9)$$

де коефіцієнт K_M береться з таблиці 2.1;

$S_{НОМ}$ – номінальне ковзання яке розраховується за формулою:

$$S_{НОМ} = \frac{n_0 - n_{НОМ}}{n_0} \quad (2.10)$$

Підставляючи значення номінального і фактичного обертання ротора отримаємо:

$$S_{НОМ} = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0,013, \text{ та якщо представляти у відсотках то } S_{НОМ} = 1,3\%.$$

Тепер за формулою 2.9 визначимо S_K :

$$S_K = 0,013 \cdot \left(2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1} \right) = 0,057$$

Тепер, отримавши необхідні параметри, та користуючись формулою:

$$n = n_0 \cdot (1 - S) \text{ об/хв} \quad (2.11)$$

ми можемо заповнити таблицю 2.2, співвідношення обертового моменту та частоти обертання ротору.

Таблиця 2.2 – Співвідношення ковзання, обертів та моменту.

S	0	0,013	0,02	0,03	0,057	0,07	0,1	0,2	0,5	1
n, об/хв	1500	1480,5	1470	1455	1414,5	1395	1350	1200	750	0
M, Нм	0	579,1	834,6	1101	1335,7	1308,0	1149,3	704,2	300,6	151,8

Тепер за цими значеннями ми можемо побудувати механічну характеристику електродвигуна у графічному вигляді (рис. 2.1)

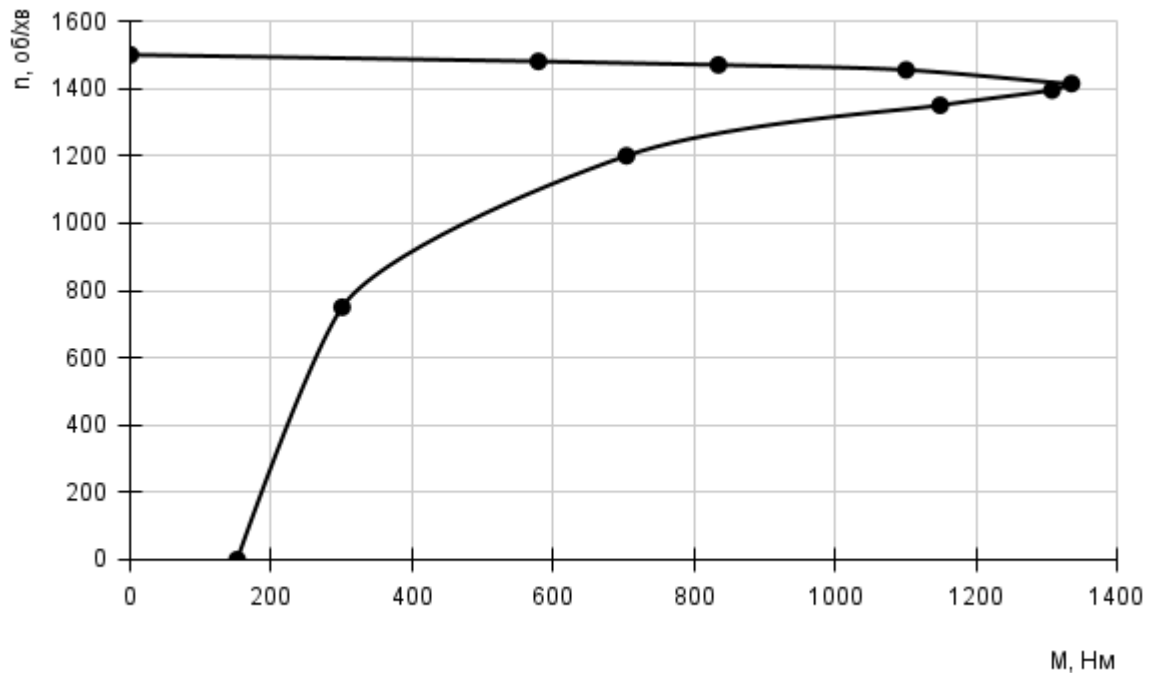


Рисунок 2.1 – Механічна характеристика електродвигуна АИР250М4.

2.4 Розрахунки параметрів лінії живлення електродвигуна.

Щоб забезпечити надійне функціонування компресорної установки необхідно правильно розрахувати параметри лінії живлення для її електродвигуна.

Основним параметром який впливає на вибір перетину кабелю живлення є номінальний струм електродвигуна $I_{НОМ}$. Можна розрахувати його за формулою:

$$I_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} \quad (2.12)$$

Підставимо в цю формулу значення з таблиці 2.1:

$$P_{НОМ} = 90 \text{ кВт}$$

$$U_{НОМ} = 380 \text{ В};$$

$$\cos\varphi = 0,88;$$

$$\eta = 0,939.$$

$$I_{НОМ} = \frac{90000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,88 \cdot 0,939} = 165,5 \text{ А.}$$

Отже враховуючи температурні зміни струмовим навантаженням обирати перетин кабелю живлення треба за виконання умови:

$$I_{ДОП} \geq I_{НОМ} \quad (2.13)$$

де $I_{ДОП}$ – допустимий тривалий струм кабелю в А. Його ми обираємо з довідникової літератури.

$I_{НОМ}$ – значення струму двигуна з формули (2.12).

Виходячи з цих умов обираємо чотирьохжильний кабель із мідними жилами, та перетином однієї жили 95 мм², який розрахований на $I_{ДОП} = 225 \text{ А}$.

Значення довготривалого струму повинно бути більшим за струм уставки захисного вимикача, тобто:

$$I_{ДОП} \geq I_3 \cdot K_3 \quad (2.14)$$

де I_3 – струм уставки захисного вимикача А, в нашому випадку $I_3 = 200 \text{ А}$;

K_3 – коефіцієнт захисту, $K_3 = 1$.

Для обраного нами кабелю виконується умова (2.14):

$$I_{ДОП} = 225 \text{ А} \geq I_3 \cdot K_3 = 1 \cdot 200 \text{ А} = 200 \text{ А}$$

Отже за струмовими навантаженнями вибір кабелю зроблений вірно і кабель з перетином жили 95 мм² задовільнює вище вказаним умовам.

Тепер перевіримо обраний кабель на відповідність умовам за допустимими втратами напруги, тобто повинна виконуватись умова:

$$\Delta U_{\text{доп}} \geq \Delta U_{\text{роз}} \quad (2.15)$$

де $\Delta U_{\text{доп}}$ – допустимі втрати напруги в кабелі, які не повинні перевищувати 5%;

$\Delta U_{\text{роз}}$ – розрахункові втрати напруги, які знаходяться за формулою:

$$\Delta U_{\text{роз}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{НОМ}} \cdot l \cdot (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi)}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% \quad (2.16)$$

де $U_{\text{НОМ}}$ – номінальна напруга електродвигуна, $U_{\text{НОМ}} = 380$ В;

$I_{\text{НОМ}}$ – номінальний струм електродвигуна, $I_{\text{НОМ}} = 165,5$ А;

l – довжина лінії, $l = 0,02$ км;

r_0 – активний погонний опір кабелю, $r_0 = 0,194$ Ом;

x_0 – реактивний погонний опір кабелю, $x_0 = 0,06$ Ом/км;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності електродвигуна, $\cos \varphi = 0,88$;

$\sin \varphi = 0,48$.

Підставляючи ці значення до формули (2.16) отримаємо:

$$\Delta U_{\text{роз}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 165,5 \cdot 0,02 \cdot (0,194 \cdot 0,88 + 0,06 \cdot 0,48)}{380} \cdot 100\% = 0,72\%$$

Отже ми бачимо, що умова (2.15) виконується:

$$\Delta U_{\text{доп}} = 5,0\% \geq \Delta U_{\text{роз}} = 0,72\%.$$

Можна зробити висновок, що вибраний нами кабель з мідними жилами та перетином 95мм^2 у повній мірі задовольняє умовам живлення електродвигуна компресорної установки.

2.5 Вибір захисного обладнання.

Розрахувавши в попередньому розділі значення робочого струму електродвигуна та обравши лінію живлення ми можемо перейти до розрахунків та вибору захисного обладнання.

Перш за все необхідно визначитись із автоматичним вимикачем для захисту від струмів тривалого перевантаження та струмів короткого замикання.

Також нам буде необхідно вибрати магнітний пускач, який здійснює пуск електродвигуна, та також вибрати теплове струмове реле, функції якого полягають у захисті електродвигуна від довготривалих струмових перевантажень.

Вибір автоматичного вимикача проводять по струму миттєвого вимикання $I_{ВИМ}$, та номінальному струму розчеплювача $I_{РОЗ}$.

$$I_{РОЗ} = \frac{I_{НОМ}}{K_T} \quad (2.17)$$

де $I_{НОМ}$ – номінальний струм навантаження, $I_{НОМ} = 165$ А;

K_T – тепловий коефіцієнт, який для обладнання яке встановлюється в закритій шафі $K_T = 0,85$.

$$I_{РОЗ} = \frac{165}{0,85} = 194 \text{ А.}$$

Струм миттєвого вимикання повинен бути більшим за $I_{ПУСК}$:

$$I_{ВИМ} \geq K \cdot I_{ПУСК} \quad (2.18)$$

де K – коефіцієнт, який для вимикачів з $I_{НОМ} > 100$ А, $K = 1,25$;

$I_{ПУСК}$ – пусковий струм електродвигуна:

$$I_{ПУСК} = K_I \cdot I_{НОМ} \quad (2.19)$$

де K_I – коефіцієнт відношення $I_{ПУСК}/I_{НОМ}$ з таблиці 2.1, $K_I = 6,8$.

$$I_{ПУСК} = 6,8 \cdot 165 = 1122 \text{ А}$$

Отже з формули (2.18) отримуємо:

$$I_{ВИМ} = 1,25 \cdot 1122 = 1403 \text{ А}$$

Отже для автоматичного вимикача ми маємо наступні параметри:

$$I_{РОЗ} = 194 \text{ А}$$

$$I_{ВИМ} = 1403 \text{ А.}$$

Спираючись на ці дані, ми можемо брати автоматичний вимикач вітчизняного виробника E.NEXT e.industrial.ukm.250S.200, який має наступні характеристики:

Номинальна напруга – до 660 В.

Номинальна частота – 50 Гц.

Кількість полюсів – 3.

Номинальний струм ($I_{РОЗ}$) – 200 А.

Струм миттєвого вимикання ($I_{ВИМ}$) – $10 \cdot I_{РОЗ} = 2000 \text{ А}$.

Робимо висновок, що обрана нами модель автоматичного вимикача в повній мірі відповідає умовам задачі захисту електродвигуна.

При виборі магнітного пускача будемо спиратися на значення номінального струму електродвигуна $I_{НОМ} = 165 \text{ А}$, при цьому робочий струм магнітного пускача повинен перевищувати $I_{НОМ}$, тобто:

$$I_{МП} \geq I_{НОМ} \quad (2.20)$$

Знову звернемося до модельного ряду обладнання вітчизняного виробника E.NEXT. В його номенклатурі присутня модель магнітного пускача з робочим струмом 180 А, e.industrial.ukc.180.230

Отже виконується умова (2.20):

$$I_{МП} = 180 \text{ А} \geq I_{НОМ} = 165 \text{ А.}$$

Залишається обрати пристрій захисту електродвигуна від струмів довготривалого перевантаження, тобто теплове реле. Основною характеристикою теплового реле є діапазон струмів неспрацьовування. Тобто це діапазон в якому

повинне знаходитися значення робочого струму електродвигуна. І повинна виконуватись умова:

$$I_{ТМАКС} \geq I_{НОМ} \geq I_{ТМИН} \quad (2.21)$$

де $I_{ТМАКС}$ та $I_{ТМИН}$ – відповідно максимальний та мінімальний струми діапазону неспрацьовування.

Під ці параметри підходить теплове реле виробника ІЕК моделі РТИ-5376, яке має наступні параметри:

$$I_{ТМАКС} = 180 \text{ А};$$

$$I_{ТМИН} = 150 \text{ А}.$$

Тобто виконується умова (2.21):

$$I_{ТМАКС} = 180 \text{ А} \geq I_{НОМ} = 165 \text{ А} \geq I_{ТМИН} = 150 \text{ А}.$$

Аналізуючи наведену вище інформацію можна зробити висновок, що обладнання захисту у складі магнітного пускача e.industrial.ukc.180.230 та теплового реле РТИ-5376 відповідають умовам роботи компресорної станції.

Для підсумку, зведемо ці дані в єдину таблицю 2.3

Таблиця 2.3 – обладнання захисту електродвигуна компресору.

Електродвигун			Аварійний вимикач			Магнітний пускач			Теплове реле		
позначення	$P_{НОМ}$, кВт	$I_{НОМ}$, А	позначення	$I_{НОМ}$, А	$I_{КЗ}$, А	позначення	тип	$I_{НП}$, А	позначення	тип	діапазон, А
АД1	90,0	165	QF1	200	2	КМ1	e.industrial.ukc.180.230	180	КТ1	РТИ-5376	150 - 180

2.6 Релейно-контакторна схема включення електродвигуна.

Для наочності, на рисунку 2.2 представимо спрощену релейно-контакторну схему включення електродвигуна.

На жаль, досі ще дуже багато обладнання в нашій промисловості включене за подібною схемою. І це призводить до багатьох проблем. Так, в нашому випадку, при пуску двигуна виникає пусковий струм який перевищує 1000 А, $I_{пуск} = 1122$ А. Такі «струмові стрибки» в мережі живлення викликають значне зниження напруги в цій мережі, а це в свою чергу впливає на роботу іншого обладнання яке живиться від цієї ділянки мережі. Порушується робота контрольно-вимірювальних приладів, що може негативно вплинути на технологічні виробничі процеси, а це зниження якості продукції і збільшення відсотку браку, що прямо призводить до збитків підприємства.

Тому дедалі частіше, на заміну такій схемі включення використовуються різноманітні механізми для зниження навантаження на мережу живлення пусковими струмами.

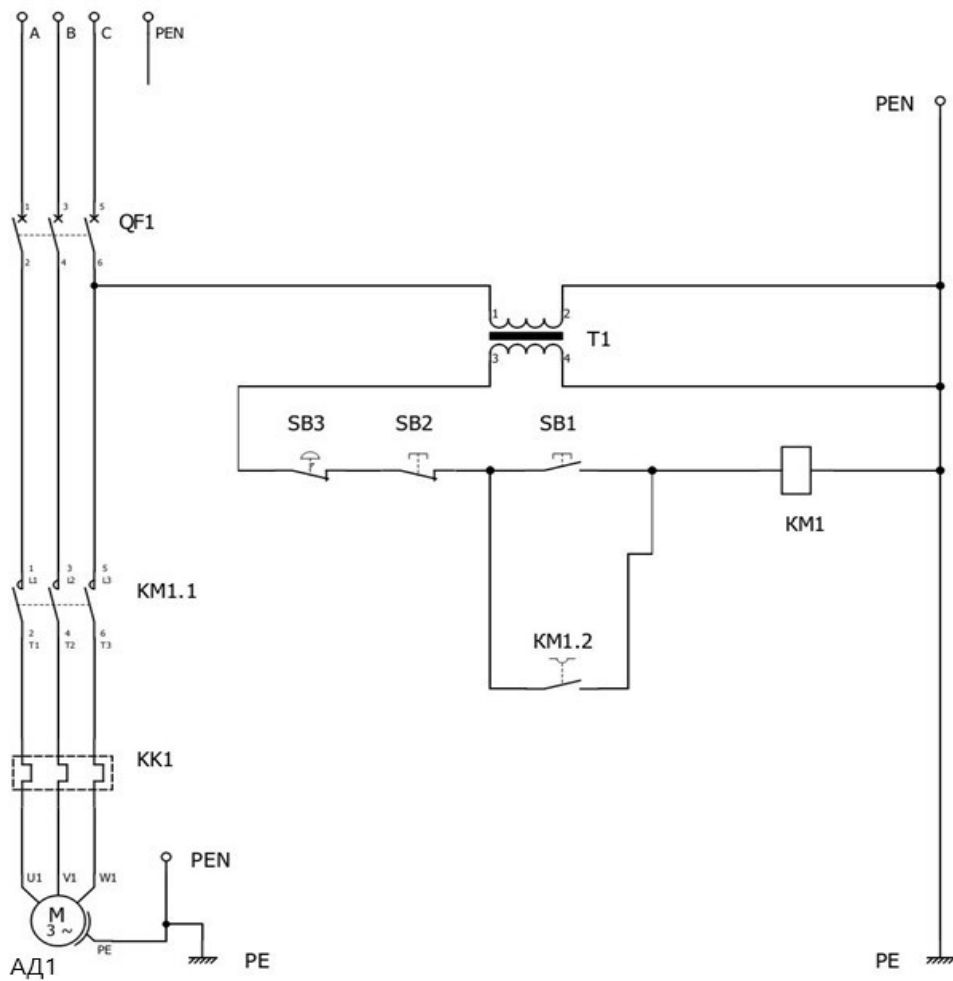


Рисунок 2.2 – релейно-контакторна схема включення електродвигуна.

2.7 Застосування перетворювача частоти.

У схемі керування з прямим пуском двигуна електропривода станції газорозділення пусковий струм можна розрахувати за формулою:

$$I_{\Pi} = K_{\Pi} \cdot I_{\text{НОМ}} = 6,8 \cdot 165,5 = 1125 \text{ А.}$$

Є кілька проблем, що виникають під час прямого пуску двигуна, бо через це знижується напруга у внутрішній мережі електропостачання. Через таке зниження напруги може зменшуватись світловий потік в джерелах освітлення, а також, знижується пусковий момент та момент обертання двигуна.

Схема пуску двигуна зі з'єднанням обмоток фаз статора зіркою з подальшим переключенням їх на трикутник, найкраще підходить для двигунів потужністю від 15

кВт. Завдяки такому рішенню, можна зменшити пусковий струм майже в 2 рази, а пускову потужність в 3 рази. Тільки треба враховувати, що пусковий момент двигуна також знизиться в 3 рази.

Хоч представлена вище схема пуску двигуна дещо ефективніша за використання прямого пуску, але також має недоліки. В цьому випадку також буде знижено пусковий момент двигуна та момент обертання вже запущеного приводу, а також, зменшиться світловий потік джерел освітлення, але негативний ефект буде дещо менш вираженим.

Використання ж пристроїв, що забезпечують плавний пуск двигуна, може вирішити задачу зменшення пускового струму, але в цьому випадку не буде змоги регулювати частоту обертання та контролювати їх роботу.

Якщо порівнювати вартість пристроїв для плавного запуску двигунів, та перетворювачі частоти, то останні будуть на 20-30% дорожчими для однакової потужності. Але й функціонально таке рішення надасть значно більше переваг. В першу чергу, вони також можуть забезпечувати плавний пуск двигунів, але крім цього ще й можуть регулювати частоту їх обертання. Також ПЧ забезпечують пуск та зупинку приводу без використання магнітних пускачів, захищають двигуни від короткого замикання та струму тривалого перевантаження, блокують привід при зниженні опору ізоляції обмоток двигуна та багато іншого.

Рисунок 2.3 представляє дві схеми керування автоматизованого електричного двигуна станції газорозділення.

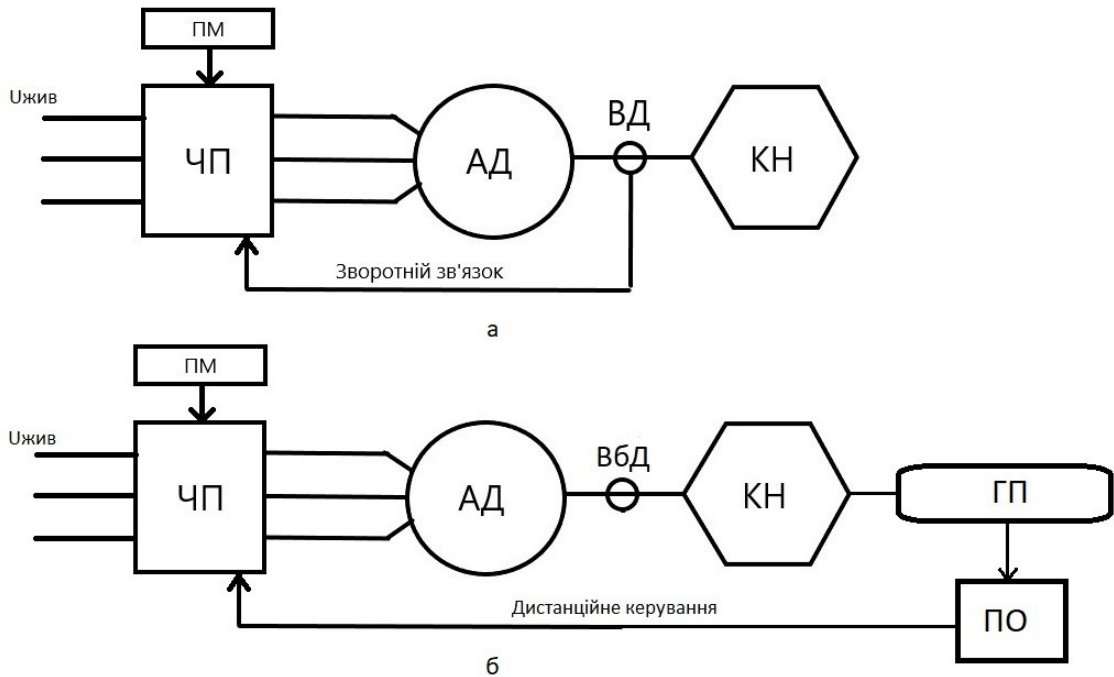


Рисунок 2.3 - Структурні схеми управління автоматизованого електродвигуна станції газорозділення:

а – замкнена система управління з негативним зворотним зв'язком по швидкості обертання робочого органу;

б – розімкнена система управління без зворотного зв'язку;

- ПЧ – перетворювач частоти;
- АД – асинхронний електродвигун;
- ВД – вал двигуна з датчиками для зворотного зв'язку;
- КН – корисне навантаження двигуна;
- ВбД – вал двигуна без датчиків;
- ПМ – Програмний модуль;
- ПО – пост оператора.

Зверху представлена замкнена схема керування зі зворотнім зв'язком за частотою обертання робочого органу. Таке рішення дозволяє забезпечити високу точність підтримки швидкості обертання $\Delta n = 0,5-1,0\%$. Другий варіант забезпечує

нижчу точність $\Delta n = 2-5\%$, та велику інерційність внесення змін у режим роботи двигуна.

Технічне завдання вимагає точність підтримки швидкості обертання, що складає не менше 5%. В такому випадку підійде використання перетворювача частоти без зворотніх зв'язків.

Коефіцієнт потужності роботи електропривода, що може забезпечувати перетворювач частоти для асинхронних двигунів становить більше 0.95 (с $K_{\text{НОМ}} \geq 0,95$). Тому при застосуванні ПЧ не знадобиться індивідуальна установка для компенсації реактивної потужності двигуна.

Завдяки використанню перетворювача частоти можна буде не лише підвищити якісні та кількісні характеристики роботи механізму за рахунок регулювання частоти обертання приводу, а ще й дозволить знизити витрати електроенергії під час роботи.

У системах управління електроприводами змінного струму особливо відзначилися ПЧ, що дозволяють поступово регулювати швидкість обертання ротора двигуна. Завдяки цьому, та відсутності пускових струмів, їх можна використовувати для приводів з підвищеними вимогами до динаміки та перевантаження. Прикладами таких механізмів є ліфти та підйомники, пакувальні машини, сепаратори, тощо. Функція енергозбереження забезпечується перетворювачами завдяки максимальним значенням ККД та коефіцієнтом потужності двигуна при змінах навантажень. Крім того, ПЧ можуть бути легко інтегровані в будь-яку систему автоматичного керування за допомогою спеціальних вбудованих інтерфейсів RS-232/RS-485. Також сьогодні випускаються особливі компактні модулі, що одразу складаються з двигуна із короткозамкненим ротором та перетворювачем частоти. Завдяки такому рішенню, їх дуже легко інтегрувати та почати використовувати.

Перетворювачі використовуються для перетворення електричної енергії. Існує два типи перетворювачів, що відрізняються принципом дії. Перші мають безпосередній зв'язок частоти, а другі мають проміжний контур постійного струму.

Тип перетворювачів з безпосереднім зв'язком з вхідною напругою формує вихідну напругу синусоїдальної форми. Особливістю таких приладів є те, що максимальне значення вихідної частоти не може дорівнювати чи перевищувати частоту мережі живлення. На виході частота перетворювача, як правило, має діапазон від 0 до 25-33 Гц. Тому такі перетворювачі частоти використовуються досить рідко.

Значно частіше використовуються ПЧ з проміжним контуром постійного струму, тобто, другого типу. Вони виконуються на базі інверторів напруги і на рис. 2.4 можна розглянути структурну схему такого пристрою.

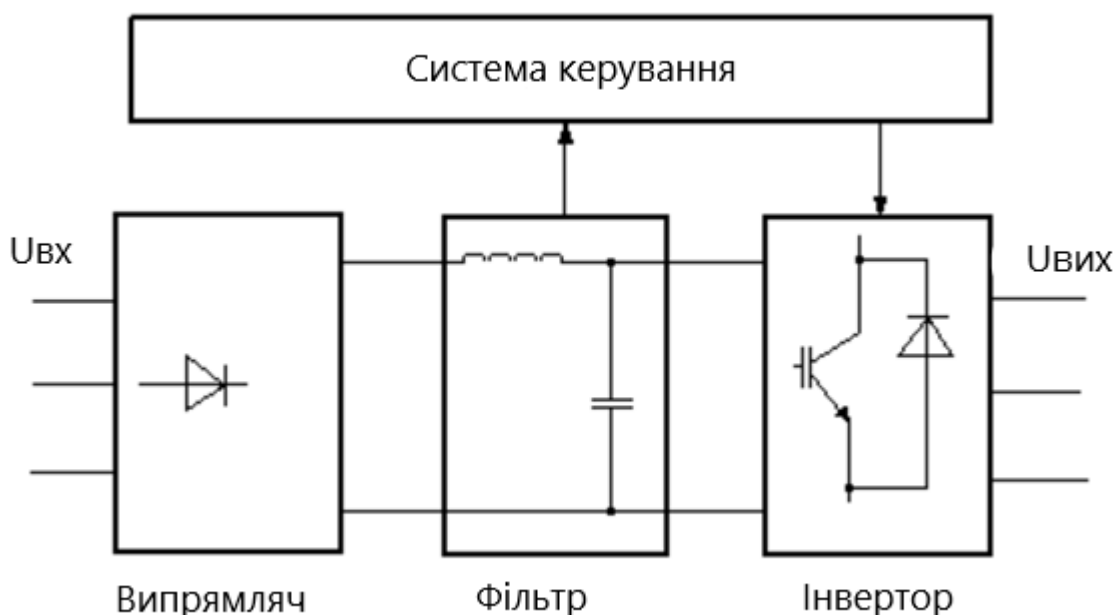


Рисунок 2.4 – Функціональна схема перетворювача частоти (ПЧ) із проміжним контуром постійного струму.

Діодний випрямляч перетворює змінну напругу мережі в постійну, а далі вона згладжується у проміжному колі за допомогою індуктивно-ємнісного фільтра. Інвертори тут виконуються, як правило, на основі IGBT-модулів. Вони відповідають за зворотнє перетворення із постійного струму в змішаний. Це забезпечує

формування вихідного сигналу із необхідними показниками напруги та частоти. Як правило, в інверторах використовується метод високочастотної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Завдяки цьому, вихідний сигнал перетворювача буде просто послідовністю імпульсів напруги з постійною амплітудою та змінною тривалістю. За допомогою обмотки статора на індуктивному навантаженні формується струм синусоїдальної форми (рис. 2.5). Все це дозволяє отримати діапазон регулювання частоти від 0 до кількох тисяч герц.

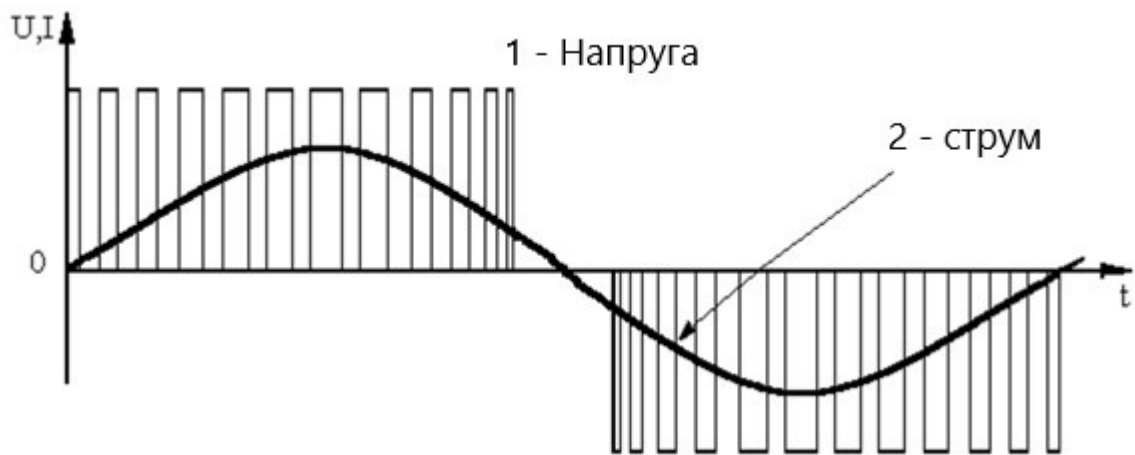


Рисунок 2.5 – Вихідні сигнали перетворювача частоти:

1 – напруга,

2 – струм.

Тип навантаження та діапазон швидкостей - це основні вимоги, що визначаються до електропривода. При цьому, залежність між швидкістю обертання та моментом опору завжди різна для навантажень різного типу. Деякі навантаження можуть розглядатися як такі, що мають постійний момент у всьому діапазоні змін швидкостей. Прикладом машини з таким навантаженням є конвеєр.

Змінна механічна характеристика - це інший тип навантаження. Для неї характерно, що момент навантаження зростає пропорційно до збільшення швидкості обертання. До приладів з таким навантаженням можна віднести відцентрові насоси

чи вентилятори, так як їх механічна характеристика записується рівнянням квадратичної параболи. Це значить, що потужність, що споживається, пропорційна кубу швидкості обертання. Тобто, навіть невелике зниження швидкості привода може давати значний виграш у потужності. Тому у використанні керованого привода для насосів та вентиляторів дозволяє економити електроенергію. За приблизними підрахунками, зниження швидкості всього на 10% може давати приблизно 30% економії електроенергії.

Характер навантаження визначає режим керування електродвигуном за допомогою перетворювача частоти. З його допомогою реалізується та чи інша залежність між швидкістю обертання ротора та вихідною напругою. У режимах з лінійною залежністю між напругою та частотою за це відповідають більш прості перетворювачі, так як вони можуть забезпечувати постійний момент навантаження при керуванні синхронними двигунами чи приводами, що підключаються паралельно. Починаючи з деякого значення при зменшенні частоти, максимальний момент двигуна також починає падати, що є недоліком. Тому, для підвищення моменту на низьких частотах у ПЧ передбачають функцію, що підвищує початкове значення вхідної напруги, котра має компенсувати падіння моменту для навантажень з постійним моментом. Також функція може збільшувати початковий момент для навантажень з високим пусковим моментом, як у промислового міксера, наприклад. Регулювання насосів та вентиляторів відбувається за допомогою квадратичної залежності напруга/частота. Цей режим також можна використовувати для керування двигунами з паралельним підключенням.

Швидка зупинка чи сповільнення електродвигуна може здійснюватися як механічними так і електричними засобами гальмування. Принцип дії електричного способу полягає в зміні режиму роботи привода на генераторний. Це змінить електромагнітний момент, що направлений в обернений бік до руху ротора.

Найпростішим варіантом зупинки агрегату є його банальне відключення від мережі живлення, далі він зупиниться за інерцією. Але в цьому випадку неможливо

контролювати чи регулювати час зупинки, бо він буде визначатися лише інерційними властивостями самого двигуна та його навантаженням.

Для регулюючого гальмування використовується генераторний спосіб. Принцип його роботи в тому, що перетворювач із необхідною швидкістю зменшує вихідну частоту до необхідного значення. Такий спосіб гальмування перетворює двигун на генератор, відповідно, кінетична енергія від обертання перетворюватиметься в електричну. І тут є два варіанти, куди подінеться ця енергія, в залежності від типу випрямляючого пристрою. Вона може повернутися у первинну мережу, або накопичуватися у контурі постійного струму перетворювача частоти. Другий випадок може потребувати застосування зовнішнього гальмівного опору. Проблема в тому, що у випадках навантаження з великим моментом інерції потрібно буде розсіяти енергію щоб не виникало перегріву. За це відповідає спеціальна контролююча схема в перетворювачі. Тепер можна зробити висновок, що основною перевагою генераторного гальмування є передбачуваний час та плавність зменшення швидкості. Недолік же полягає у можливому перегріві, для уникнення якого потрібно використовувати зовнішній гальмівний опір.

Динамічне гальмування - це таке, що для гальмівного процесу використовує постійний струм. Для його реалізації із обмотки статора знімають змінну напругу та на одну чи кілька фаз подають постійну. Таким чином, створюється магнітне поле, що не просто сповільнюватиме обертання ротора, а ще й утримуватиме його в нерухомому стані після зупинки. З цього можна зробити висновок, що перевагами динамічного гальмування є плавна зупинка та виділення електроенергії в роторі, а тому, не потрібно використовувати додатковий гальмівний опір для охолодження. Недоліком же є те, що вихідна частота не контролюється перетворювачем, тому неможливо передбачити час гальмування. За приблизними підрахунками, ефективність динамічного гальмування порівняно з генераторним складає приблизно 30-40%. Саме тому, частіше використовуються комбіновані способи для гальмування, що дозволяє скористатися перевагами обох вище описаних методів. Це збільшує ефективність гальмування та не викликає перегріву.

З допомогою ПЧ можна здійснювати керування агрегатом за допомогою набору параметрів. Використовуючи їх, можна обрати, активізувати чи заборонити виконання якоїсь функції, також можна задати параметри чи контролювати наявні значення параметрів. Встановлення параметрів відбувається з допомогою мембранної клавіатури пульта керування перетворювача. Можна налаштувати, наприклад, розгін чи мінімальні та максимальні частоти. На чотиризначному цифровому дисплеї відображуються обрані та встановлення значення параметрів. Важливо зазначити, що задавати оптимальні режими роботи частотно-регульованого приводу - це не просте завдання, якщо ціллю є максимальна ефективність виробничого процесу. Тому потрібні кваліфіковані спеціалісти, що розумітимуться на особливостях як процесу виробництва, так і роботи конкретного механізму. Щоб спростити роботу персоналу, в перетворювачах серії MICROMASTER Eco і MIDIMASTE Eco, наприклад, виділяється дві групи спеціально підібраних базових параметрів. Перша група застосовується для більшості простих випадків застосування, що дозволяє швидко ввести привід в експлуатацію. Друга група потрібна для більш тонкого налагодження перетворювача та зветься “експертною” і має заблокований за замовчування доступ.

Спосіб керування, описаний вище, дуже зручний для швидкого введення в експлуатацію привода та для швидкої зміни стандартних налагоджень. Частотно-керований привід у складі АСУ ТП використовується із взаємодією з іншими частинами системи керування. Щоб реалізувати цю взаємодію, у перетворювачів завжди є система вводу-виводу даних, що складається з послідовних інтерфейсів та дискретних і аналогових входів та виходів.

Стандартні перетворювачі, як правило, мають 3-6 програмуючих дискретних входів, що здатні запустити до 24 різноманітних функцій для керування агрегатом. Такі функції, в свою чергу, поділяються на три групи.

1. Перша група включає в себе функції що керують рухом двигуна. Наприклад: пуск, зупинка, реверс, тощо.

2. Друга група призначена для функцій, що керують вихідною частотою перетворювача та функціями, що можуть плавно збільшувати чи зменшувати вихідні частоти при активному стані відповідного дискретного входу. В таких випадках керування здійснюється за допомогою вибору або вибором фіксованої частоти для конкретного входу, або задається двійковим кодом стану трьох входів.

3. Як правило, третя група складається зі службових функцій, що, наприклад, дозволяють дистанційне керування чи скидають помилки приладу.

Вихідні кола можуть живитися або від внутрішнього джерела живлення з вихідною напругою 15 В, або ж від зовнішнього джерела з напругою від 7.5 до 33 В постійного струму.

Є декілька способів, щоб активувати дискретні входи. Це можна зробити звичайними механічними кнопками на панелі установки, або дискретними виходами різних керуючих пристроїв (наприклад, програмуючі логічні контролери), або пристроями віддаленого вводу-виводу.

Прикладом використання керуючого пристрою може бути двигун насоса. Одним з варіантів вибору логічного модуля для керуючого пристрою системи з перетворювачем частоти може бути модуль серії LOGO від фірми Siemens. В цьому модулі одразу вбудований годинник, що прив'язаний до реального часу. Завдяки цьому можна в залежності від години доби налаштувати різні режими роботи з необхідними значеннями вихідної частоти перетворювача. Також в таких перетворювачах є ще одна особливість - можливість одночасно активувати декілька входів. Завдяки цьому при виборі фіксованих частот, вихідна частота дорівнюватиме сумі значень, що було обрано. Виходи, що залишилися, можна задіяти для керування іншими функціями агрегата, наприклад, пуском чи зупинкою.

Призначення аналогових входів на перетворювачах частоти - це безперервне та контрольоване керування вихідною частотою. Деякі моделі перетворювачів мають лише один такий вхід, а деякі можуть мати декілька. Зазвичай кожен окремий вхід призначений для відповідних функцій. Вхід №1 можна використати для задавання частоти за допомогою сигналу від струму чи напруги.

Аналогові входи також дають і додаткові можливості. Наприклад, можна задіяти режим запуску перетворювача за допомогою вхідного сигналу в той момент, коли він досягне якогось визначеного значення. А деякі перетворювачі дозволяють навіть використовувати реверсивне керування електродвигуном при використанні біполярного сигналу ± 10 В.

Керування в ручному режимі можна реалізувати через аналогові входи за допомогою підключення до перетворювача зовнішнього потенціометра із опором 5-100 кОм. Використавши для його заживлення малопотужне джерело з вихідною напругою в 10 В, можна буде регулювати сигнал, що передається на аналоговий вихід №1. Так, при зміщенні повзунка з одного краю до іншого, можна буде змінювати значення вихідної частоти в діапазоні від 0 до 50 Гц, хоча ці значення можуть бути розширені, якщо змінити значення деяких параметрів перетворювача.

Перетворювачі Siemens мають вбудовані функції ПІД- або ПІ-регулювання. Це дозволяє здійснювати більш точне регулювання будь-якого зовнішнього параметра, що представлений у залежності від швидкості обертання двигуна. Наприклад, так можна регулювати тиск насосів, чи температуру в системі вентиляції, тощо. Для роботи в такому режимі потрібно використовувати відповідний датчик.

Другий аналоговий вхід відповідає за зворотній зв'язок. Його задача у прийомі сигналу від датчика. Прикладом є підтримка постійного тиску в системах вентиляції за допомогою асинхронного електропривода. Потрібне значення тиску можна задавати через перший порт, як писалося раніше, за допомогою потенціометра. Датчики тиску у цьому випадку буде перетворювати показник тиску в електричний сигнал від 4 до 20 мА. Цей сигнал поступатиме на другий аналоговий вхід перетворювача. Для заживлення датчика тиску знадобиться джерело з вихідною напругою 15 В та 50 мА, відповідно. Параметри перетворювача застосовуються для задавання коефіцієнтів підсилення пропорційної, інтегральної та диференційної ланок ПІД-регулятора.

Описані вище способи керування перетворювачами є прикладами місцевого керування, але існують також можливості дистанційного керування з доступом до

всіх параметрів ПЧ. Це може бути реалізовано з використанням вбудованого в перетворювач послідовного інтерфейсу за стандартом EIA RS-485.

На базі такого інтерфейсу можна створити цілу мережу пристроїв, з перетворювачами, що налічуватиме до 31 пристрою з унікальними адресами. Ці адреси задаються через спеціальний параметр перетворювача. Керування пристроями здійснюється за допомогою ведучого пристрою, в якості котрого може виступати зовнішній пульт керування чи комп'ютер. Обмін даними здійснюється завдяки протоколу USS, розробленого Siemens для таких цілей, при цьому, він підтримується всіма серіями ПЧ. Ініціатором обміну повідомленнями виступає ведучий пристрій, а ведений лише відповідає на повідомлення. Протокол USS дозволяє звертатися як до конкретного пристрою, використовуючи його адресу, так і одночасно до всіх пристроїв в мережі. Максимальна швидкість, яку підтримує протокол дорівнює 19 кбод. Фіксована довжина повідомлення становить 14 байт та має сталий формат для пристроїв за асинхронним режимом обміну: 1 старт-біт даних, біт контролю парності та стоп-біт. Доступний опис протоколу в документації дозволяє легко реалізувати подібний функціонал для свого керуючого пристрою на підприємстві.

Також більшість перетворювачів можуть додатково бути підключені до промислової мережі Profibus-DP, Ethernet IP тощо, за допомогою спеціальних модулів розширення. Це дозволяє легко і не дорого інтегрувати частотно-регулюючий привід в систему автоматизації.

Останнім часом набуває популярності продукція Європейської групи компаній E.next, яка завдяки гарному співвідношенню ціна/якість та наявності представництва в Україні стає дедалі конкурентоспроможною навіть на фоні таких відомих виробників як Siemens та ABB.

2.8 Вибір перетворювача частоти.

При виборі перетворювача частоти слід враховувати потужність двигуна $P_{НОМ}$ та його номінальний струм $I_{НОМ}$.

На сьогоднішній день на ринку представлені різні моделі ЧП які підходять під ці параметри, але зупинимо вибір на моделі e.f-drive.pro.90 виробника E.next.

Ця модель має усі необхідні механізми захисту як двигуна так і обслуговуючого персоналу. Так наприклад, при використанні ЧП відпадає необхідність у використанні магнітного пускача та теплового реле, за рахунок того що ці функції реалізовані в ЧП.

В таблиці 2.4 наведені головні технічні характеристики частотного перетворювача e.f-drive.pro.90

Таблиця 2.4 – основні технічні характеристики

Параметр	Значення
Номінальна потужність навантаження, кВт	90
Вхідна напруга, В	380+-15%
Вхідна частота, Гц	50+-5%
Вихідна напруга, В	0...380
Вихідна частота, Гц	0-300 (вектор); 0-3200 (скаляр)
Вихідний струм, А	176
Здатність перевантаження по струму	150% - 60с; 180% - 2с; 200% - 0,5с
Режими керування	Скалярне (V/F), Векторне без зворотнього зв'язку (SVC)
Регулювання швидкості	1:100 (в режимі SVC)
Додаткові входи	7 програмуємих цифрових 1 височастотний імпульсний 2 програмуємих аналогових 0...10В або 4...20 мА.
Додаткові виходи	2 програмуємих і відкритим колектором 1 програмуємий релейний 2 програмуємих аналогових 0...10 В або 4...20 мА
Цифровий інтерфейс	RS485 (Modbus)

На рисунку 2.3 наведена загальна схема підключень ЧП.

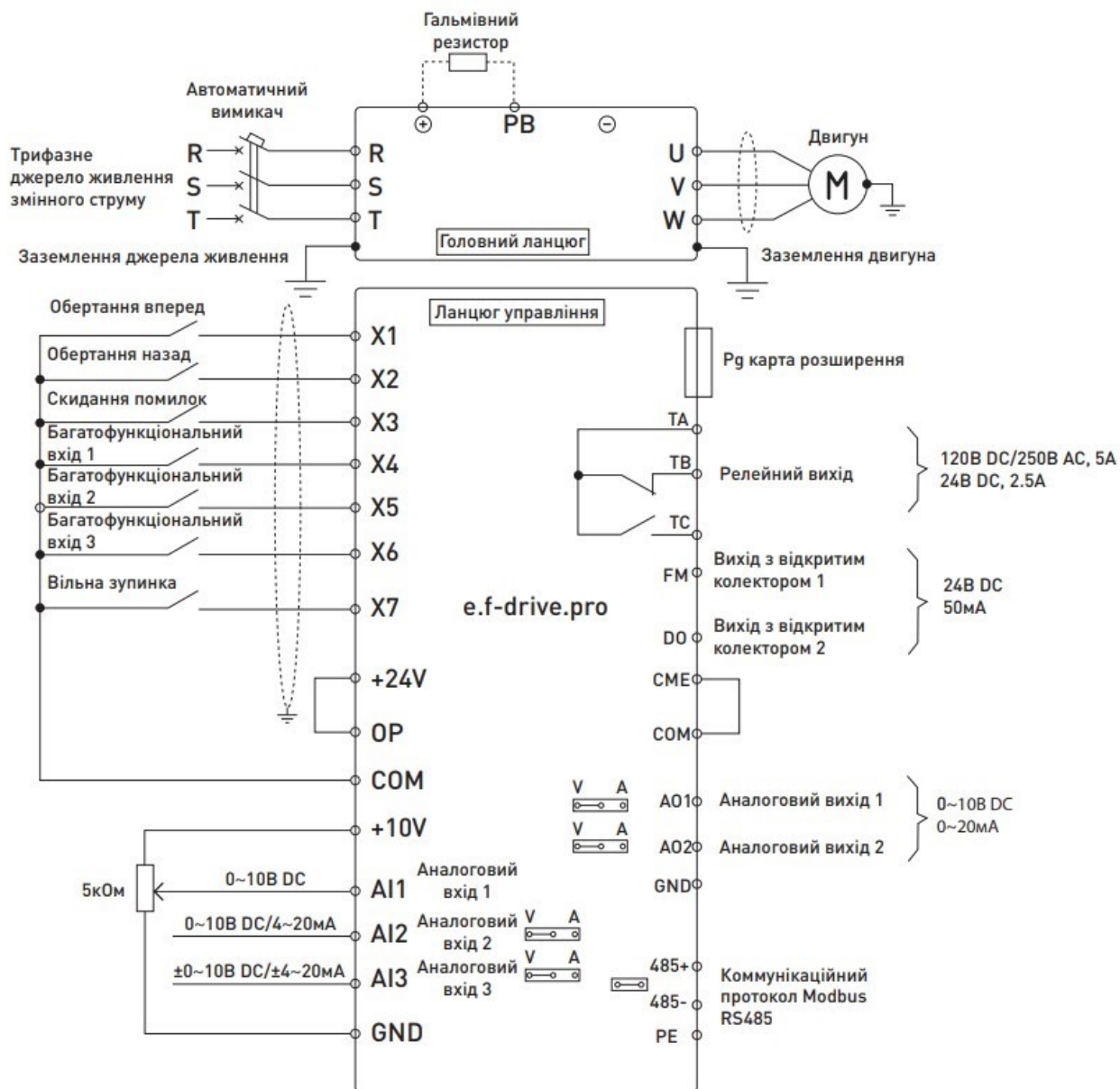


Рисунок 2.3 – Загальна схема підключень ЧП e.f-drive.pro.90

Схема ПЧ e.f-drive.pro.90 складається з двох основних частин. Головного ланцюга, де відбувається випрямлення змінного трифазного струму 380 В 50 Гц та його інвертування у змінний струм із необхідною напругою та частотою. Та ланцюга керування, в якому обробляються зовнішні команди або формуються внутрішні згідно заздалегідь складеної програми, які керують інвертором головного ланцюга.

На рисунку 2.4 наведена спрощена схема включення електродвигуна за допомогою перетворювача частоти.

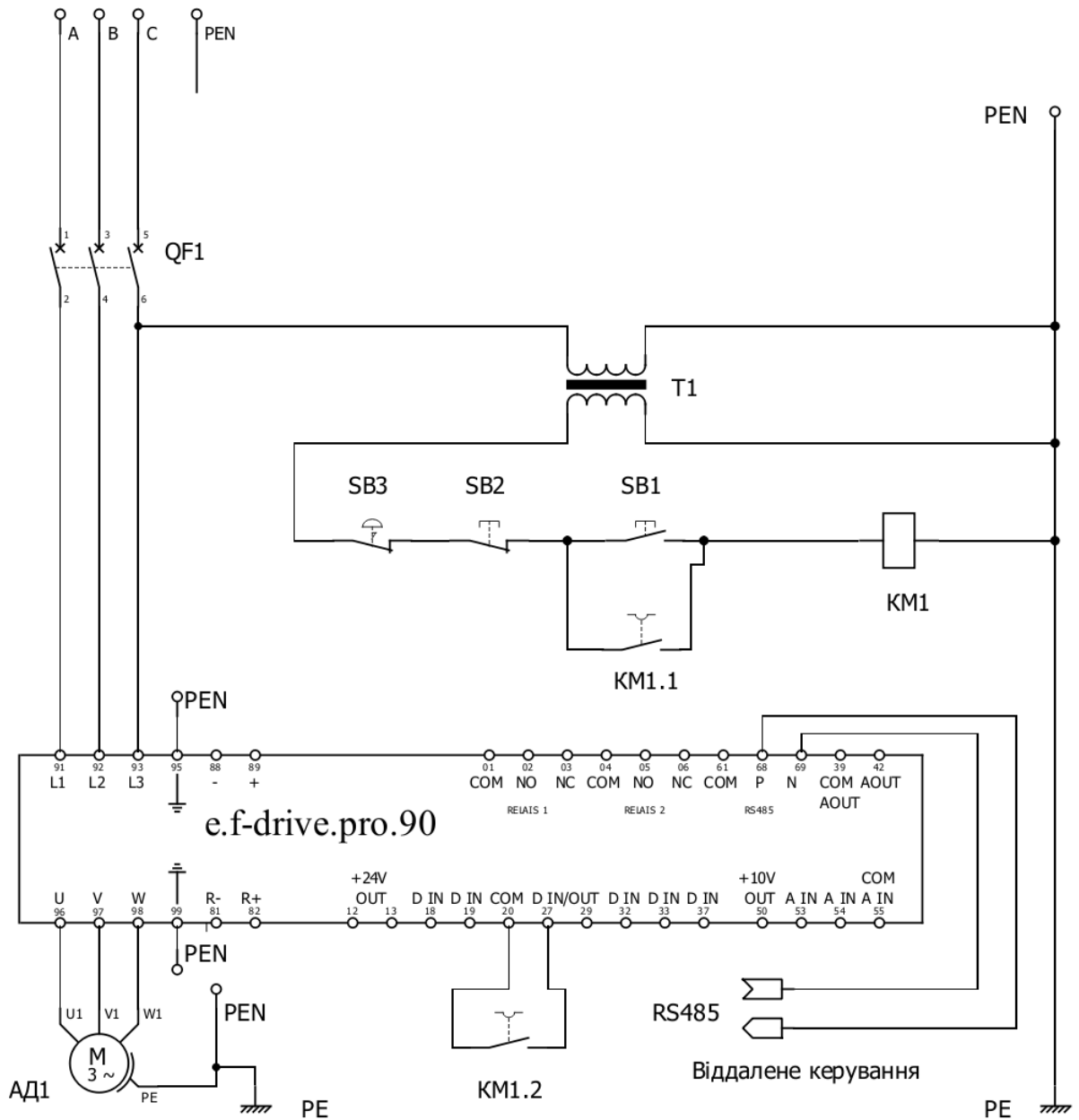


Рисунок 2.4 – Спрощена схема підключення ЧП e.f-drive.pro.90.

Напруга живлення 380 В 50 Гц подається до системи за допомогою аварійного вимикача QF1. При необхідності, трансформатор Т1 знижує напругу для живлення кіл автоматики.

При натисканні кнопки SB1 подається напруга на котушку реле KM1, яка замикає контакти KM1.1 та KM1.2. Контакти KM1.2 підключені до програмуємого дискретного входу перетворювача частоти і в залежності від закладеної в нього програми задіюються відповідні механізми керування електродвигуном.

Також, за допомогою інтерфейсу RS485 та протоколу Modbus, можливе дистанційне керування роботою перетворювача з центрального посту управління, або за допомогою системи АСУ ТП.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Постановка задачі моделювання роботи електропривода на ПЕОМ.

Розробка двигуна з частотно-регульованою системою керування в першу чергу має підвищувати його ККД та знижувати споживання електроенергії. Для цього і проводиться математичне моделювання, щоб розрахувати та створити таку систему управління, що забезпечить максимальний момент на валу двигуна при низьких обертах. Важливим фактором для правильного проектування є вибір системи моделювання та її відповідність до процесів, що будуть відбуватися у перетворювачі.

Саме тому, рівняння розрахунку руху будуть розглядатися в системі координат Парка-Горєва. При векторному управлінні це дозволить реалізувати більш точні розрахунки, ніж при використанні стаціонарної системи координат.

Ці рішення дозволять реалізувати систему управління двигуном за такими ж принципами, що й системи для двигунів постійного струму. Тобто, характеристики асинхронного приводу будуть дуже наближеними до характеристик звичайних двигунів, що працюють на постійному струмі. В комплексі, це спростить розрахунки та підвищить економічну ефективність використання такого агрегату.

Для моделювання роботи двигуна у режимах двигуна та генератора, використано пакет програм Matlab, а саме блок Asynchronous Machine. Піктограми приведені нижче на рисунку 3.1.

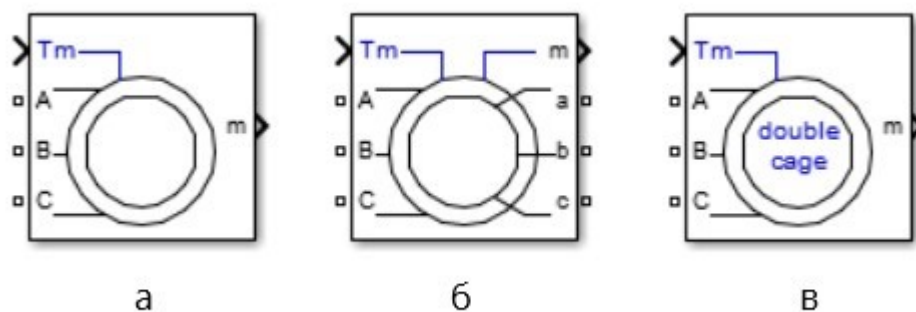


Рисунок 3.1 - Піктограми асинхронної машини

Режим роботи агрегата визначається знаком електромагнітного моменту. Порти А, В, С на моделі показують виводи обмоток статора, а маленькі літери а, b, с показують виводи обмоток ротора. Порт Тm відповідає за подавання моменту опору руху. А на порту m формується сигнал, що складається з 21 елементу, що включає в себе токи потоків, напруги ротора та статора в нерухомій та обіговій системах координат, електромагнітний момент, кутову частоту обертання валу та його кругового положення.

Модель асинхронного двигуна складається з двох інших моделей: електричної та механічної частин. Перша представлена моделлю простору стану четвертого порядку, а друга - моделлю стану другого порядку. Електричні змінні та параметри приводу приведені до статора. Вихідні рівняння електричної частини записуються для двофазної (dq-вісі) системи координат. На рисунку 3.2 нижче показано схему заміщення асинхронного двигуна.

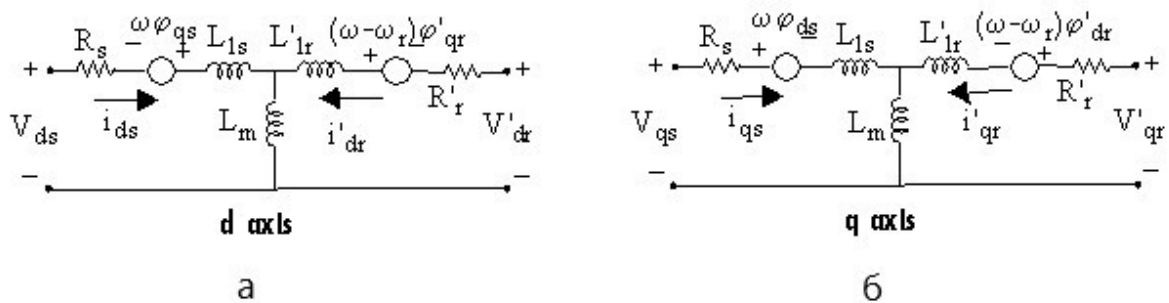


Рисунок 3.2 – Схема заміщення асинхронного двигуна
а – d вісь; б – q вісь.

Далі представлені рівняння електричної частини машини:

$$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega\varphi_{ds}$$

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + \omega \varphi_{qs}$$

$$V'_{qr} = R'_r \cdot i'_{qr} + \frac{d\varphi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \cdot \varphi'_{dr}$$

$$V'_{dr} = R'_r \cdot i'_{dr} + \frac{d\varphi'_{dr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \cdot \varphi'_{qr}$$

де:

$$\varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr}$$

$$\varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr}$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r \cdot i'_{qr} + L_m \cdot i_{qs}$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r \cdot i'_{dr} + L_m \cdot i_{ds}$$

В системі рівнянь машини індекси мають значення:

- d – проекція змінної на вісь d;
- q – проекція змінної на вісь q;
- r – індекс, який позначає параметр або змінну ротора;
- s – індекс, який позначає параметр або змінну статора;
- l – індуктивність розсіювання;
- m – індуктивність кола намагнічування.

Механічну частину агрегату можна описати двома рівняннями:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} \cdot (T_e - F \cdot \omega_m - T_m)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m$$

Значення змінних в рівняннях:

- R_s, L_{ls} – активний опір і індуктивність розсіювання статора;
- R'_r, L_{lr} – активний опір і індуктивність розсіювання ротора;

- L_m – індуктивність кола намагнічування;
- L_s, L'_r – повні індуктивності статора і ротора;
- V_{qs}, i_{qs} – проекції напруги і струму статора на вісь q ;
- V'_{qr}, i'_{qr} – проекції напруги і струму ротора на вісь q ;
- V_{ds}, i_{ds} – проекції напруги і струму статора на вісь d ;
- V'_{dr}, i'_{dr} – проекції напруги і струму ротора на вісь d ;
- $\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$ – проекції потокозчеплення статора на вісі d і q ;
- $\varphi'_{dr}, \varphi'_{qr}$ – проекції потокозчеплення ротора на вісі d і q ;
- ω_m – кутова частота обертання ротора;
- θ_m – кутове положення ротора;
- p – число пар полюсів;
- T_e – електромагнітний момент;
- T_m – механічний момент на валу;
- J – сумарний момент інерції машини і навантаження;
- H – сумарна інерційна постійна машини і навантаження;
- F – сумарний коефіцієнт в'язкого тертя (машини і навантаження).

3.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення двигуна електропривода станції газорозділення.

Розрахунок параметрів схеми заміщення двигуна на основі моделювання роботи привода з короткозамкненим ротором можливий завдяки пакету програм Matlab.

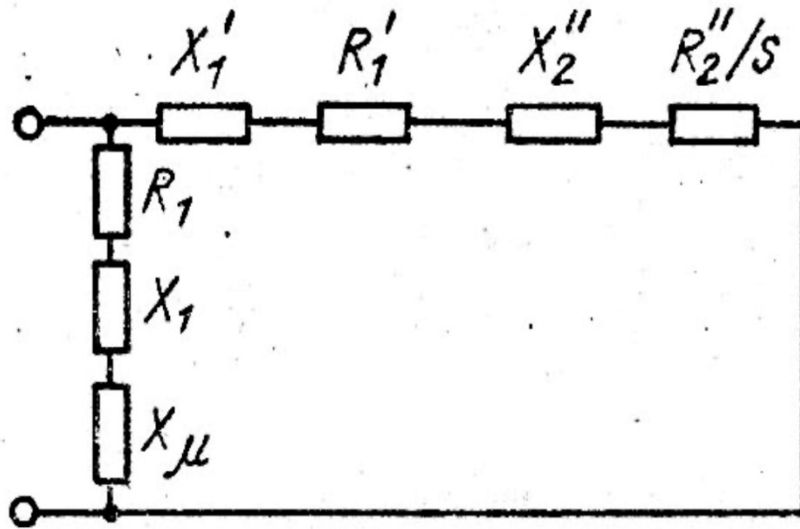


Рисунок. 3.3 - Схема заміщення фази асинхронного двигуна.

У технічних довідниках параметри схеми заміщення двигуна приводяться у відносних одиницях.

Таблиця 3.2 показує технічні параметри двигуна серії АІР250М4.

Таблиця 3.2 Технічні параметри двигуна електропривода

$P_{НОМ}$, кВт	n_0 , об/хв	ккд п %	$\cos \Phi$	S, %	Момент $M_{НОМ}$, Нм	$M_{ПУСК}/M_{НОМ}$	$M_{МАКС}/M_{НОМ}$	$I_{НОМ}$, А	$I_{ПУСК}/I_{НОМ}$	Рівень шуму, дБ	Вага, кг
90,0	1500	93,9	0,88	1,33	584,7	2,2	2,3	165,5	6,8	86	500

У відносних одиницях параметри схеми заміщення мають значення:

Таблиця 3.3 – параметри схеми заміщення у відносних одиницях

R_1	R_2	X_1	X_2	X_m	R_m
0,02	0,03	0,07	0,085	4	0,6

Потрібно знайти базовий опір двигуна, щоб привести параметри схеми заміщення до фізичних одиниць. Це можна зробити за формулами:

$$R_B = \frac{U_{НОМ}}{I_{НОМ}} \quad (3.1)$$

де $U_{НОМ}$ – номінальна напруга двигуна, $U_{НОМ} = 380$ В;

$I_{НОМ}$ – номінальний струм двигуна, $I_{НОМ} = 165,5$ А.

Далі розрахуємо базовий опір двигуна:

$$R_B = \frac{380}{165,5} = 2,296 \text{ Ом.}$$

Отримавши значення базового опору, можна тепер порахувати параметри схеми заміщення у фізичних одиницях. Це буде потрібно далі для моделювання.

Активний опір статора:

$$r_1' = R_B \cdot R_1 \quad (3.2)$$

$$r_1' = 2,296 \cdot 0,02 = 0,046 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір статора:

$$x_1' = R_B \cdot X_1 \quad (3.3)$$

$$x_1' = 2,296 \cdot 0,07 = 0,16 \text{ Ом.}$$

Активний опір ротора:

$$r_2' = R_B \cdot R_2 \quad (3.4)$$

$$r_2' = 2,296 \cdot 0,03 = 0,069 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір ротора:

$$x_2' = R_B \cdot X_2 \quad (3.5)$$

$$x_2' = 2,296 \cdot 0,085 = 0,195 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір гілки намагнічування в схемі заміщення АД з КЗ ротором:

$$x_m = R_B \cdot X_m \quad (3.6)$$

$$x_m = 2,296 \cdot 4 = 9,184 \text{ Ом.}$$

Враховуючи, що індукційний опір прямо пропорційний кутовій частоті та індуктивності, то знаходження індуктивностей значно спрощується. Це також говорить про те, що індуктивність прямо пропорційна індуктивному опору та обернено пропорційна кутовій частоті. За допомогою цих даних, можна вирахувати індуктивність статора:

$$L_S = \frac{x_1'}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (3.7)$$

$$L_S = \frac{0,16}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 5,09 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.}$$

Індуктивність ротора:

$$L_R = \frac{x_2'}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (3.8)$$

$$L_R = \frac{0,195}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,025 \text{ Гн.}$$

Отримавши всі необхідні дані, можна їх ввести в модель двигуна в середовищі Simulink, та провести моделювання.

3.3 Моделювання прямого пуску двигуна електропривода.

Далі розглянемо модель прямого пуску частотно-регульованого приводу з короткозамкненим ротором електропривода.

Схема демонструє джерело трифазного живлення, а також трифазний вимірювач напруги і струму обмоток статора, осцилограф та індикатор частоти обертання ротору й інші вимірювальні пристрої.

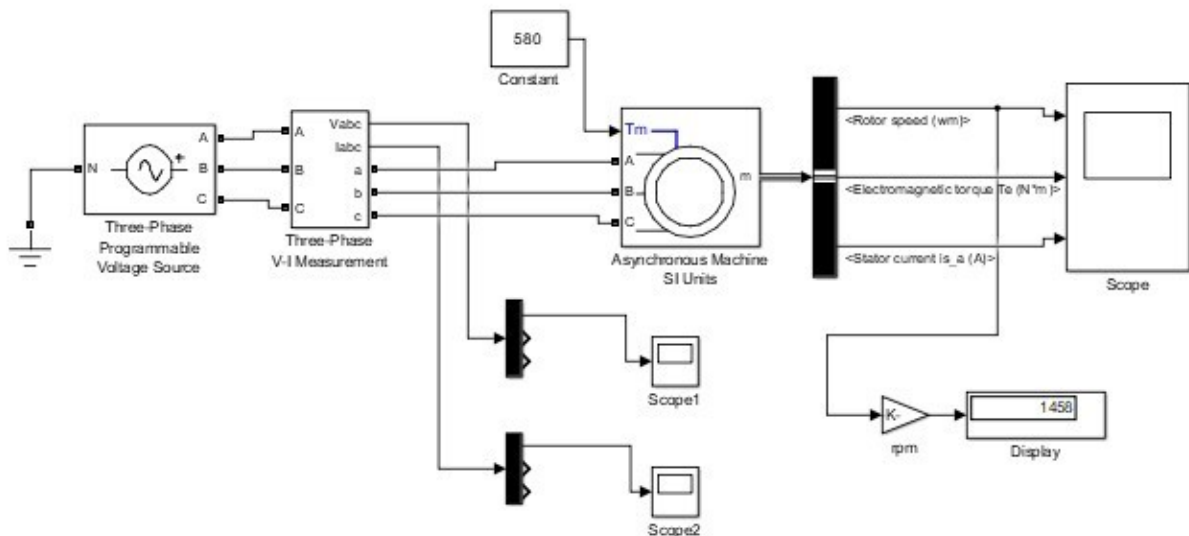


Рисунок 3.4 - Схема моделі прямого пуску АД з КЗ ротором.

Розрахунки статичного моменту механізму відповідають навантаженню на вал двигуна під час моделювання. Він активується поетапно після досягнення двигуном номінальної швидкості та завершення перехідних процесів. Динамічний момент приводу потрібно враховувати в моделі, щоб правильно розрахувати параметри холостого ходу, але під час розрахунків він не враховувався через його значно менше значення, в порівнянні зі статичним моментом агрегата.

Нижче представлено графік залежності швидкості та електромагнітного моменту двигуна при розгоні. Тут також можна поглянути на результати моделювання процесу прямого пуску двигуна з короткозамкненим ротором.

Навіть попри неідеальність і приблизність математичної моделі, на рисунку 3.6 ми бачимо значний пусковий струм на протязі майже секунди з моменту початку моделювання пуску двигуна.

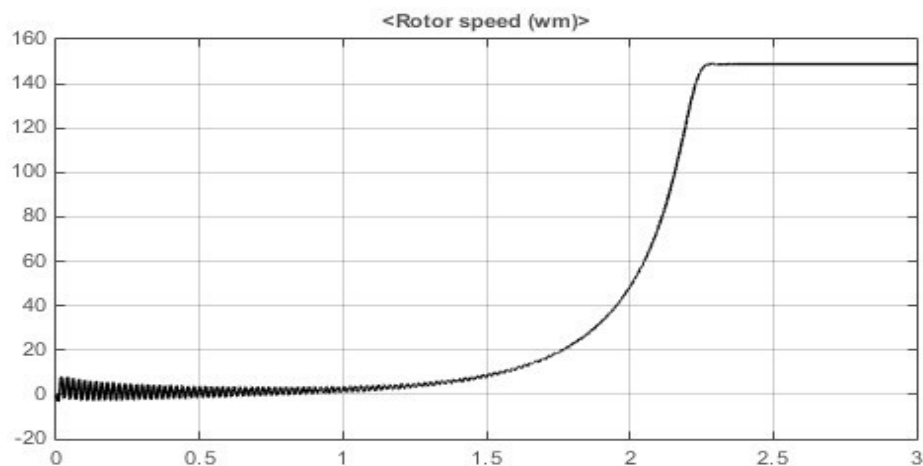


Рисунок 3.5 – Діаграма швидкості ротору двигуна.

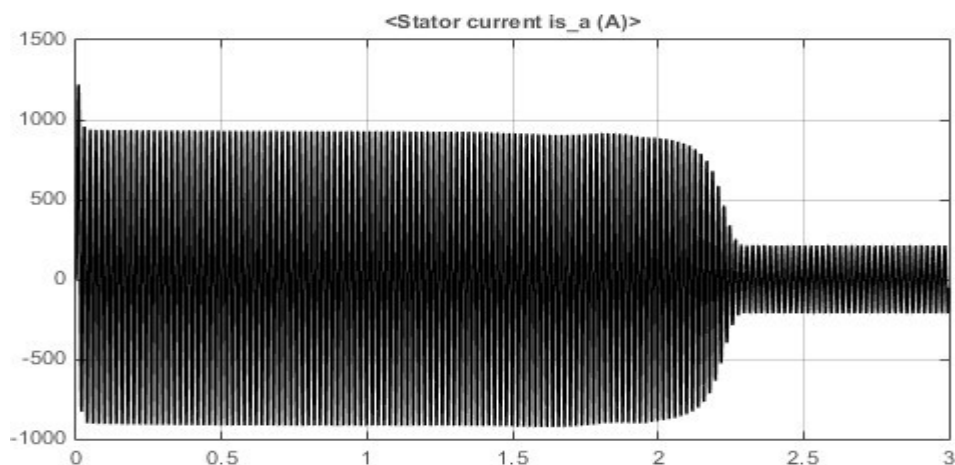


Рисунок 3.6 – Діаграма струму фази статора двигуна.

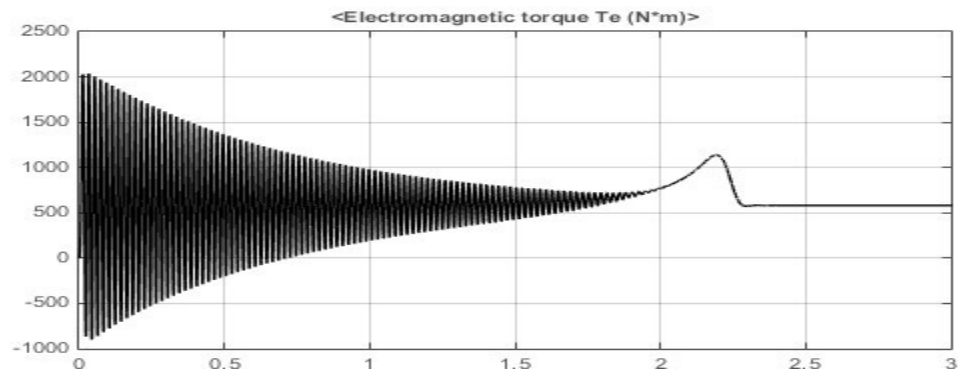


Рисунок 3.7 – Діаграма електромагнітного моменту.

3.4 Моделювання пуску двигуна електропривода з ПЧ.

Нижче можна розглянути модель електропривода з перетворювачем частоти ПЧ-АД. Навантаження на вал двигуна моделюється точно так само, як і при прямому пуску.

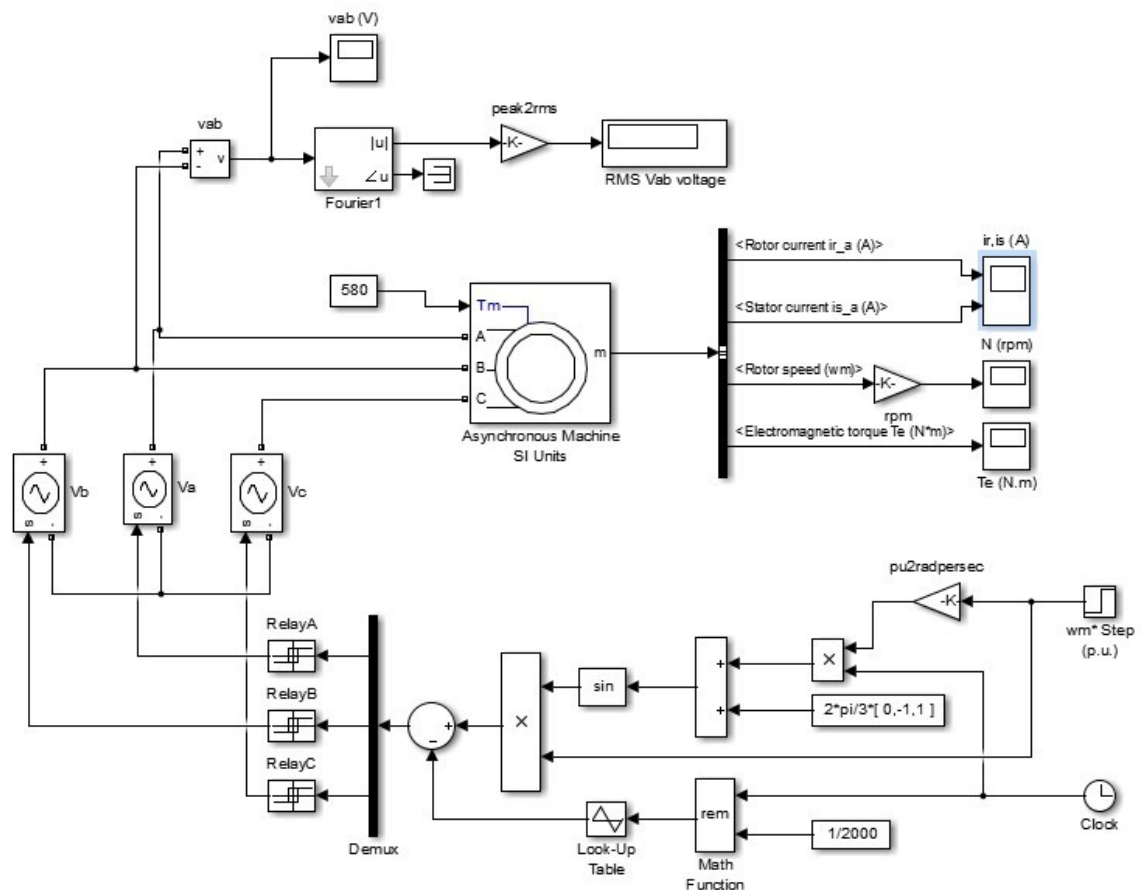


Рисунок 3.8 – Схема моделі включення двигуна із частотним перетворювачем частоти.

Тут використана система керування зі зворотнім зв'язком зі швидкістю двигуна, що має забезпечувати широкий діапазон регулювань. В схему включено джерело трифазного живлення з використанням широкосмугової модуляції, також трифазним вимірювачем напруги та струму обмоток статора, осцилограф та інше вимірювальне обладнання. Закон зміни частоти струму є аперіодичним. Можна одразу помітити значне зниження струму під час розгону двигуна. Також змінилася динаміка розгону, яка стала більш плавною та наблизилася до лінійної.

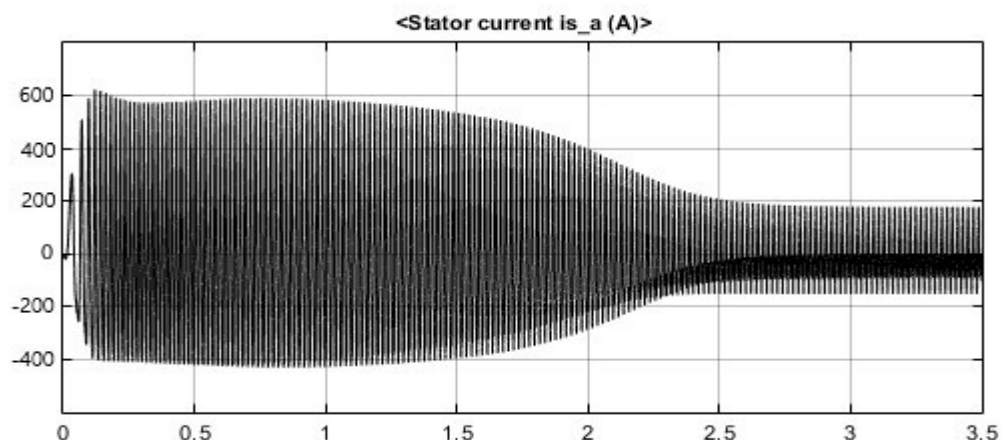


Рисунок 3.11 – Діаграма струму фази статора двигуна.

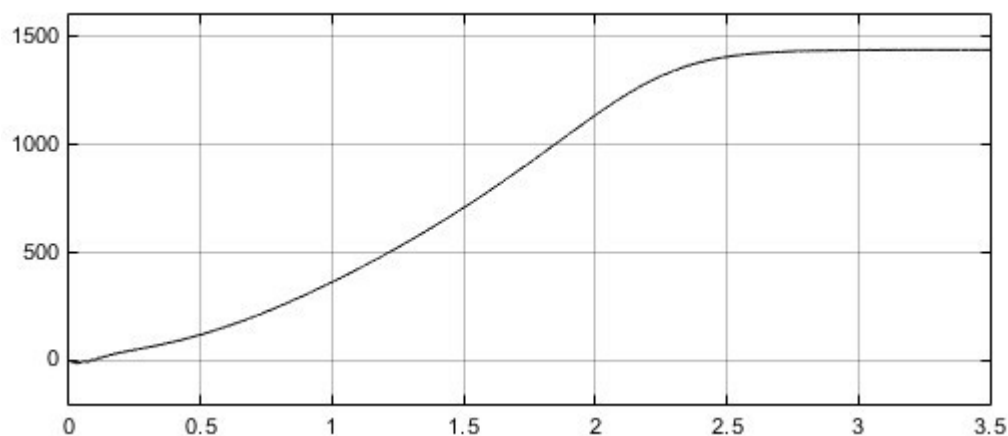


Рисунок 3.12 – Діаграма швидкості ротора двигуна.

3.5 Висновки і пропозиції.

Прямий запуск двигуна з частотно-регульованим керуванням подається із напругою, що не змінюється, в 380 В та з частотою 50 Гц. Струм спочатку перевищує номінальні показники у 6-7 разів. Час пуску без навантаження складає більше 2 секунд, а струм зменшується до струму при холостому ході. Розгон ротора до показників номінальної частоти обертання складає приблизно 2,3 секунди. За цей час електромагнітний момент двигуна спочатку збільшується, а після розгону знижується.

Поетапне збільшення навантаження приводу також збільшує номінальні значення струму та електромагнітного моменту.

Використання перетворювача частоти при запуску двигуна дає показники поступово зростаючої напруги живлення та частоти змінного струму до номінальних позначок, що становлять 380 В та 50 Гц відповідно. Імпульси пускового струму двигуна зменшуються, а час розгону збільшується з 2,3 секунди до приблизно 2,8 секунд. При цьому, можна зробити висновок, що механічні удари електропривода при пуску з перетворювачем значно зменшуються, порівняно з прямим пуском.

Асинхронний трифазний двигун серії AIP250M4 з перетворювачем частоти типу e.f-drive.pro.90 та потужністю в 90 кВт може забезпечувати діапазон регулювання обертання приводу $n = 750,0 \dots 1500,0$ об/хв. та стабілізує частоту обертання з точністю до $\Delta n = 5,0\%$ в розімкненій схемі управління електроприводом компресорної станції. Це говорить, про те, що такий двигун дозволить нормально функціонувати агрегату.

4 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Монтаж та обслуговування компресорної установки.

Компресорна установка ВШ-4.2/200 призначена для стискання повітря у складі стаціонарних станцій газорозділення до тиску 200 кгс/см^2 (19,6 МПа). Установка автоматизована та не потребує постійної присутності обслуговуючого персоналу.

Для монтажу компресорної установки необхідно заздалегідь підготувати або приміщення або огорожений майданчик на якому буде відбуватися монтаж. Місце монтажу повинно відповідати вимогам проектної документації.

Розміщення установки повинне забезпечувати безпеку та зручність її обслуговування.

Якщо установка розміщується у приміщенні, то це приміщення повинно відповідати основним вимогам до будівель і споруд та захисту від шуму та вібрації (ДБН В.1.2-10:2021). Висота стелі в приміщенні повинна забезпечувати можливість монтажу, демонтажу та ремонту установки.

Приміщення або майданчик повинні мати підвід та відвід очищеної від примісив прісної води, яка використовується для охолодження установки, а також підведені електромережі для живлення установки. При необхідності до місця монтажу установки повинні бути підведені необхідні комунікації.

Вважаючи на те, що установка є механізмом із підвищеною вібрацією, для монтажу установки повинен бути заздалегідь підготовлений фундамент який має відповідати проектним навантаженням, як ваговим, так і довготривалим вібраційним.

Перед монтажем повинні бути підготовлені усі необхідні матеріали. Замовнику надається уся необхідна проектна документація, схеми підключення, та інформація про подальше обслуговування установки. Також узгоджується графік проведення монтажних та пусконаладжувальних робіт. Готується необхідне контрольно-вимірювальне обладнання яке повинне бути повіреном і відповідати вимогам виробника установки.

Приміщення в якому відбувається монтаж компресорної установки повинно бути обладнане контуром заземлення який має відповідати вимогам ПУЕ (п.п. 1.7.95-96).

Монтаж установки повинен відбуватися або безпосередньо представниками виробника, або з їх залучанням для нагляду та інструктажів.

Під час монтажу обов'язково проводиться перевірка зазорів як в горизонтальній так і у вертикальній площині, а також співвісності валів. Відхилення по вісям у від вертикалі усувають підкладенням під лапи двигуна металевих підкладок. Усунення відхилення у горизонтальній площині здійснюється переміщенням електродвигуна в монтажних отворах рами.

4.2 Роботи з обслуговування компресорної установки.

Своєчасне технічне обслуговування виробничого устаткування забезпечує:

- постійну технічну готовність обладнання;
- максимальні міжремонтні терміни, що сприяє економії як фінансів так і робочого часу обслуговуючого персоналу;
- усунення причин що призводять до передчасного зносу, виходу з ладу та неправильну роботу складових частин обладнання.

Періодичне технічне обслуговування повинно проводитися згідно затвердженим графіком, та з урахуванням часу роботи установки. Воно проводиться силами обслуговуючого персоналу підприємства. Перед проведенням технічного обслуговування повинні бути підготовлені необхідні матеріали, технічна документація, інструменти, прилади та запчастини.

В процесі експлуатації компресорної установки передбачені наступні види технічного обслуговування:

1. щодобовий огляд;
2. обслуговування №1 кожні 500 годин роботи установки;
3. обслуговування №2 кожні 1000 годин роботи установки;
4. обслуговування №3 кожні 3000 годин роботи установки;

5. обслуговування установки під час короткочасного зберігання.

Щодобове обслуговування проводиться як на працюючому так і не працюючому компресорі. На працюючому компресорі візуально та на слух перевіряють справну роботу його складових частин, переконуються у відсутності не характерних шумів та відсутності підтікання мастила. На не працюючому компресорі перевіряють рівень мастила в картері компресору, а при необхідності виконують його долив до рівнів що вказані в документації. Перевіряють різьбові з'єднання, які при необхідності підтягують. Оглядають та перевіряють наявність контрольно-вимірювальні прилади.

При проведенні обслуговувань №1 та №2 дозволяється виконувати під час короткочасний зупинок установки тривалістю не більше 2 годин.

Якщо установка знаходиться в бездіяльності від одного до шести місяців і не консервується, то передбачається щомісячне технічне обслуговування.

При проведенні обслуговування №3 також перевіряється опір ізоляції статора та ротора. Це робиться за допомогою мегомметра з напругою 1000 В для статора і 500 В для ротора. Опір ізоляції статора при цьому не повинен бути меншим за 0,5 МОм. Виміри проводяться для обмоток кожної фази окремо при цьому обмотки фаз що не вимірюються повинні бути з'єднані із корпусом двигуна.

Також перевіряються опори ізоляції вторинних кіл керування та сигналізації. Виміри проводять за допомогою мегомметра напругою 500 В. Опір ізоляції ланцюгів вторинних кіл повинен бути не меншим 0,5 МОм

Результати усіх видів обслуговування повинні записувати до журналу, з оформленням протоколів проведених робіт, вказуванням значень вимірів, а також виявлених та усунених несправностей.

4.3 Роботи з ремонту компресорної установки.

Ремонтні роботи на компресорній станції, як і роботи з обслуговування проводяться згідно затвердженого графіку. Це відбувається або під час планових ремонтів, або під час капітальних.

До виконання робіт допускаються лише обслуговуючий персонал що ознайомлений із влаштуванням та принципами дії установки. Також перед допуском до робіт проводяться необхідні інструктажі та необхідне навчання персоналу.

Усі роботи повинні проводитися лише після повного падіння тиску в системі та при повному знеструмленні установки. Перед проведенням ремонтних робіт необхідно повністю знеструмити установку, а на рубильнику подачі живлення необхідно повісити попереджувальний знак «Не вмикати! Працюють люди!». Цей знак може бути знятий лише з дозволу особи відповідальної за проведення робіт, після завершення ремонтних робіт.

Під час ремонтних робіт, окрім робіт вказаних в переліку робіт з обслуговування також перевіряються стан підшипників ротору, виконується заміна мастильної речовини в них, а при необхідності їх повна заміна. Перевіряється робота двигуна на холостому ході тривалістю не менше 1 години. Вимірюється рівень вібрації працюючої установки. Також замінюються усі деталі які відпрацювали свій ресурс та деталі заміна яких передбачена у графіку проведення ППР. Проводиться повна заміна мастила в картері компресору та деталей поршневої групи такі як кільця, вкладиші колінчастого валу та механізмів крейцкопфу.

Перевіряють правильну роботу захисного обладнання. Спрацьовування кінцевих вимикачів та усіх блокуючих ліній, та ліній сигналізації. Перевіряють надійність усіх електричних з'єднань та візуальний стан ізоляції провідників що не знаходяться в трубах або закритих лотках.

Також перевіряються зазори та співвісність валів. При необхідності виконується їх центрування.

Після завершення ремонтних робіт проводиться пробний пуск установки. При цьому двигуну дають пропрацювати без навантаження щонайменше 10 хвилин. Також перевіряється робота системи водяного охолодження та температурні режими на відповідність технічних характеристик установки.

Усі проведенні роботи записуються до журналу проведення робіт а їх результати оформлюються протоколами із вказанням дати та часу виконання.

4.4 Охорона праці при обслуговуванні компресорної установки.

До работ по обслуговуванню компресорної станції допускаються особи старші 18 років, та які пройшли навчання та перевірку теоретичних знань та практичних навичок, а також мають кваліфікаційне посвідчення із вказанням допуску до подібних робіт, пройшли обов'язковий медичний огляд та не мають протипоказань, пройшли усі необхідні інструктажі з охорони праці.

Робітники що обслуговують установку повинні знати:

- принцип дії установки;
- інструкцію з експлуатації;
- можливі несправності та способи їх усунення;
- правила побудови та безпечної експлуатації повітряних компресорів;
- правила протипожежної безпеки;

До фізично небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які мають місце при експлуатації установки, відносяться:

- підвищений тиск повітря в циліндрах та пневматичних комунікаціях установки;
- висока температура нагнітаючих трубопроводів;
- частини установки що обертаються (маховик, муфта, вал двигуна);
- підвищений рівень шуму;
- підвищений рівень вібрації;
- висока напруга в мережі живлення двигуна та автоматики.

Через те що установка є джерелом підвищеного рівня шуму, в приміщенні або на відкритому майданчику, де працює установка повинна бути відділена зона з рівнем шуму більше за 80 дБа. Межі цієї зони повинні бути означені попереджувальними знаками «Працювати із застосуванням засобів захисту органів слуху». Обслуговуючий персонал що працює в цій зоні повинен бути забезпечений засобами індивідуального захисту органів слуху від шуму (вкладиші типу «Беруші», або протишумові навушники). При цьому час перебування обслуговуючого

персоналу в шумонебезпечній зоні не повинен перевищувати 1 годину якщо установка працює.

При експлуатації компресорної установки забороняється:

- пуск та робота установка із знятим захисним огороженням маховика;
- виконувати підтягування роз'ємних з'єднань повітропроводу при працюючій установці;
- усівати витіки повітря або мастила до повного падіння тиску в системі;
- торкатися нагнітаючих труб, для запобігання отримання опіків;
- подавати напругу на установку в разі відсутності або несправності заземлення;
- проводити роботи із заземленням якщо на установку подана напруга;
- проводити профілактичні роботи на установці, якщо не відключене живлення на щиті електропостачання;
- пуск та робота установки при рівні мастила нижче за допустимий;
- працювати несправними контрольно-вимірювальними приладами, та якщо прострочена дата їх повірки;
- застосовувати для чищення деталей та вузлів рідини що легко займаються.

Після аварійної зупинки установки її пуск дозволяється тільки після виявлення її причини та усунення несправності.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Розрахунок економічної ефективності.

Перед проведенням будь-яких робіт з модернізації варто впевнитись в їх доцільності та економічній ефективності. Для цього необхідно розрахувати економічний ефект від втілення тих чи інших інноваційних рішень. За даними останніх досліджень, втілення рішень з модернізації, або інших науково технічних рішень та технологій, вважається доцільним якщо строки окупності витрат на їх втілення не перевищують 7 років.

Основною метою втілення науково технічних рішень є підвищення ефективності виробничого процесу. Перелічимо основні цілі підвищення ефективності роботи обладнання, яких можливо досягти впровадивши застосування перетворювача частоти для керування електродвигуном на компресорній установці.

а. Найголовніше, це зменшення витрат електроенергії, та відповідно зменшення прямих розходів на її оплату.

б. Зменшення зносу деталей механізмів за рахунок більш ефективного керування двигуном та процесом його пуску.

в. Застосування АСУ ТП для централізованого керування обладнанням та моніторингу його стану. Це значно зменшує час який персонал витрачає на поточне обслуговування обладнання.

г. Зменшення вірогідності виходу з ладу вторинного обладнання за рахунок значного зниження імпульсних пневматичних навантажень на основні вузли установки.

д. За рахунок збільшення інтервалів між плановими обслуговуваннями та ремонтами скорочується час який витрачають на ці роботи обслуговуючі бригади, а відповідно це дозволяє їм виконувати більший обсяг робіт з іншим обладнанням.

Існує стандартна методика оцінки ефективності впровадження науково технічних заходів, яка базується на порівнянні витрат на систему у базовому виконанні, та витрат на модернізовану систему.

В цій методиці основним показником ефективності є термін окупності капітальних витрат з урахуванням приведених витрат які є сумою різноманітних експлуатаційних витрат, які складаються з витрат на електроенергію, ремонт обладнання, амортизаційні відрахування та витрат на допоміжні матеріали.

Отже розрахунок загальних витрат на систему V_{CIC} має вигляд:

$$V_{CIC} = C_P + E_K \cdot K_B \quad (5.1)$$

де C_P – це сума усіх річних витрат на експлуатацію;

E_K – нормований коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, в нашому випадку, для нової техніки він складає $E_K = 0,2$;

K_B – капітальні вкладення на побудову системи.

Порівнюючи величини загальних витрат на базову систему та модернізовану ми зможемо оцінити ефективність впровадження рішень для модернізації.

Беручи до уваги що ми порівнюємо дві системи, базову та модернізовану, ми будемо проводити однакові розрахунки одних й тих самих показників для цих варіантів

Сума усіх річних витрат на експлуатацію складається з декількох параметрів, а саме:

$$C_P = C_{PO} + C_{\Phi\Pi} + C_{EH} \quad (5.2)$$

де C_{PO} – річні витрати на ремонт та поточне обслуговування системи;

$C_{\Phi\Pi}$ – річний фонд заробітної платні;

C_{EH} – витрати на електричну енергію за рік роботи системи.

Я було вказано вище, ми проводимо розрахунки для двох систем, базової та модернізованої, тому будемо позначати параметри індексами B та M , для базової та модернізованої системи відповідно.

Тоді сума річних витрат для цих систем буде мати вигляд:

$$C_{PB} = C_{POB} + C_{ФЗПБ} + C_{ЕНБ} \quad (5.3)$$

$$C_{PM} = C_{POM} + C_{ФЗПМ} + C_{ЕНМ} \quad (5.4)$$

Слід зазначити, що річний фонд заробітної плати не змінюється в залежності від обслуговування базової чи модернізованої системи, тому має місце наступна умова:

$$C_{ФЗП} = C_{ФЗПБ} = C_{ФЗПМ} \quad (5.5)$$

Тому розрахунки річного фонду заробітної плати ми проведемо лише один раз. Для визначення терміну окупності ми скористуємося наступною формулою:

$$T_{OK} = \frac{K_{BM} - K_{BB}}{C_{PB} - C_{PM}} \quad (5.6)$$

де K_{BM} – капітальні вкладення для модернізованої системи;

K_{BB} – капітальні вкладення на базовій системі;

C_{PB} – річні витрати на обслуговування базової системи з (5.4);

C_{PM} – річні витрати на обслуговування модернізованої системи з (5.5).

Далі проведемо розрахунки усіх необхідних показників.

5.2 Розрахунок капітальних вкладень.

Для розрахунку капітальних вкладень для обох варіантів систем скористуємося даними у табличному вигляді

Таблиця 5.1 – капітальні вкладення для базової та модернізованої систем

Найменування обладнання	Кількість, од.	Вартість за од., грн.	
		Базова	Модернізована
Контакторна схема-	1	15000	0
ПЧ e.f-drive.pro.90	1	0	156000
Електродвигун АИР250М4	1	92000	92000
Усього вартість обладнання		107000	248000
Транспортні витрати 7,5 %		8025	18600
Монтажні та пусконаладжувальні роботи 10 %		10700	24800
Капітальні вкладення загалом		125725	291400

До капітальних вкладень, окрім безпосередньо вартості обладнання, відносяться також витрати на транспортування, та виконання монтажу та пусконаладжувальних робіт. Для зручності, при розрахунках, ці величини беруться як відсоток від вартості обладнання, тому вони мають доволі приблизне значення. Але для наших розрахунків цього цілком достатньо.

Отже за даними з таблиці 5.1 ми отримаємо значення капітальних вкладень K_{BB} та K_{BM} :

$$K_{BB} = 125725 \text{ грн.}$$

$$K_{BM} = 291400 \text{ грн.}$$

5.3 Розрахунок річного фонду заробітної плати.

Для того щоб скористатися формулою 5.2 нам необхідно розрахувати витрати на річний фонд заробітної плати.

Будемо виходити з того, що обслуговування електроприводу компресорної станції може здійснювати бригада з двох осіб що мають кваліфікаційний розряд не

нижче 4-го, а також групу з електробезпеки не нижче 3-ї. Також варто зазначити що ця бригада окрім обслуговування компресорної станції виконує інші обов'язки, тому для розрахунків витрат на обслуговування ми прийнемо:

$$C_{\Phi ЗП} = \frac{1}{2} \Phi_{ЗПБР} \quad (5.7)$$

де $\Phi_{ЗПБР}$ – річний фонд заробітної плати бригади.

При розрахунках будемо брати за основу що в Україні посадовий оклад працівника 1-го розряду дорівнює 3195 грн. При цьому коефіцієнт тарифної ставки для працівників 4-го розряду становить 1,27. Тоді заробітна плата за тарифом $З_T$ буде дорівнювати:

$$З_T = 3195 \cdot 1,27 = 4057,65 \text{ грн.} \quad (5.8)$$

Це базова тарифна ставка від якої також розраховуються інші надбавки, такі як надбавка за професійну діяльність та надбавка за роботу в шкідливих умовах.

За професійну діяльність працівник отримує надбавку $З_{НПД}$ у розмірі 10% від базової тарифної ставки:

$$З_{НПД} = З_T \cdot 0,1 \quad (5.9)$$

Тобто:

$$З_{НПД} = 4057,65 \cdot 0,1 = 405,77 \text{ грн.}$$

Коефіцієнт надбавки за шкідливі умови НШУ становить 17%, тоді сума надбавки за шкідливі $З_{ШУ}$ умови становитиме:

$$З_{ШУ} = (З_T + З_{НПД}) \cdot 0,17 \quad (5.10)$$

Тобто:

$$Z_{ШВ} = (4057,65 + 405,77) \cdot 0,17 = 758,78 \text{ грн.}$$

Підрахуємо постійну місячну заробітну плату $Z_{МП}$:

$$Z_{МП} = Z_T + Z_{НЦД} + Z_{ШВ} \quad (5.11)$$

Тоді отримуємо:

$$Z_{МП} = 4057,65 + 405,77 + 758,78 = 5222,20 \text{ грн.}$$

Від значення місячної постійної заробітної плати (5.11) також розраховується величина премії що становить в середньому 20%:

$$Z_{ПР} = Z_{МП} \cdot 0,2 \quad (5.12)$$

$$Z_{ПР} = 5222,20 \cdot 0,2 = 1044,44 \text{ грн.}$$

Тепер ми можемо підрахувати основну місячну заробітну плату Z_O :

$$Z_O = Z_{МП} + Z_{ПР} \quad (5.13)$$

Отже:

$$Z_O = 5222,22 + 1044,44 = 6266,63 \text{ грн.}$$

Від основної заробітної плати ще нараховується додаткова Z_D у розмірі 10%:

$$Z_D = Z_O \cdot 0,1 \quad (5.14)$$

Тоді:

$$Z_D = 6266,63 \cdot 0,1 = 626,66 \text{ грн.}$$

Від суми основної заробітної плати Z_O та додаткової Z_D розраховуються відрахування до фонду соціального страхування $\Phi_{СС}$, які також треба враховувати і вони становлять 37,18%:

$$\Phi_{cc} = (3_o + 3_d) \cdot 0,3718 \quad (5.15)$$

$$\Phi_{cc} = (6266,63 + 626,66) \cdot 0,3718 = 2562,93 \text{ грн.}$$

Тепер ми можемо підрахувати розмір річного фонду заробітної плати $C_{фзп}$:

$$C_{фзп} = (3_o + 3_d + \Phi_{cc}) \cdot 12 \quad (5.14)$$

$$C_{фзп} = (6266,63 + 626,66 + 2562,93) \cdot 12 = 113474,72 \text{ грн.}$$

Отже для розрахунків у формулах (5.3) та (5.4) ми будемо використовувати саме це значення $C_{фзп} = 113474,72$ грн.

5.4 Розрахунок витрат на електроенергію.

Розрахуємо показники витрат на електроенергію, для обох варіантів, базового $C_{ЕНБ}$ та модернізованого $C_{ЕНМ}$.

Щоб розрахувати значення $C_{ЕН}$ скористуємося формулою:

$$C_{ЕН} = P_{НОМ} \cdot t_3 \cdot n_{РЗ} \cdot T \quad (5.15)$$

де $P_{НОМ}$ – це номінальна потужність електродвигуна з таблиці 2.1, $P_{НОМ} = 90$ кВт;

t_3 – час роботи двигуна за одну зміну, $t_3 = 8$ годин;

$n_{РЗ}$ – кількість робочих змін на рік, $n_{РЗ} = 264$ зміни;

T = тариф на електроенергію, $T = 2,64$ грн./кВт·год.

Розрахуємо значення $C_{ЕН}$ для базового варіанту системи, тобто $C_{ЕНБ}$:

$$C_{ЕНБ} = 90 \cdot 8 \cdot 264 \cdot 2,64 = 501811,20 \text{ грн.}$$

Споживання модернізованої системи відрізняється від базової в меншу сторону за рахунок застосування перетворювача частоти. Сучасні перетворювачі, в

залежності від режиму роботи двигуна дозволяють досягти економії понад 30%. Для наших розрахунків ми візьмемо значення 20%:

$$C_{EHM} = C_{EHB} - C_{EHB} \cdot 0,2 \quad (5.16)$$

Отже C_{EHM} дорівнює:

$$C_{EHM} = 501811,20 - 501811,20 \cdot 0,2 = 401448,96 \text{ грн.}$$

Ми отримали значення річних витрат на електроенергію для обох варіантів системи:

$$C_{EHB} = 501811,20 \text{ грн.}$$

$$C_{EHM} = 401448,96 \text{ грн.}$$

5.5 Розрахунок витрат на обслуговування та ремонт.

Для застосування формул (5.3) та (5.4) нам залишилося розрахувати річні витрати на обслуговування та ремонт обох варіантів систем. Тобто значення $C_{РОБ}$ та $C_{РОМ}$. Ці показники мають декілька складових, а саме:

Планові витрати на поточний ремонт, $V_{ПРБ}$ та $V_{ПРМ}$;

Відрахування на амортизацію $V_{АМБ}$ та $V_{АММ}$;

Витрати на допоміжні та витратні матеріали $V_{ВМБ}$ та $V_{ВММ}$.

В основі розрахунків цих параметрів лежать значення капітальних вкладень з таблиці 5.1

$$K_{BB} = 125725 \text{ грн.}$$

$$K_{BM} = 291400 \text{ грн.}$$

Так планові витрати на ремонт становлять 5% та 3% від капітальних вкладень для базової та модернізованої системи відповідно:

$$V_{ПРБ} = K_{BB} \cdot 0,05 \quad (5.17)$$

$$V_{ПРМ} = K_{BM} \cdot 0,03 \quad (5.18)$$

Тоді:

$$B_{ПРБ} = 125725 \cdot 0,05 = 6286,25 \text{ грн.}$$

$$B_{ПРМ} = 291400 \cdot 0,05 = 8742,00 \text{ грн.}$$

Для електричного обладнання прийняті відрахування на амортизацію $B_{АМБ}$ та $B_{АММ}$ у розмірі 7,8% від капіталовкладень $K_{ББ}$ та $K_{ВМ}$ відповідно:

$$B_{АМБ} = K_{ББ} \cdot 0,078 \quad (5.19)$$

$$B_{АММ} = K_{ВМ} \cdot 0,078 \quad (5.20)$$

Відповідно:

$$B_{АМБ} = 125725 \cdot 0,078 = 9806,55 \text{ грн.}$$

$$B_{АММ} = 291400 \cdot 0,078 = 22729,20 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні та витратні матеріали $B_{ВМБ}$ та $B_{ВММ}$, такі як спецодяг, засоби індивідуального захисту, миючі засоби тощо, визначаються як відсоток від річного фонду заробітної плати $C_{ФЗП}$. 5% для базової системи, та 3% для модернізованої:

$$B_{ВМБ} = C_{ФЗП} \cdot 0,05 \quad (5.21)$$

$$B_{ВММ} = C_{ФЗП} \cdot 0,03 \quad (5.22)$$

Отже:

$$B_{ВМБ} = 113496 \cdot 0,05 = 5674,80 \text{ грн.}$$

$$B_{ВММ} = 113496 \cdot 0,03 = 3404,88 \text{ грн.}$$

Для витрат на ремонт та обслуговування систем маємо:

$$C_{РОБ} = B_{ПРБ} + B_{АМБ} + B_{ВМБ} \quad (5.23)$$

$$C_{РОМ} = B_{ПРМ} + B_{АММ} + B_{ВММ} \quad (5.24)$$

Підставляючи розраховані раніше значення витрат отримаємо:

$$C_{РОБ} = 6286,25 + 9806,55 + 5674,80 \text{ грн.}$$

$$C_{РОМ} = 8742,00 + 22729,20 + 3404,88 \text{ грн.}$$

5.6 Розрахунок терміну окупності.

Тепер ми можемо розрахувати величину сумарних річних витрат на базову систему $C_{РБ}$, та модернізовану $C_{РМ}$. Для цього скористуємося формулами (5.3) та (5.4) і підставимо до них значення отримані у попередніх розділах.

$$C_{РБ} = C_{РОБ} + C_{ФЗПБ} + C_{ЕНБ} = 5674,80 + 113496 + 501811,20 = 637074,80 \text{ грн.}$$

$$C_{РМ} = C_{РОМ} + C_{ФЗПМ} + C_{ЕНМ} = 3404,88 + 113496 + 401448,96 = 549821,04 \text{ грн.}$$

За формулою (5.6) розраховуємо термін окупності модернізованої системи у порівнянні з базовою. Для цього підставимо в неї значення капітальних вкладень з таблиці 5.1, та значення сумарних річних витрат на обслуговування $C_{РБ}$ та $C_{РМ}$:

$$T_{OK} = \frac{K_{ВМ} - K_{ВБ}}{C_{РБ} - C_{РМ}} = \frac{291400 - 125725}{637074,80 - 549821,04} = 1,90 \text{ року.}$$

Цей показник є доволі гарним, бо він значно менший за допустимі 7 років майже у 3,7 рази.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовані основні галузі використання та типові технічні рішення електроприводів компресорних установок. Це дозволило ознайомитись з сучасними конструкціями, системами електроприводу та автоматизації для конкретно обраної компресорної установки, а також сформулювати основні вимоги до електроприводу, системи автоматичного керування обраного виду компресорної установки.

2. Був проведений розрахунок тягових зусиль електроприводу, а також розрахунок потужності електродвигуна. Завдяки цьому побудували навантажувальну діаграму електроприводу та здійснили вибір двигуна необхідної потужності. Було обрано конкретний асинхронний двигун серії АІР250М4 та визначені його основні параметри, а також проведено перевірку обраного двигуна по перевантажувальній здатності. Це дало змогу обрати перетворювач частоти необхідної потужності та струму серії e.f-drive.pro.90.

3. Розроблена математична модель непрямого векторного керування АД. Розраховано параметри схеми заміщення обраного асинхронного двигуна серії АІР250М4.

4. Проведені розрахунки, необхідні для дослідження динамічних та статичних режимів електромеханічної системи шляхом моделювання.

5. Отримані висновки свідчать про високі показники якості розробленого електроприводу і його відповідність характеристикам, які були поставлені в проекті.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електропривод: Підручник / Ю. М. Лавріненко, П. І. Савченко, О. Ю. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. В. Савченко, І. М. Голодний; ліра, 2021 р., 532 с.
2. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
3. М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва . Електричні машини і трансформатори. Під ред. Міліх В. І., 2022р., 452 с.
4. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навчальний посібник/ За ред. М.Г.Поповича. – К.: Либідь, 2005. – 672 с.
5. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (теорія і практика): Навчальний посібник/ За ред. М.Г.Поповича, В.В.Кострицького. – К.: КНУТД, 2008. – 408 с.
6. Автоматизований електропривод ч. 2 [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В.І. Теряєв. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 204 с.
7. Технічні характеристики АИР250М4.
Режим доступу: <https://vent-a.com.ua/pr4272-ua/trifaznij-elektrodivgun-air250m4-90-kvt-1500-ob--hv/>
8. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За редакцією М.Г.Поповича та О.Ю.Лозинського / Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом „Електромеханіка”. – К.: Либідь, 2005. -680 с.
9. Допустимі довготривалі струми для проводів, шнурів, кабелів з гумовою або пластмасовою ізоляцією. Витяг з нормативних акті України
Режим доступу: http://norma.org.ua/document/legislation/PUE7/1_3_2.php#google_vignette

11 Системи програмного та слідкуючого керування рухом [Електронний ресурс]: підручник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» / В.І.Теряєв, С.В.Король. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 150 с.

12. Розробка та дослідження електромеханічних систем автоматизації та складових електропривода / М.Г.Попович, В.І.Кострицький та ін. - Навчальний посібник з грифом МОН України. – К: КНУТД, 2011. – 492 с.

13. Електричні машини. Асинхронний двигун : метод. вказівки до виконання курсової роботи: бакалаврів спец. 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / Є. П. Штепа, О. Ю. Розіна ; Каф. електромеханіки та мехатроніки. — Одеса: ОНТУ, 2024. — 38 с.

Режим доступу: <https://elc.library.ontu.edu.ua/library-w/DocumentDescription?docid=OdONANT.2254930>

14. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Поточна редакція. — Редакція від 21.02.2017.

Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text>

15. Лазарєв Ю. Ф. Довідник з MATLAB / Електронний навчальний посібник з курсового і дипломного проектування. – К.: НТУУ "КПІ", 2013. – 132 с.

16 e.f-drive.pro.90manual

Режим доступу: <https://eltron.com.ua/peretvoryuvach-chastoty-e-f-drive-pro-30-30kvt-3f-380v>