

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет автоматизації виробництва та цифрових технологій
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП

Світлана ГУРКОВСЬКА

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Комп'ютерне конструювання мехатронних систем»
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування

**на тему «Модернізація системи керування пуском електродвигунів
насосів високого тиску мартенівського цеху»**

Керівник роботи

Богдан ЦИМБАЛ

Консультант від бази
практики

Максим БАБЕНКО

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають
посилання на відповідне джерело*

Здобувач

Володимир СИЧОВ

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Андрій ГОЛОЯДОВ

Запоріжжя 2024

mip metinvest
polytechnic



ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет автоматизації виробництва та цифрових технологій
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
ОПП Комп'ютерне конструювання мехатронних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми
«Комп'ютерне конструювання мехатронних систем»

Світлана ГУРКОВСЬКА

(прізвище та ініціали)

(підпис)

«12» липня 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Сичова Володимира Вікторівича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи (проєкту) Модернізація системи керування пуском електродвигунів насосів високого тиску мартенівського цеху
керівник роботи (проєкту) Цимбал Богдан Михайлович, доктор наук з державного управління, доцент

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

затверджені наказом Університету від 01.07.2024 №162/01.07.2024

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 01.12.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти з автоматизації, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики автоматичного регулювання та управління, літературні джерела, технологічні інструкції, результати власних експериментів та досліджень тощо

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз предметної області. 2. Теоретичні дослідження. 3. Методика експериментальних досліджень 4. Розділ з економіки. Висновки.

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу: _____

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Консультант (прізвище, ініціали та посада)

7. Дата видачі завдання 05 липня 2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи (проекта)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Аналіз предметної області	09.09.2024 – 03.11.2024	
2	Розділ 2. Теоретичні дослідження	04.11.2024 – 10.11.2024	
3	Розділ 3. Методика та результати експериментальних досліджень	11.11.2024 – 17.11.2024	
4	Розділ 4. Економічне обґрунтування запропонованих змін	18.11.2024 – 20.11.2024	
5	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	21.11.2024 – 24.11.2024	
6	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	25.11.2024 – 27.11.2024	
7	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	25.11.2024 – 27.11.2024	
8	Рецензування завершеної роботи.	28.11.2024 – 01.12.2024	
8	Захист	02.12.2024 – 07.12.2024	

Володимир СИЧОВ

Здобувач

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Богдан ЦИМБАЛ

Керівник роботи

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)



АНОТАЦІЯ

Сичов Володимир Вікторович. Модернізація системи керування пуском електродвигунів насосів високого тиску мартенівського цеху - Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». ОПП «Комп'ютерне конструювання мехатронних систем» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2024.

Об'єктом дослідження даної роботи є система керування пуском електродвигунів насосів високого тиску мартенівського цеху.

Предметом дослідження є насосна станція високого тиску мартенівського цеху для забезпечення охолодження вузлів та агрегатів мартенівських печей.

Мета та завдання. Модернізація системи пуску електродвигунів насосної станції високого тиску мартенівського цеху з використанням частотного перетворювача.

У роботі проведено детальний аналіз існуючої системи пуску електродвигунів насосної станції, що включає шість насосів з високовольтними двигунами 6000 В. Встановлено, що частотний перетворювач дозволяє плавно регулювати швидкість обертання електродвигунів, що забезпечує оптимізацію роботи насосів, зниження енергоспоживання та зменшення зносу механічних частин.

Встановлено, що використання частотного перетворювача дозволяє зменшити споживання електроенергії на 27% за рахунок оптимізації швидкості обертання електродвигунів. Розроблено рекомендації щодо використання частотного перетворювача в насосних станціях для підвищення енергоефективності та надійності обладнання.

Економічний розрахунок показав, що чистий прибуток від впровадження частотного перетворювача становить 1 950 000 грн, а період окупності складає 0,53 роки. Результати дослідження можуть бути використані для модернізації інших промислових об'єктів, що працюють у важких умовах.

Робота містить практичні рекомендації щодо впровадження частотних перетворювачів на промислових підприємствах для підвищення енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат. Результати дослідження можуть бути використані для модернізації інших промислових об'єктів, що працюють у важких умовах.

Обсяг магістерської роботи складає 76 сторінок, містить 34 ілюстрацій, 5 таблиць, додатків та посилання на 19 джерел у переліку посилань

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, НАСОСНА СТАНЦІЯ, ЕЛЕКТРОДВИГУН, МОДЕРНІЗАЦІЯ, ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ПРОМИСЛОВЕ ОБЛАДНАННЯ.



ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД - Асинхронний двигун;

ЧП - Частотний перетворювач;

ДТ - Датчик тиску;

МП - мартенівська піч;

ДСПА - двованний сталеплавильний агрегат;

М - електрична машина.



ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
Перелік умовних скорочень.....	5
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	10
1.1 Насосна станція високого тиску мартенівського цеху.....	10
1.2 Системи пуску електродвигунів.....	15
1.3. Високовольтні та низьковольтні електродвигуни.....	19
1.4. Виявлення недоліків та обґрунтування модернізації існуючої системи.....	20
1.5 Класифікація частотних перетворювачів.....	21
1.6 Високовольтні частотні перетворювачі.....	31
1.7 Переваги використання частотних перетворювачів.....	37
1.8 Сучасні тенденції та інновації в галузі частотних перетворювачів..	38
1.9 Виклики та перспективи впровадження частотних перетворювачів	41
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	43
2.1 Розрахунок і вибір елементів системи керування перетворювача частоти.....	43
2.1.1 Розрахунок номінальних параметрів випрямляча.....	43
2.1.2 Розрахунок і вибір струмообмежуючого реактора.....	44
2.1.3 Розрахунок і вибір силових елементів тиристорно-діодного модуля випрямляча.....	45
2.1.3 Розрахунок і вибір елементів RC – ланцюга.....	50
2.1.4 Розрахунок і вибір резистора захисного ланцюга.....	51
2.1.5 Розрахунок і вибір варистора.....	52
2.1.6 Розрахунок і вибір конденсаторного фільтра.....	53
2.1.7 Розрахунок і вибір силового транзистора.....	54
2.2 Дослідження механічних характеристик насосних агрегатів у системах водопостачання.....	55
2.2.1 Характеристики насосів та мережі.....	55
2.2.2 Регулювання продуктивності та частотне регулювання.....	56



2.2.3 Механічні характеристики насоса	59
3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	63
3.1 Застосування енкодера для контролю частоти обертання асинхронного електродвигуна	63
3.2 Застосування датчика тиску в насосній станції мартенівського цеху	65
3.3 Схеми модернізації системи пуску електродвигунів насосної станції високого тиску	67
4 РОЗДІЛ З ЕКОНОМІКИ	69
4.1 Споживання електроенергії насосної станції	69
4.2 Економічний розрахунок	70
ВИСНОВКИ	73
ПЕРЕЛІК ВИКОРАСТИНИХ ДЖЕРЕЛ	74



ВСТУП


Сучасні вимоги до енергозбереження та ефективного використання ресурсів у металургійній промисловості вимагають постійного вдосконалення технологічних процесів. Насосні станції високого тиску, які є невід'ємною частиною мартенівських цехів, виконують важливу функцію забезпечення циркуляції охолоджувальної води та інших технологічних рідин. Проте, більшість насосних станцій оснащені застарілими системами пуску електродвигунів, що призводить до підвищених енергетичних витрат, частих збоїв та дорогого технічного обслуговування.

В умовах війни в Україні питання енергозбереження набуває особливої гостроти. Пошкодження інфраструктури та дефіцит енергоресурсів вимагають максимально ефективного використання наявних ресурсів. Модернізація системи пуску електродвигунів із застосуванням частотних перетворювачів дозволяє значно знизити споживання електроенергії, підвищити стабільність роботи обладнання та зменшити витрати на його обслуговування, що є критично важливим в сучасних умовах.

Метою цієї кваліфікаційної роботи є розробка, обґрунтування та впровадження заходів щодо модернізації системи пуску електродвигунів насосної станції високого тиску мартенівського цеху шляхом встановлення частотного перетворювача. Це дозволить підвищити енергоефективність, зменшити навантаження на електричну мережу, продовжити термін служби обладнання та знизити витрати на технічне обслуговування.

В ході дослідження провести детальний аналіз існуючої системи пуску електродвигунів насосної станції, вивчити теоретичні основи та принципи роботи частотних перетворювачів, їх вплив на характеристики електродвигунів та загальну ефективність насосних станцій. Розробити програму та методику проведення експериментальних досліджень з метою оцінки ефективності впровадження частотного перетворювача. Визначити технічні характеристики та вимоги до апаратури та обладнання, необхідних для проведення експериментів. Провести експериментальні дослідження, проаналізувати отримані результати та зробити відповідні висновки. Виконати економічний аналіз доцільності впровадження частотного перетворювача, включаючи розрахунок окупності проекту та потенційні економічні вигоди.

У роботі використовуються методи теоретичного аналізу, моделювання, експериментальні дослідження та економічний аналіз. Теоретичні аспекти включають аналіз принципів роботи частотних перетворювачів та їх впливу на електродвигуни. Експериментальні дослідження передбачають тестування нової системи в умовах, наближених до реальних, з метою оцінки її ефективності. Економічний аналіз включає розрахунок вартості впровадження частотного



перетворювача та оцінку економічних вигод від зниження експлуатаційних витрат.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. У першому розділі проведено аналіз предметної області, у другому розглянуто теоретичні аспекти частотних перетворювачів, третій розділ присвячений програмі, методиці та результатам експериментальних досліджень, а четвертий розділ містить економічний аналіз впровадження частотного перетворювача. У висновках підсумовано результати роботи та запропоновано напрямки подальших досліджень.

Значимість цієї роботи полягає в підвищенні енергоефективності та надійності роботи насосної станції з використанням частотного перетворювача. Розроблені рекомендації щодо впровадження частотних перетворювачів дозволяють значно знизити енергоспоживання, що сприяє економії витрат на електроенергію. Також, завдяки вдосконаленню системи пуску електродвигунів, зменшується зношення обладнання, що продовжує термін його служби. Отримані результати можуть бути використані для модернізації інших насосних станцій та виробничих процесів, що потребують точного регулювання швидкості обертання електродвигунів.

Цей підхід не лише покращує роботу конкретних систем, а й створює базу для подальших досліджень у напрямку енергоефективного управління промисловими процесами.

Апробація результатів:

1. Цимбал Б.М., Сичов В.В. Модернізація системи керування пуском електродвигунів насосів високого тиску мартенівського цеху. International scientific conference «MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education» conference proceedings, Riga, the Republic of Latvia, November 28–29, 2024. «Baltija Publishing», Riga, Latvia, 2024. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-154>

2. Цимбал Б.М., Сичов В.В. Особливості роботизації металургійного виробництва. Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. Одеса : Видавничий дім «Гельветика». 2024. № 1. С. 25-31. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-4>

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Насосна станція високого тиску мартенівського цеху

У мартенівському цеху одного з металургійних комбінатів розташовані сім стаціонарних мартенівських печей, що перебувають в експлуатації, кожна з яких має місткість 500 т та один сталеплавильний агрегат з двома ванна, кожна яких має місткість 250 т.

Механізми та обладнання мартенівських печей та двованного сталеплавильного агрегату при виробництві сталі потребують охолодження, яке забезпечується водою за допомогою насосної станції [1]. Водоохолоджувальні елементи мартенівських печей представлено на рис. 1.1.

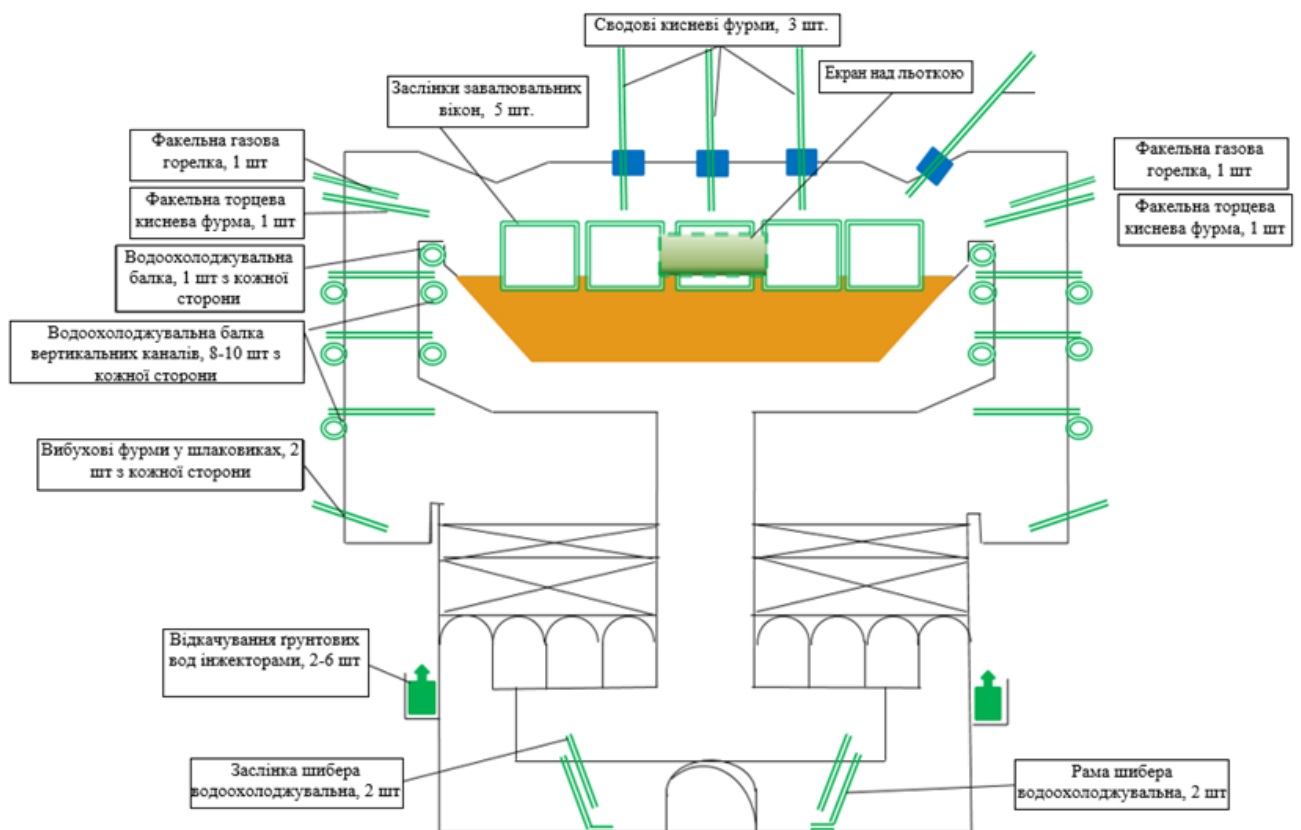


Рисунок 1.1 – Водоохолоджувальні елементи мартенівських печей

Насосна станція мартенівського цеху (рис. 1.2) служить для забезпечення охолодження мартенівських печей та ДСПА із заданою продуктивністю 621 м³/год (для одного насоса) при тиску 7,5 кг/см² в загальний скидний колектор, необхідний тиск на печі 5 кг/см² для забезпечення охолодження кисневих фурм, температура вихідної води яких не повинна бути вищою 60 °С, та забезпечення відкачування ґрунтових вод інжекторами із глибини 12 м [2,3].

При існуючому парку насосного обладнання кількості 6 од., для забезпечення водою для охолодження мартенівських печей завжди у

роботі два насосні агрегати.



Рисунок 1.2 – Насосна станція мартенівського цеху

Насосні агрегати мають два типу насоса, їх характеристики представлені в таблиці 1.1, та два різні типу електродвигунів.

Таблиця 1.1 – Характеристики насосів

Тип насоса	Тип двигуна	Потужність, кВт	Подача, м ³ /год	Напір, м	Частота обертів, об/хв	ККД, %	Кількість, шт
Насос 8НДВ-90	A-113-4	250	600	90	1500	77	4
Насос WILO SCP 200/460HA	A4-355L-4	250	620	70	1470	88	2

Насос 8НДВ є динамічним, горизонтальним, одноступеневим відцентровим насосом з двостороннім входом, призначеним для перекачування води. Його конструкція включає корпус, кришку, робоче колесо, вал, вузли ущільнення та підшипникові опори. Ущільнення вала є сальниковим, а для створення гідравлічного затвора рідина підводиться по каналу до кришки насоса.

Цей насос широко використовується у водному господарстві, житлово-комунальному господарстві, нафтовій та газовій промисловості,

теплоенергетиці, атомній енергетиці, металургії, гірничодобувній промисловості та системах пожежогасіння.

Креслення насоса 8НДВ відповідно до технічного паспорта (рис 1.3).

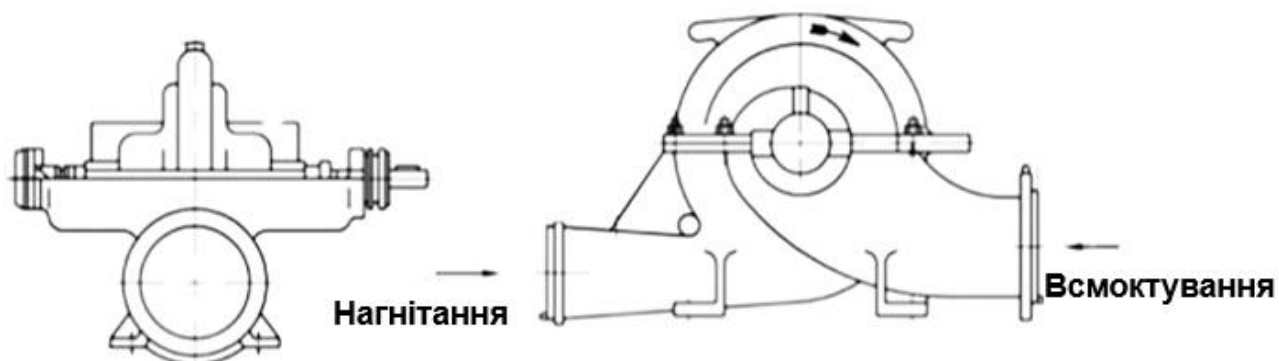


Рисунок 1.3 – Креслення насоса 8НДВ

Характеристики насоса 8НДВ при частоті обертання валу 1500 об/хв представлені на рисунку 1.4.

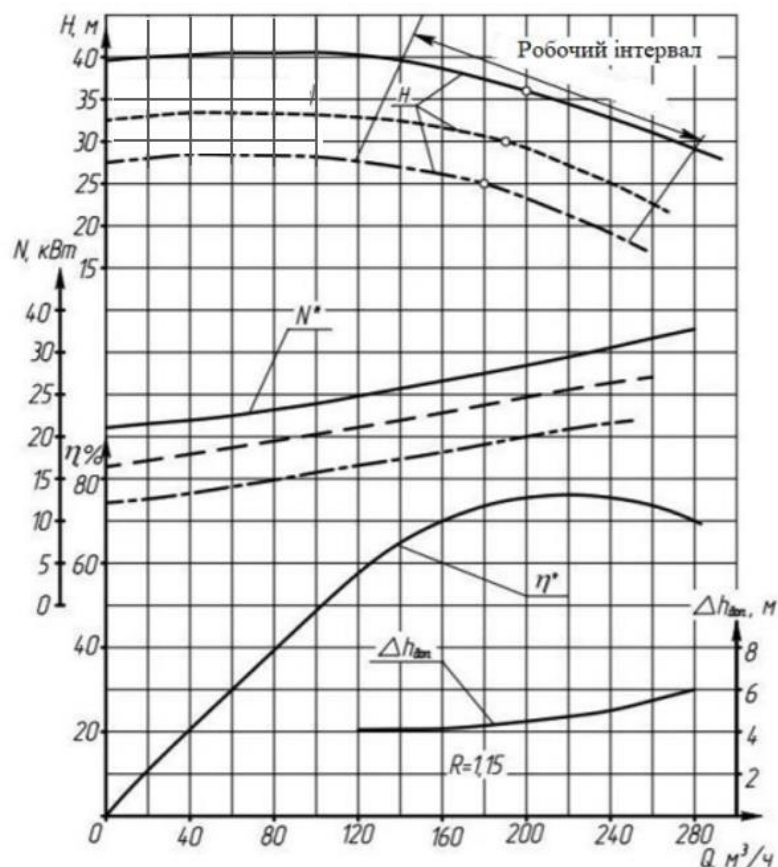


Рисунок 1.4 – Характеристики насоса 8НДВ

Насос WILO SCP 200/460HA одноступеневий нормально всмоктувальний відцентровий насос з аксіально розділеним корпусом. Корпус насоса має спіральну форму і складається з двох литих частин,

з'єднаних гвинтами вздовж осі насоса. Герметичність між фланцями обох частин корпусу забезпечується паперовим ущільненням.,

Насоси з аксіально розділеним корпусом використовуються переважно в системах водопостачання, замкнених водяних контурах, системах для видалення залишків води, охолоджувальних ставках, системах кондиціонування, на станціях водоочищення, у спринклерних системах, системах крапельного зрошення та системах постачання води для пожежогасіння.

Креслення насоса WILO SCP 200/460HA відповідно до технічного паспорту (рис 1.5).

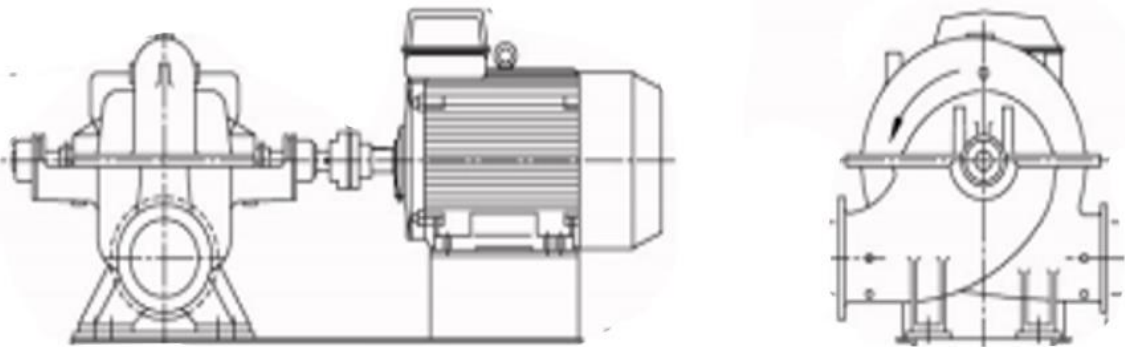


Рисунок 1.5 – Креслення насоса WILO SCP 200/460HA

Характеристики насоса WILO SCP 200/460HA представлені на рисунку 1.6

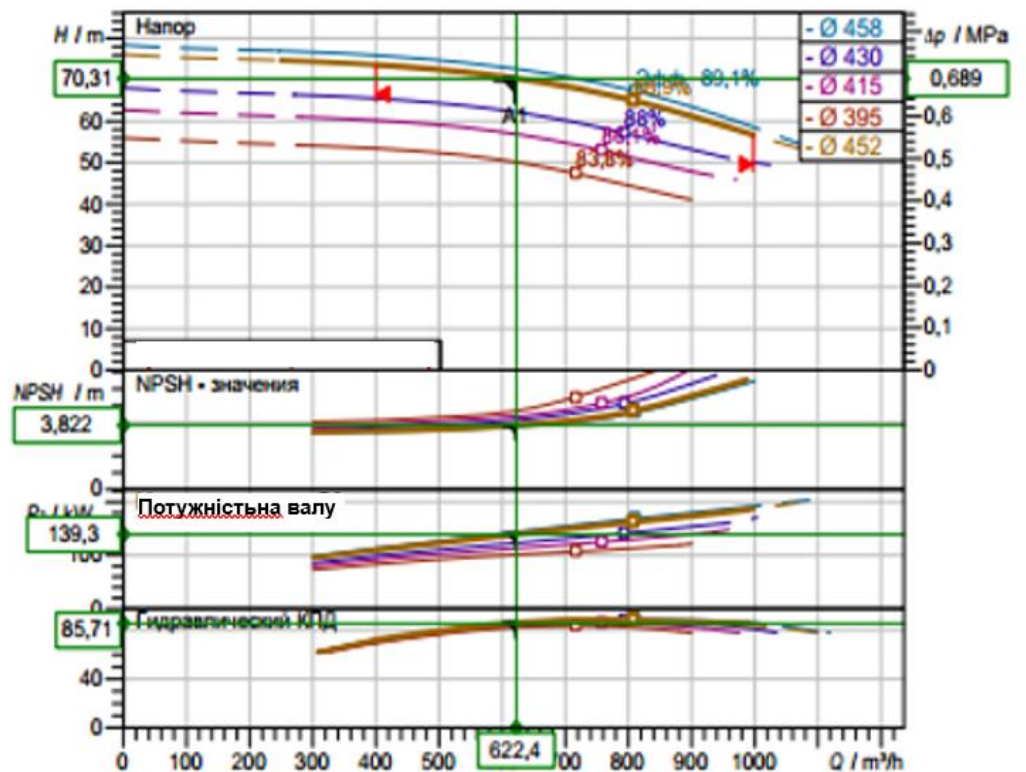


Рисунок 1.6 – Характеристики насоса WILO SCP 200/460HA

Насосний агрегат складається з насоса, передавального механізму та електроприводу. Для приведення насоса в дію використовуються високовольтні електродвигуни серії А-113-4 та А4-355L-4 (рис 1.7).



а) електродвигун серії А-113-4



б) електродвигун серії А4-355L-4

Рисунок 1.7 – Електродвигуни серії А-113-4 та А4-355L-4

На даний момент, система пуску електродвигунів насосної станції базується на прямому пуску від мережі (рис 1.8). Це означає, що двигуни запускаються безпосередньо при підключенні до живлення, що призводить до високих пускових струмів та значних механічних навантажень на обладнання.

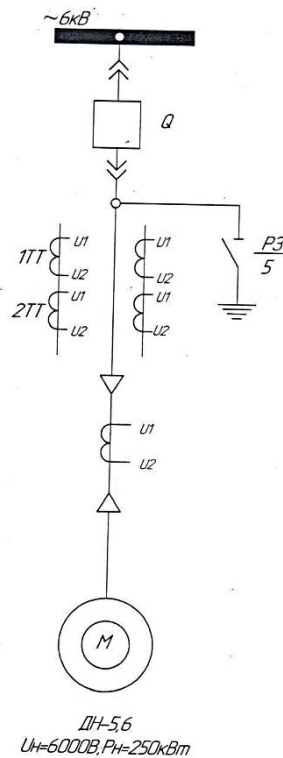


Рисунок 1.8 – Електрична схема живлення електродвигуна

Така система має кілька суттєвих недоліків. Пускові струми можуть перевищувати номінальні у 5-7 разів, що створює значне навантаження на електричну мережу та призводить до великих втрат електроенергії. Високі пускові струми та механічні навантаження збільшують зношення електродвигунів і насосів, що скорочує їх термін служби та збільшує витрати на технічне обслуговування. Прямий пуск може призводити до виникнення перехідних процесів в мережі, що негативно впливає на стабільність роботи всієї системи.

1.2 Системи пуску електродвигунів

Прямий пуск (Direct On-Line, DOL) — це один з найбільш поширених методів запуску асинхронних електродвигунів (рис 1.9). При цьому методі електродвигун підключається безпосередньо до електричної мережі.

Прямий пуск є простим і швидким методом, що не вимагає складних схем або додаткових пристроїв. Під час запуску двигуна пусковий струм може бути в 5-7 разів більшим за номінальний, що може викликати проблеми в електромережі. Двигун досягає своєї номінальної швидкості практично миттєво. [4].

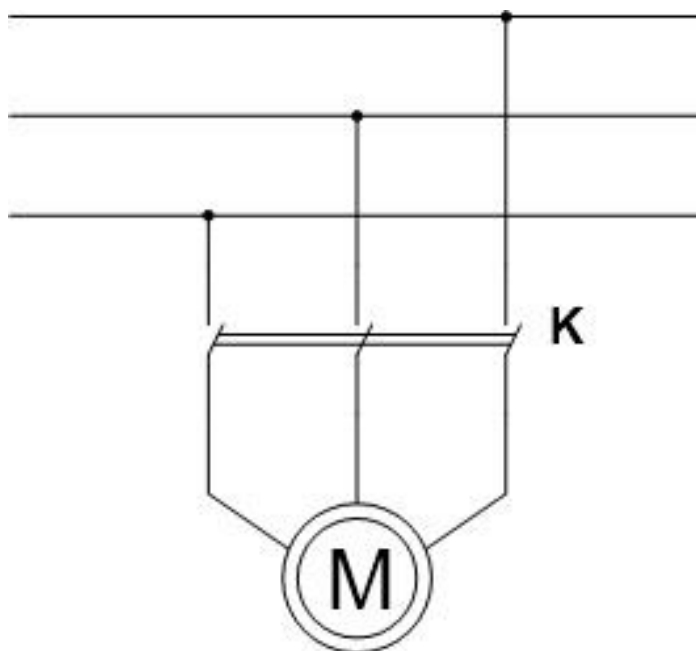


Рисунок 1.9 – Схема прямого пуску

Система прямого пуску відрізняється своєю простотою установки та експлуатації, вона не потребує додаткових елементів, таких як контактори або контролери, що спрощує монтаж і обслуговування

Недоліками системи прямого пуску є:

- високий пусковий струм що може призвести до перевантаження мережі та може вплинути на інші електроприлади, підключені до тієї ж мережі;

- високі пускові струми і моменти можуть викликати підвищене зношення механічних компонентів двигуна, скорочуючи його термін служби;

- даний метод не підходить для важких механізмів або обладнання, яке потребує контролю швидкості або м'якого пуску.

Ще один метод запуску асинхронних електродвигунів є пуск зниженою напругою, що дозволяє зменшити пусковий струм і механічні навантаження. Цей метод включає кілька різних схем, зокрема зірка-трикутник та пуск через автотрансформатор.

При використанні схеми зірка-трикутник двигун підключається в зірковій схемі, що дозволяє зменшити напругу, а після досягнення певної швидкості переходить на схему трикутник що показано на рисунку 1.10.

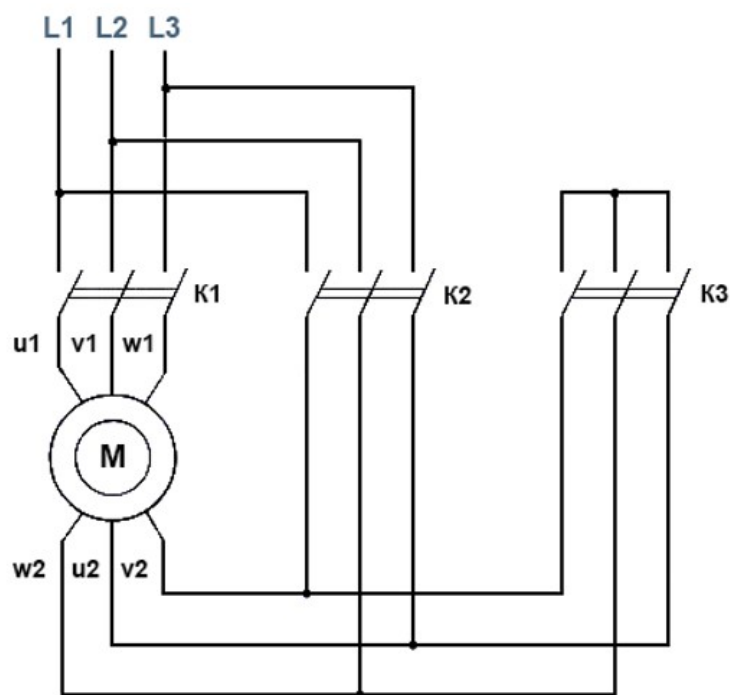


Рисунок 1.10 – Схема зірка-трикутник

Перевагами такої системи пуску є зниження пускового струму до 30% від рівня прямого пуску, що зменшує навантаження на електродвигун, що в свою чергу подовжує його термін служби.

Недоліками являються складніша схема підключення і не підходить для двигунів з маленькими потужностями або для установок, де часто відбуваються пуски.

В схемі пуску електродвигуна через автотрансформатор використовується автотрансформатор для зниження напруги, що подається на двигун під час пуску (рис 1.11).

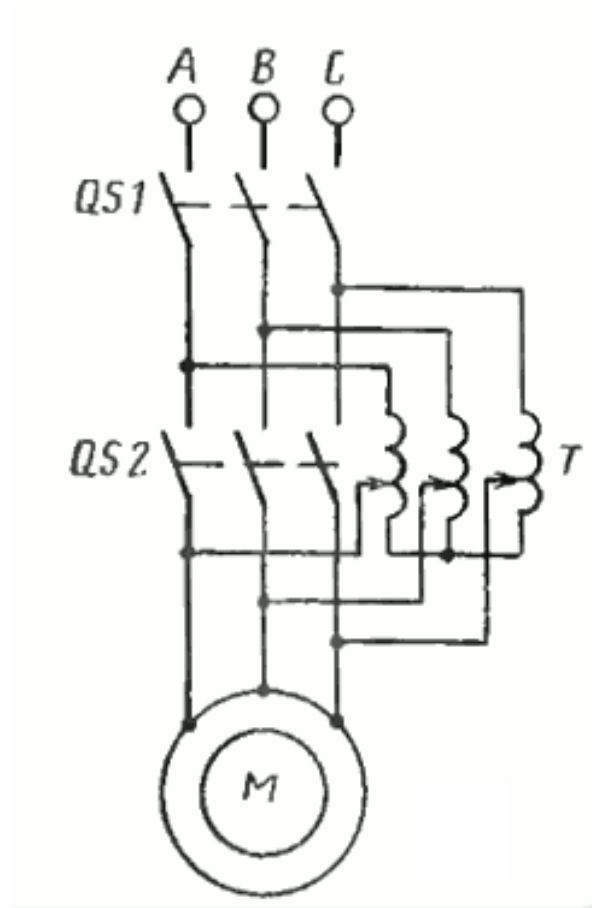


Рисунок 1.11 – Схема пуску через автотрансформатор

До переваг такої системи можна віднести гнучкість у виборі рівня зниження напруги, що дозволяє підлаштовуватися під конкретні умови також зниження пускового струму.

До недоліків можна віднести вищі початкові витрати через необхідність використання автотрансформатора та складність в установці та налаштуванні.

Переваги пуску зниженою напругою:

- значне зменшення пускового струму, що знижує ризик перевантаження електричної мережі;
- зниження механічного навантаження на двигун, що продовжує термін служби.

Недоліки пуску зниженою напругою:

- витрати на додаткові компоненти і складність системи;
- необхідність чіткого налаштування та контролю, щоб уникнути неправильних переходів між схемами.

Електронні системи пуску електродвигунів стають все більш популярними завдяки своїй здатності забезпечувати плавний старт, зменшувати пусковий струм і контролювати робочі характеристики двигунів. Вони зазвичай використовують різні методи управління, такі як регулювання напруги та частоти [5].

Система перемінних частотних приводів (VFD) дозволяє регулювати частоту та напругу, що подається на двигун, забезпечуючи плавний пуск і зупинку. Існує декілька схем підключення перетворювачів які зазначенні на рисунку 1.12.

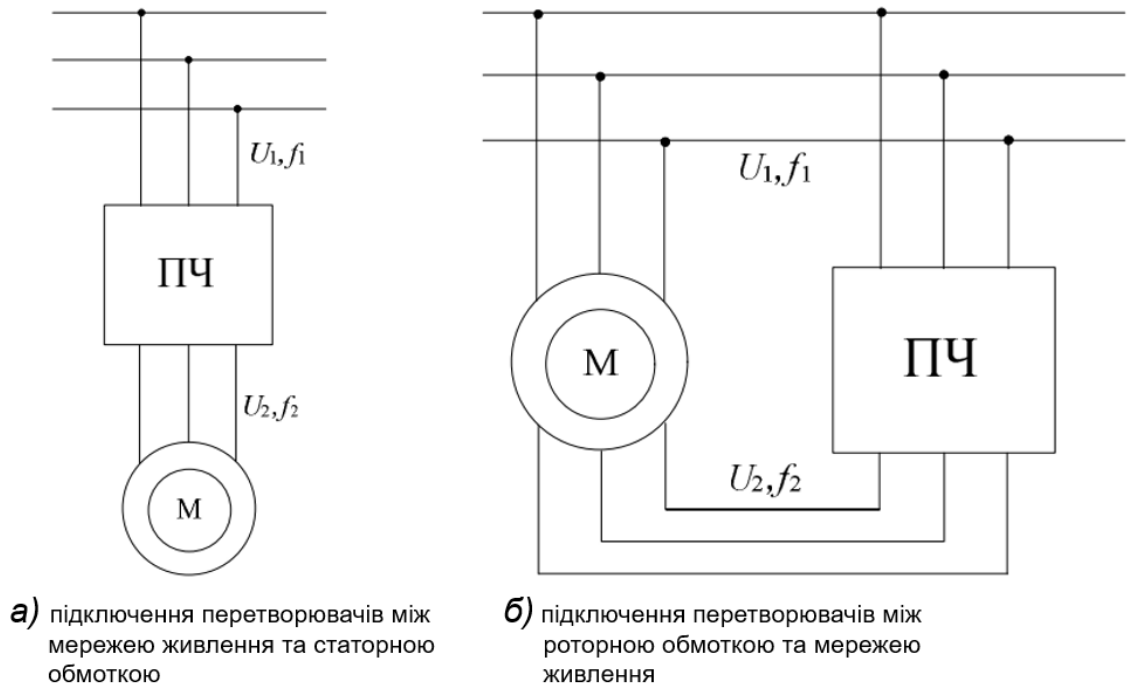


Рисунок 1.12 – Схеми підключення перетворювачів.

Основними перевагами системи перемінних частотних приводів являється зниження пускового струму та можливість точного контролю швидкості двигуна, що підвищує його ефективність у різних режимах роботи.

Основними недоліками є значні початкові витрати на установку та налаштування системи.

Системи м'якого пуску контролюють пусковий струм і забезпечують поступове підвищення напруги під час запуску.

При використанні системи м'якого пуску зменшується механічні навантаження на електродвигун та простіша установка в порівнянні з VFD, але система м'якого пуску не забезпечує контролю швидкості під час роботи двигуна.

Електронні системи пуску забезпечують значні переваги в управлінні асинхронними електродвигунами, зокрема в контексті зниження енергоспоживання та покращення їх експлуатаційних характеристик.

Вибір конкретної системи пуску залежить від вимог до специфіки застосування та економічних факторів.

1.3 Високовольтні та низьковольтні електродвигуни

Високовольтні електродвигуни — це двигуни, які працюють при напрузі понад 1000 В. Вони застосовуються в різних галузях, де потрібна висока потужність, такі як енергетика, хімічна та гірнича промисловість, а також для великих насосів, компресорів та вентиляційних систем[6].

Переваги високовольтних електродвигунів:

1) високовольтні електродвигуни здатні ефективно передавати велику потужність з меншими енергетичними втратами. Оскільки для великих потужностей низьковольтні системи потребують більших кабелів і більших струмів, високовольтні двигуни дозволяють зменшити перетин дротів, що знижує витрати на кабельне обладнання;

2) зважаючи на менший струм при високій напрузі, можна використовувати кабелі з меншим перерізом, що робить систему передачі енергії більш економічною при великих відстанях;

3) високовольтні електродвигуни можуть досягати великих значень потужності при порівняно компактних розмірах. Вони займають менше місця в порівнянні з низьковольтними аналогами для тих самих потужностей.

Недоліки високовольтних електродвигунів:

1) вартість виробництва та установки високовольтних двигунів значно більша через необхідність застосування спеціальних матеріалів для ізоляції та складнішу технологію виготовлення;

2) обслуговування таких двигунів вимагає спеціалізованого обладнання та кваліфікованих фахівців через високі вимоги до безпеки та умов експлуатації;


3) для роботи з високовольтними системами потрібні трансформатори, спеціальні розподільчі пристрої та обладнання для забезпечення належних умов для роботи електродвигунів.

Високовольтні електродвигуни зазвичай застосовуються в тих сферах, де необхідна висока потужність, зокрема в енергетиці для насосних станцій, в металургії, на великих виробничих підприємствах. Вони також використовуються в системах з тривалими кабельними лініями, де потрібно зменшити втрати енергії.

У таких застосуваннях, де потрібні великі потужності і висока ефективність, високовольтні електродвигуни є оптимальним вибором. Вони забезпечують надійну роботу великих промислових комплексів при зменшених витратах на інфраструктуру.

Низьковольтні електродвигуни працюють при напрузі до 1000 В та зазвичай використовуються в менш потужних додатках, таких як побутова техніка, вентиляційні системи, насосні станції та інші промислові та комерційні установки з середніми вимогами до потужності [8].

Переваги низьковольтних електродвигунів:



1) низьковольтні двигуни зазвичай дешевші у виробництві через простішу конструкцію, використання стандартних матеріалів та більш доступні технології виготовлення;

2) оскільки низьковольтні двигуни мають простішу ізоляцію та менші вимоги до супутнього обладнання, їх установка та обслуговування менш складні та менш витратні;

3) вони підходять для різноманітних застосувань у малих і середніх системах, таких як вентиляційні установки, кондиціонери, помпи, компресори та інші механізми з невеликими вимогами до потужності;

4) завдяки використанню частотних перетворювачів, низьковольтні двигуни можуть бути легко інтегровані в системи з регульованою швидкістю, що підвищує їх гнучкість та ефективність в умовах змінних навантажень.

Недоліки низьковольтних електродвигунів:

1) низьковольтні двигуни менш ефективні для великих потужностей, оскільки для передачі такої ж потужності необхідно використовувати великі кабелі з більшим перерізом, що збільшує вартість системи на великих відстанях;

2) коли потужність зростає, виникає потреба в більш товстих кабелях, що може ускладнити монтаж і збільшити витрати на матеріали;

3) у системах з високим навантаженням та великими кабелями можуть виникати додаткові втрати енергії через великий струм, що може впливати на ефективність роботи системи.


Низьковольтні електродвигуни зазвичай використовуються в менш потужних або середніх промислових установках, таких як вентиляційні системи, насосні станції, побутові прилади, а також у системах з частотними перетворювачами. Вони є оптимальним вибором для малих і середніх підприємств або комерційних установ, де не потрібно обробляти надвисокі потужності, але важлива гнучкість і економічність системи.

1.4. Виявлення недоліків та обґрунтування модернізації існуючої системи

Часті поломки та необхідність у технічному обслуговуванні обладнання призводять до високих експлуатаційних витрат. Поломки насосів можуть викликати зупинки виробничого процесу, що спричиняє економічні збитки підприємству та додаткових витрат на ремонтні роботи.

Високі пускові струми збільшують споживання електроенергії, що є особливо критичним в умовах енергетичної кризи. Сучасні тенденції в Україні, зокрема, зумовлені воєнними діями, вимагають підвищення енергоефективності та зниження споживання енергоресурсів.

Високі пускові струми створюють значне навантаження на електричну мережу, що може призводити до зниження якості електропостачання та збільшення ризику аварійних ситуацій. Коливання



напруги можуть негативно впливати на інше обладнання, підвищуючи ризик його виходу з ладу.

Враховуючи виявлені недоліки, модернізація системи пуску електродвигунів насосної станції є необхідною для підвищення ефективності роботи обладнання та зниження експлуатаційних витрат. Одним з найбільш ефективних способів вирішення цієї проблеми є впровадження частотних перетворювачів. Частотні перетворювачі дозволяють плавно регулювати швидкість обертання електродвигунів.

Частотні перетворювачі дозволяють значно знизити пускові струми, що зменшує навантаження на електромережу та обладнання. Це сприяє зменшенню втрат електроенергії та покращенню якості електропостачання.

Регулювання швидкості обертання електродвигунів дозволяє оптимізувати споживання електроенергії залежно від поточних потреб виробництва. Це знижує загальне енергоспоживання та витрати на електроенергію.

Плавний пуск та зменшення механічних навантажень сприяють збільшенню терміну служби електродвигунів та насосів, знижуючи витрати на їх технічне обслуговування та ремонт.

Зниження перехідних процесів та стабілізація роботи всієї системи сприяють підвищенню надійності роботи насосної станції. Це дозволяє зменшити кількість аварійних ситуацій та забезпечити безперервність виробничого процесу.

Зниження експлуатаційних витрат, зменшення споживання електроенергії та підвищення надійності роботи обладнання сприяють загальному підвищенню економічної ефективності підприємства.

Отже, модернізація системи пуску електродвигунів насосної станції високого тиску мартенівського цеху шляхом встановлення частотних перетворювачів є необхідною та обґрунтованою мірою, що дозволить значно підвищити ефективність роботи обладнання, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити стабільну роботу підприємства в умовах дефіциту енергоресурсів.


1.5 Класифікація частотних перетворювачів

Частотні перетворювачі класифікуються за різними ознаками, такими як принцип дії, тип керування, спосіб охолодження, ступінь захисту, конструктивне виконання та сфера застосування [9]. Нижче наведено основні класифікаційні ознаки частотних перетворювачів (таб.1.2).

Таблиця 1.2 - Класифікація частотних перетворювачів

Ознака класифікації	Типи частотних перетворювачів	Опис
Принцип дії	Векторні	Точне керування моментом і швидкістю, використовують векторне керування (FOC)
	Скалярні	Регулювання частоти і напруги без точного керування моментом (V/f Control)
Тип керування	З відкритим контуром	Без зворотного зв'язку, прості в конструкції і дешевші
	З замкненим контуром	Використовують зворотний зв'язок, точне керування швидкістю і моментом
Спосіб охолодження	Повітряне охолодження	Використовують вентилятори або природну конвекцію
	Рідинне охолодження	Використовують рідину для відведення тепла
Ступінь захисту	Низький ступінь захисту (IP20-IP44)	Захист від пилу і обмеженого впливу води, для внутрішнього використання
	Високий ступінь захисту (IP54-IP66)	Захист від пилу і струменів води, для важких умов експлуатації
Конструктивне виконання	Моноблочне виконання	Всі компоненти інтегровані в одному корпусі, прості в установці
	Модульне виконання	Складаються з окремих модулів, гнучкі і масштабовані
Сфера застосування	Промислові	Для промислових установок, висока надійність і стійкість до промислових умов
	Комерційні і побутові	Для комерційних і побутових установок, менші за розміром і менш потужні

Векторні частотні перетворювачі (або векторне керування або Field-Oriented Control, FOC) є одним з найбільш ефективних методів керування асинхронними електродвигунами. Це метод, який дозволяє отримати точне і стабільне керування моментом та швидкістю обертання електродвигуна шляхом розділення змінних величин на окремі компоненти.



Основною ідеєю векторного керування є те, щоб розділити дві складові струму асинхронного двигуна: струм, що генерує момент – який впливає на момент сили (крутний момент); струм, що генерує магнітне поле – який впливає на створення магнітного потоку [10].

Ці два струми мають бути керовані окремо для забезпечення максимальної ефективності.

Векторне керування передбачає орієнтацію вектора потоку на напрямок обертання ротора, тобто – орієнтацію поля магнітного потоку за допомогою вимірювання швидкості ротора. Це дозволяє забезпечити максимальний крутний момент при будь-якій швидкості обертання.

Переваги векторних частотних перетворювачів:

- забезпечують високу точність керування моментом і швидкістю;
- дає можливість отримувати максимальний крутний момент на низьких обертах;
- завдяки більш точному управлінню електродвигуном векторні перетворювачі знижують енергоспоживання;
- векторне керування дозволяє ефективно працювати навіть при низьких швидкостях обертання, що особливо важливо для складних технологічних процесів.


Недоліки векторних частотних перетворювачів:

- системи векторного керування є більш складними у налаштуванні та вимагають точного вимірювання параметрів двигуна;
- вони можуть бути дорогими через складність конструкції і потребу в додаткових компонентах, таких як енкодери;
- для досягнення максимальних результатів потрібно точно налаштування параметрів асинхронного двигуна, таких як індуктивність та опір.

Використання векторного керування можна побачити в насосних станціях, де необхідно регулювати потік рідини з високою точністю. Векторні частотні перетворювачі дають змогу працювати з насосами при змінних навантаженнях, забезпечуючи оптимальну продуктивність і зменшуючи споживану потужність.

Скалярні частотні перетворювачі (також відомі як метод V/f control) – це один із найбільш поширених типів частотних перетворювачів, який використовується для регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів. Цей метод базується на підтримці постійного співвідношення між частотою та амплітудою напруги, що подається на двигун. Основною характеристикою скалярного керування є те, що він не вимагає складного зворотного зв'язку для вимірювання параметрів двигуна, таких як момент або швидкість обертання [11].

У скалярних частотних перетворювачах частота напруги на виході перетворювача змінюється у відповідності до необхідної швидкості обертання двигуна. Для забезпечення стабільної роботи двигуна на різних швидкостях, підтримується постійне співвідношення між частотою та напругою.



Основним принципом роботи є те, що коли змінюється частота, повинна також змінюватися амплітуда напруги. Це дозволяє підтримувати постійну величину магнітного потоку в двигуні, що забезпечує стійку роботу на різних швидкостях, не викликаючи перевантажень або пошкоджень обмоток двигуна.

Формула для скалярного керування:

$$\frac{U}{f} = const, \quad (1.1)$$

де: U — напруга,
 f — частота.

Це означає, що зі збільшенням частоти подається пропорційно більша напруга, і навпаки.

Преваги скалярних перетворювачів:

- скалярні частотні перетворювачі є простими в конструкції і налаштуванні;

- оскільки вони не потребують складних датчиків або зворотного зв'язку, їх вартість значно нижча порівняно з векторними перетворювачами;

- скалярні перетворювачі не потребують складних алгоритмів для роботи, що робить їх зручними для широкого використання в стандартних застосуваннях.

Недоліки скалярних частотних перетворювачів:


- скалярне керування не дає такої точності в регулюванні моменту або швидкості, як векторне керування;

- при значних змінах навантаження на двигун (наприклад, при запуску або запуску при великому моменті) скалярні перетворювачі можуть показувати нижчу ефективність, оскільки не виконують точного керування моментом;

- оскільки немає прямого зворотного зв'язку, точне регулювання моменту неможливе.

Скалярні перетворювачі знаходять широке застосування в таких сферах, де вимоги до точності не є критичними, а важливі стабільність і простота в експлуатації це насосні станції, вентиляційні системи, конвеєрні системи, побутові прилади.

Частотні перетворювачі з відкритим контуром (Open-loop frequency converters) – це тип частотних перетворювачів, які здійснюють керування двигуном без використання зворотного зв'язку, тобто без вимірювання параметрів двигуна, таких як швидкість, момент або температура. У таких системах регулювання здійснюється на основі встановленої частоти та напруги, що подаються на двигун, без вимірювання реальних значень роботи двигуна в процесі [11].



В частотних перетворювачах з відкритим контуром регулювання швидкості обертання електродвигуна здійснюється на основі заданих параметрів частоти та напруги, що встановлюються вручну або через зовнішній контрольний пристрій. Основна ідея полягає в тому, щоб встановити певну частоту напруги на виході перетворювача та подати її на електродвигун, що дозволяє регулювати його швидкість.

Важливою особливістю є те, що ці системи не вимірюють фактичну швидкість чи момент двигуна в реальному часі, тому точність регулювання дещо нижча порівняно з системами з замкненим контуром (де використовується зворотний зв'язок).

Переваги частотних перетворювачів з відкритим контуром:

- вони мають просту схему та не вимагають складного обладнання для вимірювання параметрів двигуна;
- завдяки відсутності необхідності в складному зворотному зв'язку, такі перетворювачі мають меншу вартість;
- не потрібно виконувати складні налаштування для вимірювання швидкості чи моменту, що знижує складність експлуатації;
- завдяки простій конструкції та відсутності датчиків зворотного зв'язку, такі перетворювачі зазвичай вимагають меншого обслуговування.


Недоліки частотних перетворювачів з відкритим контуром:

- відсутність зворотного зв'язку обмежує можливість точного контролю моменту та швидкості обертання двигуна;
- якщо навантаження на двигун змінюється, це може призвести до зниження точності управління швидкістю;
- враховуючи, що регулювання не враховує реальні значення моменту та швидкості, частотні перетворювачі з відкритим контуром не підходять для високодинамічних систем, де точний контроль важливий;
- оскільки в цих системах відсутня реальна моніторингова система температури або інших параметрів, двигун може перегріватися за певних умов.

Частотні перетворювачі з відкритим контуром знаходять застосування в простих та недорогих системах, де точність і динаміка роботи не є критичними, або де зміни навантаження не є значними (конвеєрні лінії, вентиляційні системи, насосні станції, мала та середня промисловість).

Частотні перетворювачі з замкненим контуром (Closed-loop frequency converters) – це тип частотних перетворювачів, в яких для контролю роботи електродвигуна використовуються датчики зворотного зв'язку для вимірювання параметрів роботи двигуна, таких як швидкість обертання, момент, температура тощо. Це дозволяє здійснювати більш точне та динамічне керування двигуном, оскільки система постійно коригує свої налаштування в реальному часі, враховуючи зміни в навантаженні та зовнішні умови.

У системах з замкненим контуром використовуються датчики зворотного зв'язку, такі як тахометри для вимірювання швидкості



обертання або енкодери для точного вимірювання кутової позиції валу двигуна. Ці датчики надають системі інформацію про фактичний стан двигуна (швидкість, момент тощо), яку система використовує для корекції подачі напруги та частоти.

Основним завданням частотного перетворювача з замкненим контуром є підтримка заданих параметрів роботи двигуна (наприклад, швидкості або моменту), попри зміну навантаження або інших умов. В процесі роботи частотний перетворювач регулює напругу та частоту, враховуючи інформацію, отриману від датчиків зворотного зв'язку.

Переваги частотних перетворювачів з замкненим контуром:

- завдяки постійному зворотному зв'язку, система може підтримувати задану швидкість або момент з високою точністю, незважаючи на зміни навантаження;

- можливість точного контролю моменту та швидкості дозволяє використовувати такі перетворювачі в системах з високими вимогами до динаміки, таких як роботизовані комплекси або промислові маніпулятори;

- завдяки високій точності регулювання, перетворювачі з замкненим контуром зменшують енергоспоживання, що особливо важливо у важких умовах;

- система постійно коригує параметри двигуна в реальному часі, що дозволяє забезпечити стабільну роботу в умовах коливань навантаження.

Недоліки частотних перетворювачів з замкненим контуром:

- використання датчиків зворотного зв'язку та складних алгоритмів керування збільшує вартість частотних перетворювачів;


- необхідність налаштування і калібрування датчиків та алгоритмів управління робить ці системи складнішими в експлуатації і технічному обслуговуванні;

- наявність датчиків зворотного зв'язку вимагає регулярного технічного обслуговування, оскільки вони можуть вийти з ладу або вимагати калібрування;

- хоча система має високу точність, неправильне налаштування або поганий стан датчиків можуть призвести до неефективного використання енергії.

Частотні перетворювачі з замкненим контуром зазвичай застосовуються в системах, де необхідно забезпечити точний контроль швидкості, моменту або інших параметрів роботи двигуна (робототехніка, транспортні системи, автоматизація виробництва, енергетичні установки [12]).

Перетворювачі з повітряним охолодженням (Air-cooled frequency converters) – це тип частотних перетворювачів, у яких для зниження температури та підтримки оптимальних умов роботи використовується повітря як охолоджувальний агент. Вони є одним з найбільш поширених типів охолодження для частотних перетворювачів, оскільки є



економічними та простими у використанні, особливо в умовах невеликої або середньої потужності.

У перетворювачах з повітряним охолодженням тепловиділення, що виникає під час роботи перетворювача, усувається за допомогою циркуляції повітря через внутрішні компоненти. Для цього використовуються вентилятори, які створюють потік повітря, що відводить тепло від поверхні ключових елементів, таких як силові транзистори, діоди, фільтри та інші компоненти перетворювача. Тепле повітря викидається назовні, а свіже повітря надходить для охолодження внутрішніх частин [13].

Переваги перетворювачів з повітряним охолодженням:


- система охолодження є досить простою та не потребує додаткових складних технологій;
- охолодження повітрям є дешевшим, ніж охолодження рідиною, що робить ці пристрої доступнішими для широкого застосування;
- ефективний спосіб охолодження для пристроїв середньої та малої потужності, де вимоги до охолодження не є надто високими;
- система охолодження з вентилятором не вимагає регулярного технічного обслуговування, крім очищення фільтрів від пилу та інших забруднень.

Недоліки перетворювачів з повітряним охолодженням:

- вентилятори можуть створювати шум, що може бути незручним в умовах, де важлива тиша (наприклад, в житлових приміщеннях або офісах);
- повітряне охолодження зазвичай підходить для перетворювачів середньої та малої потужності. Для потужних перетворювачів потрібні більш ефективні способи охолодження, такі як рідинне охолодження;
- вентилятори можуть втягувати пил та інші частки з навколишнього середовища, що може знижувати ефективність охолодження і збільшувати потребу в обслуговуванні;
- залежність від температури навколишнього середовища, якщо навколишнє середовище дуже гаряче або вологе, це може значно погіршити ефективність охолодження.

Перетворювачі з повітряним охолодженням використовуються в багатьох сферах, де є потреба в економічному та ефективному регулюванні швидкості електродвигунів. Встановлюються в приміщеннях з контролю температури, де немає потреби в складних системах охолодження. Також для керування невеликими насосами, вентиляторами, компресорами та іншими механізмами. В перетворювачах використовуються для підтримки стабільної роботи електричних двигунів з мінімальними вимогами до теплових навантажень. Часто застосовуються для охолодження приводів вентиляторів та насосів.

Перетворювачі з рідинним охолодженням (Liquid-cooled frequency converters) – це тип частотних перетворювачів, де для відведення тепла



від компонентів перетворювача використовується рідина (зазвичай вода або спеціальні охолоджувальні рідини). Рідинне охолодження забезпечує високу ефективність відведення тепла, що робить ці перетворювачі ідеальними для використання в умовах високих потужностей та інтенсивних навантажень.

У перетворювачах з рідинним охолодженням тепло, що генерується компонентами пристрою (такими як силові транзистори, діоди, фільтри), відводиться за допомогою рідини, яка циркулює через спеціальні теплообмінники або канали. Рідина вбирає тепло та виводить його з перетворювача через систему трубопроводів або охолоджувальних пластин, після чого охолоджена рідина повертається до системи або викидається, залежно від конструкції.

Переваги перетворювачів з рідинним охолодженням:

- рідина має вищу теплопровідність порівняно з повітрям, що дозволяє ефективно відводити великі кількості тепла навіть за умов високих потужностей;

- завдяки високій ефективності рідинного охолодження можна створювати компактні перетворювачі для високих потужностей, що важко реалізувати за допомогою повітряного охолодження;

- відсутність вентиляторів або їх використання в мінімальних кількостях дозволяє знизити рівень шуму, що важливо в деяких виробничих умовах або в житлових приміщеннях;

- рідинне охолодження дозволяє забезпечити стабільну роботу системи навіть при високих навантаженнях, знижуючи ризик перегріву та збоїв в роботі.

Недоліки перетворювачів з рідинним охолодженням:

- системи з рідинним охолодженням потребують складніших та дорожчих конструкцій і матеріалів, включаючи теплообмінники, насосні системи, трубопроводи та інші елементи;


- рідинне охолодження потребує більше обслуговування, оскільки потрібно контролювати рівень охолоджувальної рідини, очищати системи від забруднень, уникати витоків рідини;

- охолоджувальні рідини можуть забруднюватися або викликати корозію металевих частин, що потребує регулярної заміни рідини або очищення системи;

- неправильно налаштовані або пошкоджені охолоджувальні системи можуть призвести до витоків рідини, що може пошкодити перетворювач або інші електронні компоненти.

Перетворювачі з рідинним охолодженням часто використовуються в промислових та енергетичних сферах, де є необхідність в управлінні великими електродвигунами або іншими потужними електричними установками.

Перетворювачі з рідинним охолодженням широко використовуються в умовах високих навантажень, таких як великі насосні станції, компресори, вентилятори, машини для обробки металу.



Встановлюються на електростанціях для керування високовольними електричними двигунами та турбінами. Застосовуються в морських судах, де є потреба в охолодженні великих електричних приводів, таких як дизельні генератори. Використовуються в автомобільних електричних системах, зокрема для електричних приводів і зарядних станцій. Перетворювачі з рідинним охолодженням можуть використовуватися для охолодження потужних комп'ютерних систем або серверних центрів [14].

Перетворювачі з низьким ступенем захисту (IP20–IP44) – це частотні перетворювачі, що мають низький рівень захисту від впливу зовнішніх факторів, таких як пил, волога та механічні пошкодження. Ступінь захисту визначається за стандартом IP (Ingress Protection) та є важливим критерієм при виборі обладнання для конкретних умов експлуатації.

Переваги перетворювачів з низьким ступенем захисту:

- перетворювачі з низьким ступенем захисту є дешевшими у виробництві та установці, оскільки не мають додаткових витрат на герметизацію та захист від пилу або води;

- вони легше в установці, не вимагають складних умов для розміщення в специфічних захищених приміщеннях, що робить їх універсальними для використання в чистих або добре вентиляованих приміщеннях;

- перетворювачі з низьким ступенем захисту, зазвичай, мають більш компактні корпуси та прості в обслуговуванні.

Недоліки перетворювачів з низьким ступенем захисту:


- вони не підходять для використання в умовах з високим рівнем забруднення (пил, бруд) або вологих середовищах, оскільки не мають достатнього захисту від пилу чи води;

- ці перетворювачі можна використовувати лише в чистих, сухих приміщеннях, таких як офіси, лабораторії, склади без вологи та агресивних речовин. Для зовнішніх умов чи виробничих приміщень з підвищеним рівнем пилу або вологи їх використання буде недоцільним;

- відсутність додаткових захисних оболонок або екранів робить такі перетворювачі більш чутливими до механічних пошкоджень від ударів, падінь чи інтенсивної вібрації.

Перетворювачі з низьким ступенем захисту часто використовуються в офісах для керування вентиляторами, кондиціонерами, насосами для обігріву або охолодження. У приміщеннях, де температурні та вологісні умови знаходяться під контролем (наприклад, серверні кімнати або лабораторії). Перетворювачі з IP20–IP44 можуть використовуватися для управління насосами, вентиляторами, конвеєрами та іншими пристроями в умовах з мінімальним забрудненням.

Перетворювачі з високим ступенем захисту (IP54–IP66) використовуються в умовах, де обладнання повинне бути захищене від впливу пилу, вологи та механічних пошкоджень. Ці перетворювачі застосовуються у важких промислових умовах, на відкритому повітрі або



в інших середовищах, де потрібен надійний захист від агресивних зовнішніх факторів [15].

Переваги перетворювачів з високим ступенем захисту:

- перетворювачі з високим ступенем захисту гарантують, що навіть в умовах інтенсивного забруднення, наприклад, в пилових або жарких умовах, обладнання буде працювати надійно;

- високий рівень захисту від води дозволяє використовувати ці перетворювачі в умовах зовнішнього середовища, де можливі сильні дощі, вологість або попадання води;

- міцний корпус перетворювачів з високим ступенем захисту добре витримує удари, падіння, вібрацію, а також захищає внутрішні компоненти від пошкоджень;

- ці перетворювачі забезпечують тривалу експлуатацію в складних умовах, що особливо важливо для промислових та енергетичних установок, де відмови обладнання можуть призвести до значних втрат;

- завдяки герметичним корпусам, частотні перетворювачі з високим ступенем захисту зменшують ризик корозії та пошкодження від вологи.

Недоліки перетворювачів з високим ступенем захисту:


- перетворювачі з високим ступенем захисту коштують дорожче, оскільки їх корпуси виготовляються з матеріалів, які можуть витримувати складні умови навколишнього середовища (наприклад, використання спеціальних ущільнень, герметичних елементів та покриттів);

- для забезпечення високого рівня захисту корпуси цих пристроїв можуть бути більшими за розмірами та важчими, що потребує більше місця для їх монтажу;

- для використання цих перетворювачів у зовнішніх умовах або в умовах з підвищеним рівнем забруднення потрібно враховувати спеціальні вимоги до встановлення та обслуговування обладнання.

Перетворювачі з високим ступенем захисту ідеально підходять для застосування на відкритому повітрі, у тому числі на будівельних майданчиках, вітрових електростанціях, об'єктах нафтогазової та хімічної промисловості. Використовуються в умовах з підвищеним рівнем забруднення або високою вологістю, таких як цементні заводи, металургійні підприємства, вугільні шахти, харчові виробництва. Можуть використовуватися для управління насосами, вентиляцією або іншими установками в умовах агропромислових об'єктів, де є ризик попадання пилу або води. Застосовуються в системах водопостачання та водовідведення, насосних станціях, на морських платформах, транспортних системах, де необхідна стійкість до атмосферних опадів і пилу. Високий ступінь захисту необхідний для використання в енергетичних установках, наприклад, на електростанціях, де присутні агресивні умови і великі навантаження.

Промислові частотні перетворювачі (часто з високим ступенем захисту, здатні працювати в складних умовах) використовуються в великих промислових системах для управління великими електричними



двигунами та іншими механізмами, що потребують точного та ефективного регулювання швидкості, моменту та потужності. Вони зазвичай застосовуються в системах, де необхідна висока надійність, стабільність роботи та можливість інтеграції в складні автоматизовані процеси.

Промислові частотні перетворювачі мають потужності від декількох кіловат до сотень мегаватів та використовуються для живлення електричних двигунів, що працюють на насосах, компресорах, вентиляторах, конвеєрах тощо.

Частотні перетворювачі для комерційних та побутових потреб часто використовуються для забезпечення енергоефективності в малих та середніх установках, таких як магазини, офіси, готелі, а також в побутових умовах для різних домашніх потреб. Вони призначені для управління електричними двигунами з меншими потужностями, ніж промислові перетворювачі, але мають подібні функції щодо економії енергії, зниження шуму та вібрацій. Використовуються для кондиціонування та вентиляції, басейнів та водопостачання, систем опалення.

Перетворювачі моноблочного виконання – це тип частотних перетворювачів, який характеризується компактною конструкцією, де всі основні елементи перетворювача (електроніка управління, силова частина, система охолодження) розташовані в єдиному корпусі. Така конструкція дозволяє спростити монтаж, зменшити необхідний простір для розміщення обладнання та знизити витрати на збирання та підключення.

Частотні перетворювачі класифікуються за різними ознаками, що дозволяє вибрати оптимальний варіант для конкретних умов експлуатації та вимог. Розуміння класифікації та принципів роботи частотних перетворювачів є ключовим для їх правильного вибору та ефективного застосування у різних галузях промисловості.

1.6 Високовольтні частотні перетворювачі

Високовольтні частотні перетворювачі (ЧП) є важливими компонентами в сучасних промислових системах, забезпечуючи ефективне управління електроприводами з високою напругою. Вони використовуються в багатьох галузях, таких як металургія, нафтогазова промисловість, хімічна промисловість, а також у системах водопостачання та водовідведення. Ці перетворювачі дозволяють регулювати швидкість та момент обертання електродвигунів, що сприяє підвищенню енергоефективності та зниженню експлуатаційних витрат [16].

Основна функція високовольтних частотних перетворювачів полягає в регулюванні частоти та амплітуди напруги, що подається на електродвигун. Це дозволяє змінювати швидкість обертання двигуна без зміни механічних характеристик приводу. Принцип роботи

високовольтного ЧП базується на перетворенні вхідної постійної або змінної високовольтної напруги в змінну напругу з регульованою частотою.

Типові схеми високовольтних перетворювачів частоти:

1. В двотрансформаторній схемі спочатку вхідна напруга 6-10 кВ знижується до 400-660 В за допомогою вхідного трансформатора. Потім, низьковольтний частотний перетворювач модулює напругу. Після цього модульована напруга знову підвищується до 6-10 кВ за допомогою вихідного трансформатора (рис. 1.14).

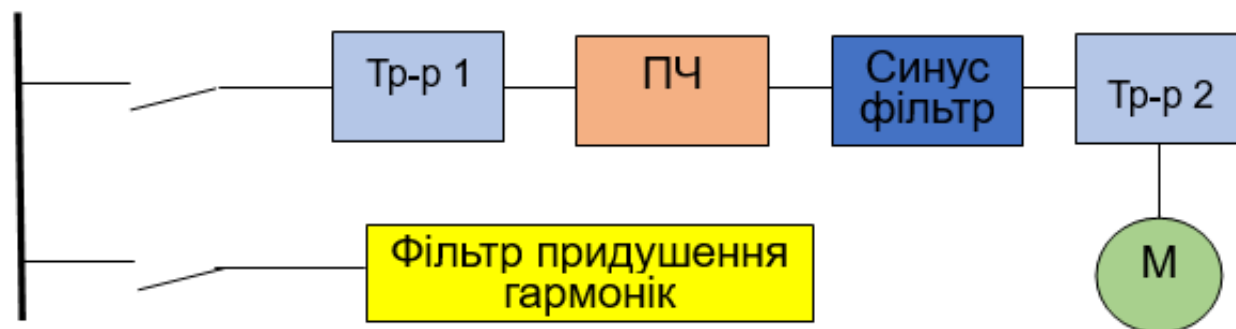


Рисунок 1.14 – Двотрансформаторна схема перетворювачів частоти

Хоча двотрансформаторні схеми високовольтних частотних перетворювачів мають порівняно низьку вартість, вони мають кілька важливих недоліків:

- пікові перенапруги на виході можуть досягати 1 кВ, що може призвести до поломки вихідного трансформатора. Для уникнення цього необхідно встановлювати дорогі синусоїдальні фільтри;
- обмежений діапазон регулювання швидкості від 0,5 до 1 номінальної швидкості обертання, що знижує гнучкість системи;
- зниження ККД електродвигуна при зменшенні частоти обертання, що може призвести до суттєвих енергетичних втрат;
- габарити та вага обладнання є значними, що ускладнює його розміщення та транспортування;
- низький коефіцієнт потужності через високу реактивну потужність, що потребує додаткової корекції за допомогою пристроїв компенсації реактивної потужності.

2. Тиристорні перетворювачі частоти зазвичай включають понижуючий трансформатор, який знижує трифазну напругу 6-10 кВ до декількох груп напруги 1-3 кВ. Потім ця напруга випрямляється діодами, а для зменшення гармонік використовуються схеми з 18 та 24 пульсами, що дозволяє значно покращити якість вихідної напруги (рис. 1.15).

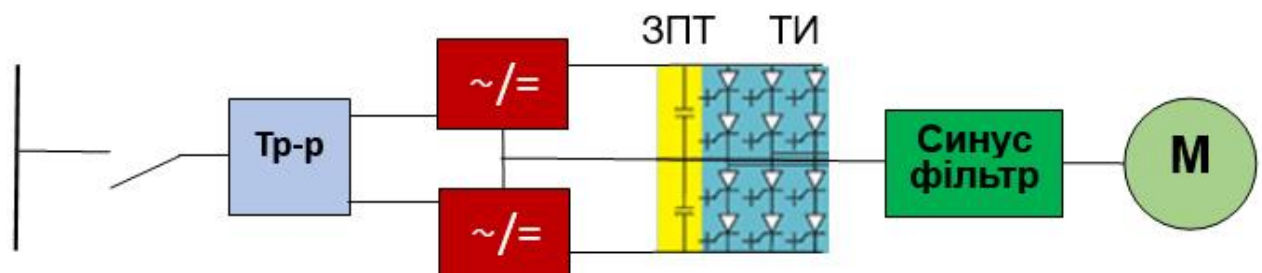


Рисунок 1.15 – Тиристорні перетворювачі частоти

Тиристорні перетворювачі частоти, незважаючи на свої переваги, мають ряд важливих недоліків. Одним з основних є висока реактивна потужність, яка вимагає компенсації, що додає складності в експлуатацію та додаткові витрати. Крім того, електронні ключі в таких перетворювачах вимагають точного узгодження через можливі розбіжності в параметрах напівпровідникових елементів, що ускладнює налаштування та збільшує вимоги до технічного обслуговування. Також, надійність тиристорних перетворювачів значною мірою залежить від якості тиристорів, які мають обмежену ремонтпридатність та потребують тривалого налаштування системи. Крім того, для досягнення стабільної роботи необхідна наявність синусоїдальних фільтрів, що також підвищує вартість.

Проте такі перетворювачі мають кілька важливих переваг. Вони відрізняються високим ККД, що може досягати 97%, що робить їх дуже ефективними. Окрім того, вони можуть працювати в широкому діапазоні частот, від 0 до 300 Гц, що дозволяє варіювати швидкість обертання двигунів відповідно до необхідних умов роботи. Також вони мають компактні розміри, що дозволяє зекономити простір при їх установці.

3. Високовольтні перетворювачі частоти на транзисторах IGB є найбільш сучасними серед промислових рішень. Вони складаються з сухого вхідного трансформатора та транзисторних інверторних осередків, що об'єднані в єдиний блок. Ці блоки постачаються як єдине збирання та не потребують додаткового монтажу. Принцип роботи цих перетворювачів подібний до тиристорних схем, але з використанням транзисторів IGBT замість тиристорів, що забезпечує кращу ефективність та контроль над процесами. (рис. 1.16)

Таким чином, високовольтні перетворювачі на IGBT-транзисторах забезпечують високу ефективність та компактність, що робить їх ідеальними для застосування в складних промислових умовах.

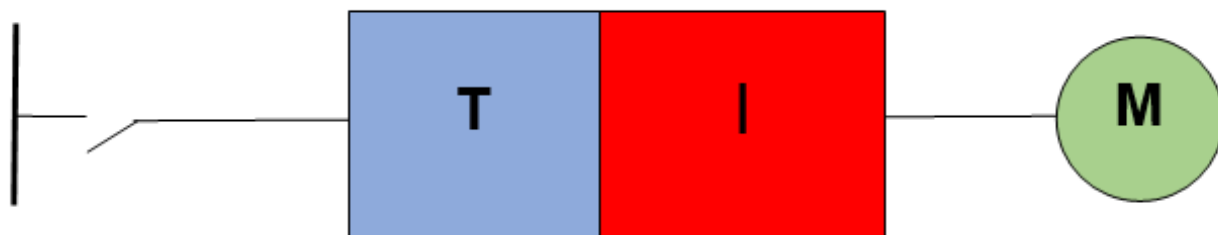


Рисунок 1.16 – Високовольтні перетворювачі частоти на транзисторах IGBT

Високовольтні перетворювачі на транзисторах IGBT мають ряд переваг, які роблять їх ефективними та надійними в промислових застосуваннях. Однією з ключових переваг є використання сучасних мікроконтролерів для управління транзисторами, що дозволяє значно підвищити точність та надійність управління. Це також забезпечує зниження габаритів перетворювачів, що робить їх більш компактними та зручними для встановлення в обмежених просторах.

Іншою важливою перевагою є низька кількість гармонік, що дозволяє зменшити потребу в додатковому захисному обладнанні. Завдяки цьому вихідна напруга має майже ідеальну синусоїду, що дозволяє виключити необхідність в синусоїдальних фільтрах та забезпечує можливість підключення будь-яких типів електродвигунів.

Ще однією значною перевагою є відсутність вихідного трансформатора та синус-фільтра, що дозволяє використовувати частотний перетворювач у векторному режимі з або без датчика зворотного зв'язку, що спрощує конструкцію та знижує вартість.

Крім того, ці перетворювачі мають широкий діапазон регулювання вихідної частоти (від 0 до 300 Гц), що дозволяє точно регулювати швидкість обертання двигунів для різних технологічних процесів.

Незважаючи на численні переваги, існує і один суттєвий недолік – не всі компанії мають достатній рівень технологічної бази для виготовлення таких перетворювачів.

Високовольтні частотні перетворювачі зазвичай використовуються для керування швидкістю високовольтних трифазних асинхронних та синхронних електродвигунів змінного струму. Їх потужність, за європейською класифікацією, коливається від 160 кВт до 12 МВт, і вони можуть працювати з напругою живлення від 3 кВ до 11 кВ.

Принцип роботи високовольтних перетворювачів схожий на принцип роботи низьковольтних перетворювачів. Для керування швидкістю обертання двигуна в широкому діапазоні частот, від 0 до номінальної, перетворювач створює на виході інвертора напругу з потрібною частотою. Інвертор складається з ряду однофазних

двохрівневих силових ланок, які живляться від силового трансформатора. Ця напруга відрізняється від частоти мережі живлення та відповідає необхідній частоті обертання двигуна.

Сучасні високовольтні перетворювачі не тільки сприяють енергоефективному управлінню технологічними процесами, але й допомагають продовжити термін служби двигунів та інших компонентів системи завдяки плавному запуску та оптимізації режимів роботи. Це дозволяє знизити витрати на технічне обслуговування та підвищити надійність усієї технологічної лінії (рис. 1.18).



Рисунок 1.18 – Частотний перетворювач

Завдяки простоті конструкції та зрозумілості високовольтних частотних перетворювачів, а також однаковості інверторних силових ланок, кількість необхідних запасних частин значно зменшується. Це дозволяє суттєво знизити витрати на навчання обслуговуючого персоналу і скоротити час, необхідний для технічного обслуговування обладнання.

Високовольтні частотні перетворювачі знайшли широке застосування в різних галузях промисловості, таких як теплоенергетика,


металургія, водопостачання, гірничодобувна, нафтогазова та цементна промисловості. Зокрема, їх використовують для керування витяжними вентиляторами в котлах ТЕЦ, доменними повітродувками, насосними станціями, вентиляторами в гірничих підприємствах, газовими компресорами, нафтовими насосами та в багатьох інших областях.

Сучасні високовольтні частотні перетворювачі, особливо їхні інверторні силові ланки, побудовані на високоякісних IGBT транзисторах (рис.1.19), що забезпечують надійність та стабільність у роботі з електродвигунами змінного струму. Це дозволяє забезпечити майже ідеальну синусоїдальну форму напруги, що значно знижує гармоніки в споживаному струмі. Ефективність випрямляючих пристроїв з багатопульсними схемами зі зсувом фаз дозволяє ефективно зменшувати шкідливі гармоніки в мережі.

Таким чином, високовольтні частотні перетворювачі не тільки підвищують енергоефективність, але й продовжують термін служби всіх компонентів системи, оптимізуючи роботу в різних галузях промисловості.



Рисунок 1.19 – Частотний перетворювач на IGBT транзисторах.



Високовольтні частотні перетворювачі надають широкий набір функціональних можливостей, що може варіюватися в залежності від виробника. Завдяки цим функціям можна ефективно регулювати швидкість обертання електродвигуна навіть при нестабільному живленні. Перетворювачі здатні підхоплювати працюючий двигун, забезпечувати швидке гальмування з використанням гальмівних резисторів, а також виконувати ряд інших операцій, що підвищують ефективність і безпеку роботи.

Ці функції дозволяють також здійснювати моніторинг роботи системи. Для цього вбудовані пульти управління можуть бути встановлені безпосередньо на шафах частотних перетворювачів або можуть бути інтегровані через мережеві протоколи, такі як Modbus, Profibus, Ethernet IP та інші, що забезпечує зручний доступ до параметрів роботи в реальному часі та дозволяє здійснювати віддалене управління та діагностику.

Це дає змогу здійснювати налаштування і контролювати роботу двигунів на різних етапах їх експлуатації, підвищуючи їхню ефективність і знижуючи ризики поломок

1.7 Переваги використання частотних перетворювачів


Частотні перетворювачі (ЧП) надають численні переваги в різних галузях застосування, від промислових підприємств до комерційних та побутових потреб. Нижче наведені основні переваги використання частотних перетворювачів [17].

Однією з головних переваг використання частотних перетворювачів є значне зниження енергоспоживання. ЧП дозволяють регулювати швидкість обертання електродвигуна відповідно до фактичних потреб, що дозволяє уникати надмірного споживання енергії. Зокрема, це важливо для таких застосувань, як насоси та вентилятори, де навантаження може суттєво змінюватись протягом дня.

Частотні перетворювачі забезпечують плавний пуск та зупинку електродвигуна, що дозволяє уникати різких механічних навантажень на обладнання та зменшує зношення механічних частин. Це також знижує ризик пошкоджень та продовжує термін служби обладнання.

Частотні перетворювачі дозволяють точно керувати швидкістю та моментом обертання електродвигунів, що дає змогу оптимізувати процеси виробництва та підвищити загальну продуктивність. Завдяки точному контролю можна досягти кращої якості продукції та зменшити кількість дефектів.

Використання частотних перетворювачів дозволяє знизити експлуатаційні витрати завдяки зменшенню енергоспоживання, зменшенню витрат на обслуговування та продовженню терміну служби обладнання. Крім того, частотні перетворювачі можуть знизити витрати на встановлення додаткових систем захисту та автоматизації.



Частотні перетворювачі надають можливість інтеграції в автоматизовані системи керування виробничими процесами. Вони підтримують різні протоколи зв'язку та можуть бути підключені до системи керування через мережі, що дозволяє здійснювати дистанційний контроль та моніторинг роботи обладнання.

Частотні перетворювачі забезпечують захист електродвигунів та іншого обладнання від різних аномалій, таких як перенапруги, перевантаження, короткі замикання тощо. Це знижує ризик аварій та виходу з ладу обладнання.

ЧП дозволяють знизити рівень шуму та вібрацій за рахунок оптимального регулювання швидкості роботи електродвигунів. Це особливо важливо в таких сферах, як вентиляційні системи, кондиціонування повітря, а також в умовах, де потрібен низький рівень шуму (наприклад, в офісах або лікарнях).

Частотні перетворювачі можуть використовуватися в широкому діапазоні застосувань, від малих побутових пристроїв до великих промислових установок. Вони забезпечують універсальність та можливість адаптації до різних умов експлуатації.

1.8 Сучасні тенденції та інновації в галузі частотних перетворювачів


Частотні перетворювачі (ЧП) продовжують удосконалюватися завдяки постійним інноваціям та технологічним досягненням. У цьому розділі розглянемо сучасні тенденції та нововведення, які впливають на розвиток та застосування частотних перетворювачів.

Інтеграція частотних перетворювачів з Інтернетом речей є однією з найважливіших сучасних тенденцій у галузі автоматизації та керування електроприводами. Частотні перетворювачі отримують можливість взаємодіяти з іншими пристроями, збирати та аналізувати дані в реальному часі, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності та надійності промислових систем.

Віддалений моніторинг та керування Інтеграція з дозволяє здійснювати віддалений моніторинг та керування частотними перетворювачами через інтернет. Це дозволяє операторам контролювати роботу обладнання з будь-якої точки світу, що знижує витрати на обслуговування і дозволяє швидко реагувати на можливі проблеми.

Частотні перетворювачі, можуть збирати велику кількість даних про свою роботу та стан обладнання. Ці дані можуть бути використані для аналізу ефективності, виявлення аномалій та прогнозування можливих несправностей. Використання аналітичних інструментів на основі зібраних даних дозволяє оптимізувати роботу системи та підвищити її продуктивність.

Частотні перетворювачі можуть працювати більш ефективно, оптимізуючи споживання електроенергії відповідно до реальних потреб системи. Це дозволяє знизити енергоспоживання та зменшити



експлуатаційні витрати. Крім того, інтеграція з інтернетом дозволяє автоматично регулювати роботу двигунів, щоб досягти максимальної продуктивності при мінімальних витратах енергії.

Інтеграція з інтернетом забезпечує вищий рівень надійності та безпеки завдяки можливості виявлення потенційних проблем на ранніх стадіях. Вбудовані системи діагностики можуть автоматично повідомляти операторів про несправності, що дозволяє уникнути аварій та зупинок виробництва. Крім того, віддалений доступ до частотних перетворювачів дозволяє проводити профілактичне обслуговування та усувати несправності без необхідності фізичної присутності на об'єкті.

Частотні перетворювачі, підключені до інтернету, можуть легко інтегруватися з іншими системами автоматизації на підприємстві. Це дозволяє створити єдину платформу для керування всіма процесами, що підвищує ефективність та зручність управління [8]. Також це забезпечує кращу взаємодію між різними компонентами системи та дозволяє досягти більшої синергії у роботі.

З підключенням до інтернету виникають нові виклики, пов'язані з безпекою даних. Частотні перетворювачі, як і інші пристрої, підключені до мережі, можуть бути вразливими до кібератак. Тому важливо впроваджувати надійні заходи захисту для забезпечення безпеки даних та захисту від несанкціонованого доступу.


Інтелектуальні системи керування частотними перетворювачами (ЧП) є однією з ключових інновацій у галузі автоматизації та управління електроприводами. Ці системи дозволяють значно підвищити ефективність роботи обладнання, знизити енергоспоживання та забезпечити високий рівень надійності та безпеки.

Автоматичне налаштування параметрів Інтелектуальні системи керування здатні автоматично налаштовувати параметри роботи частотних перетворювачів в залежності від поточних умов експлуатації. Це дозволяє оптимізувати роботу обладнання та забезпечити його максимальну ефективність.

Завдяки використанню алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту, інтелектуальні системи керування можуть адаптувати свою роботу в режимі реального часу. Вони здатні враховувати змінні фактори, такі як навантаження, температура, стан обладнання, та автоматично коригувати параметри роботи.

Інтелектуальні системи керування можуть аналізувати дані про роботу частотних перетворювачів та передбачати можливі несправності. Це дозволяє проводити профілактичне обслуговування та уникати непланових зупинок виробництва.

Інтелектуальні частотні перетворювачі обладнані вбудованими засобами діагностики, які дозволяють виявляти та усувати несправності на ранніх стадіях. Це забезпечує високу надійність та безпеку роботи обладнання.



Інтелектуальні системи керування легко інтегруються з іншими системами автоматизації, такими як системи SCADA, MES, ERP. Це дозволяє створити єдину платформу для управління всіма процесами на підприємстві, що підвищує ефективність та зручність керування.

Інтелектуальні системи керування дозволяють оптимізувати роботу частотних перетворювачів, що забезпечує підвищення ефективності та зниження енергоспоживання. Це особливо важливо в умовах високих енергетичних витрат та необхідності економії ресурсів.

Завдяки автоматичному налаштуванню параметрів, адаптивному управлінню та прогнозуванню несправностей, інтелектуальні системи керування дозволяють знизити витрати на обслуговування та ремонт обладнання. Це забезпечує значну економію коштів для підприємства.

Інтелектуальні системи керування забезпечують високу надійність та безпеку роботи частотних перетворювачів завдяки вбудованим засобам діагностики та прогнозування несправностей. Це дозволяє уникати аварійних ситуацій та забезпечує безперервність виробничих процесів.


Інтелектуальні системи керування вимагають значних інвестицій на етапі впровадження, що може бути перешкодою для деяких підприємств. Однак у довгостроковій перспективі ці витрати можуть окупитися завдяки підвищенню ефективності та зниженню експлуатаційних витрат.

Енергоефективність є однією з ключових тенденцій у розвитку частотних перетворювачів. Виробники впроваджують нові алгоритми керування та покращені компоненти, що дозволяють значно знижувати енергоспоживання. Частотні перетворювачі допомагають уникати втрат енергії за рахунок точного регулювання швидкості обертання двигунів відповідно до навантаження. Це особливо важливо для таких застосувань, як насоси та вентилятори, де навантаження може змінюватися протягом дня.

Значна увага приділяється мініатюризації та підвищенню компактності частотних перетворювачів. Сучасні моделі стають все більш компактними завдяки використанню новітніх матеріалів та технологій, що дозволяє їх застосовувати у вузьких просторах та забезпечувати більшу гнучкість у встановленні. Компактні перетворювачі зберігають усі функціональні можливості великих моделей, що робить їх ідеальними для застосувань, де простір є обмеженим.

Сучасні частотні перетворювачі забезпечують розширені можливості керування, включаючи векторне керування, керування моментом та інші вдосконалені методи. Векторне керування дозволяє точно регулювати швидкість та момент обертання двигунів, що особливо важливо для високоточних застосувань, таких як виробництво напівпровідників та обробка матеріалів. Такі можливості дозволяють досягати більшої продуктивності та точності в роботі обладнання.

Інновації в галузі частотних перетворювачів також стосуються покращення засобів захисту. Сучасні частотні перетворювачі оснащені



вдосконаленими системами захисту від перенапруг, перевантажень, коротких замикань та інших аномалій. Це забезпечує підвищену надійність та безпеку роботи обладнання, що є важливим для критично важливих систем і промислових установок.

Екологічні аспекти відіграють все більшу роль у розробці частотних перетворювачів. Виробники активно працюють над зниженням впливу на довкілля, використовуючи екологічно чисті матеріали та розробляючи енергоефективні рішення. Це включає використання матеріалів, які підлягають вторинній переробці, а також впровадження технологій, що знижують викиди вуглекислого газу.

1.9 Виклики та перспективи впровадження частотних перетворювачів

Виклики впровадження частотних перетворювачів:

1) встановлення частотних перетворювачів вимагає значних початкових інвестицій, особливо для великих промислових систем; це включає вартість самого обладнання, встановлення, налаштування та інтеграції з існуючими системами; крім того, необхідні витрати на навчання персоналу та можливу модернізацію суміжних систем;

2) інтеграція частотних перетворювачів з існуючими промисловими системами може бути складною; це включає не тільки технічні аспекти налаштування та встановлення, але й узгодження роботи з іншими компонентами системи, такими як датчики, контролери та системи керування;


3) частотні перетворювачі повинні відповідати високим стандартам надійності та безпеки, особливо в критичних промислових процесах; це вимагає ретельного вибору обладнання, постійного моніторингу його стану та забезпечення захисту від перевантажень, коротких замикань та інших несправностей;

4) з підключенням частотних перетворювачів до мережевих систем зростає ризик кібератак; забезпечення кібербезпеки включає захист від несанкціонованого доступу, захист даних та постійне оновлення систем безпеки; це додає додаткові витрати та вимоги до кваліфікації персоналу;

5) використання частотних перетворювачів може впливати на якість електроенергії в мережі, створюючи гармонійні викривлення та інші небажані ефекти; це вимагає додаткових заходів щодо фільтрації та корекції електричних параметрів мережі.

Перспективи впровадження частотних перетворювачів:

1) частотні перетворювачі дозволяють значно підвищити енергоефективність промислових систем завдяки регулюванню швидкості обертання двигунів відповідно до реальних потреб процесу; це дозволяє знизити споживання електроенергії та зменшити витрати на експлуатацію;



2) завдяки оптимізації роботи обладнання та зниженню енерговитрат, частотні перетворювачі сприяють зниженню експлуатаційних витрат; крім того, знижується знос обладнання, що продовжує термін його служби та зменшує витрати на ремонт та обслуговування;

3) регулювання швидкості двигунів за допомогою частотних перетворювачів дозволяє забезпечити точне управління технологічними процесами, що підвищує продуктивність та якість продукції; це особливо важливо в високотехнологічних галузях, де точність та стабільність процесів є критичними;

4) частотні перетворювачі забезпечують високу гнучкість у налаштуванні та управлінні промисловими процесами; це дозволяє швидко адаптуватися до змінних умов виробництва, змінювати параметри роботи систем без зупинки процесів, що підвищує конкурентоспроможність підприємства;

5) частотні перетворювачі легко інтегруються з сучасними системами автоматизації та управління, такими як системи SCADA, MES, ERP; це дозволяє створити єдину платформу для управління всіма аспектами виробництва, підвищуючи ефективність та зручність керування;

6) зниження енергоспоживання та оптимізація роботи обладнання сприяє зменшенню викидів парникових газів та інших шкідливих речовин в атмосферу; це дозволяє підприємствам відповідати екологічним стандартам та сприяє сталому розвитку.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

В таблиці 1.1 представлені характеристики насосних агрегатів насосної станції мартенівського цеху.

2.1 Розрахунок і вибір елементів системи керування перетворювача частоти

На рисунку 2.1 представлена силова схема перетворювача частоти для керування асинхронним електродвигуном з коротко замкнутим ротором проєктуємого електроприводу.

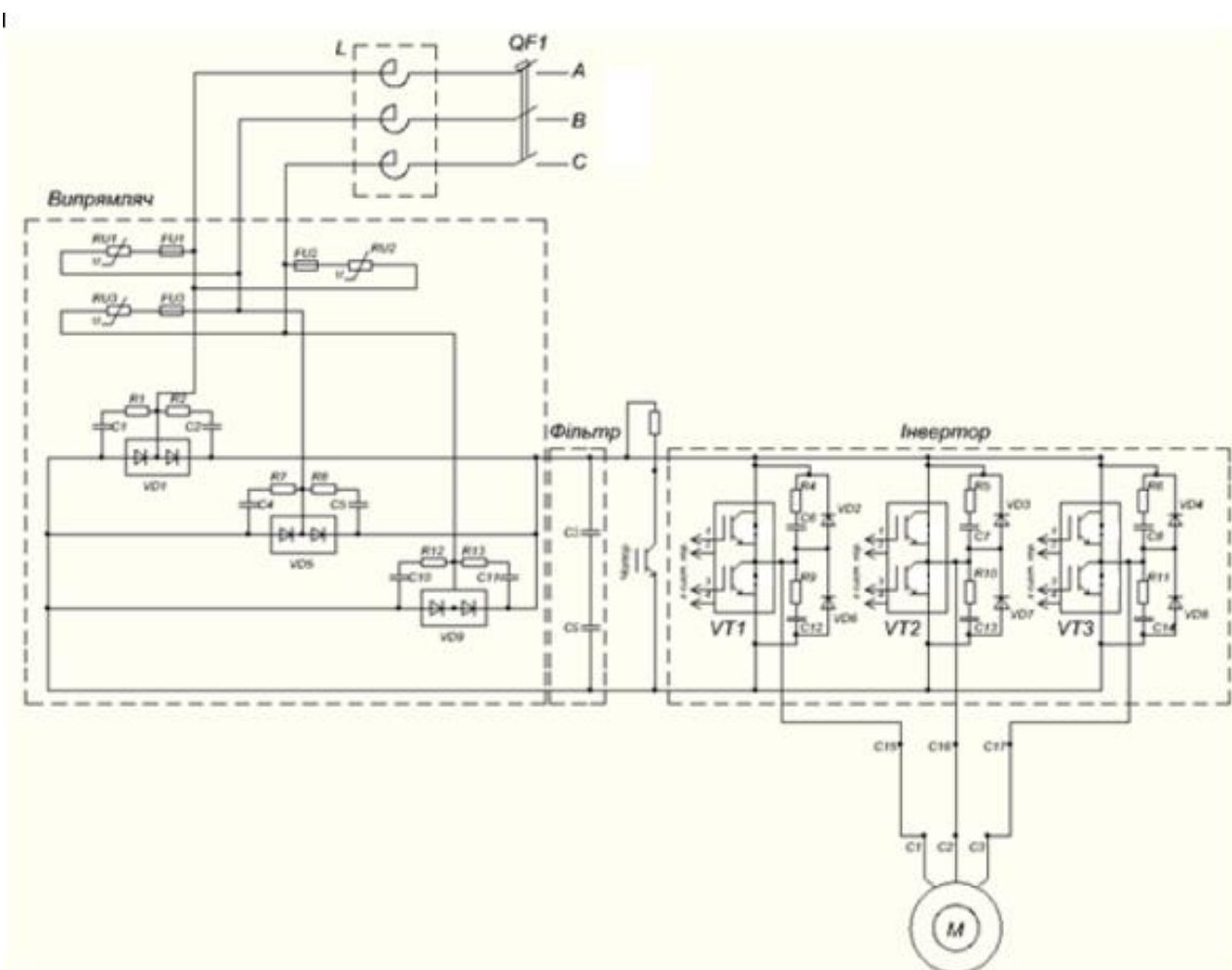


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема

2.1.1 Розрахунок номінальних параметрів випрямляча

Визначаємо номінальну напругу випрямляча в В:

$$U_{\text{випр}} = 2,34 \cdot U_{\text{ф.ном}} \quad (2.1)$$

де $U_{\text{ф.ном}}$ – фазна напруга.

$$U_{\text{випр}} = 2,34 \cdot 380 = 889,2 \text{ В}$$

Визначаємо необхідний випрямлений струм в А:

$$I_{\text{в.ном}} = \frac{P_{\text{розр}}}{\eta_{\text{дв}} \cdot \cos \varphi_{\text{дв}} \cdot U_{\text{дн}}} \quad (2.2)$$

де $P_{\text{розр}}$ – механічна потужність приводу;
 $\eta_{\text{дв}}$ – ККД двигуна;
 $\cos \varphi_{\text{дв}}$ – коефіцієнт потужності двигуна.

$$I_{\text{в.ном}} = \frac{200 \cdot 10^3}{0,956 \cdot 0,89 \cdot 380} = 618,58 \text{ А.}$$

Визначаємо номінальний лінійний струм в А, який споживає випрямляч

$$I_{\text{л.ном}} = I_{\text{в.ном}} \cdot 0,817 \cdot 1,05 \quad (2.3)$$

$$I_{\text{л.ном}} = 618,58 \cdot 0,817 \cdot 1,05 = 530,65 \text{ А.}$$

2.1.2 Розрахунок і вибір струмообмежуючого реактора

Струмообмежувальні реактори підключаються до ланцюга змінного струму перетворювача для обмеження струму короткого замикання під час аварій та зменшення впливу комутації на живильну мережу. Розрахунок реактора здійснюється з метою обмеження струмів короткого замикання до безпечного рівня для вентиля протягом часу спрацьовування захисних пристроїв. Індуктивність реактора вибирається такою, щоб падіння напруги на його затискачах при номінальному струмі становило приблизно 5% від номінальної напруги.

Визначаємо індуктивний опір фази реактора в Ом:

$$X_L = \frac{0,05 \cdot U_{\text{ф.ном}}}{I_{\text{л.ном}}}, \quad (2.4)$$

де

$$U_{\text{ф.ном}} = \frac{U_{\text{л.ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220$$

$$X_L = \frac{0,05 \cdot 220}{530,65} = 0,02 \text{ Ом}$$

Визначаємо індуктивність реактора в Гн:


$$L_r = \frac{X_L}{\omega}, \quad (2.5)$$

де

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_M, \quad (2.6)$$

f_M – частота живлячої мережі, $f_M = 50$ Гц

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ Гц}$$

$$L_r = \frac{0,02}{314} = 0,0000634 \text{ Гц.}$$

При виборі реактора повинні виконуватися умови:

$$U_p, \text{ В} > U_{\text{ф.ном}}, \text{ В}$$

$$I_p, \text{ А} > I_{\text{п.ном}}, \text{ А}$$

$$L_p, \text{ Гн} > L_r, \text{ Гн}$$

По розрахункових даним вибираю реактор з наступними характеристиками: $U_{\text{ном.р}} = 410$ В; $I_{\text{ф.ном.р.}} = 660$ А; $L_{\text{г.ном.р.}} = 0,0064$ Гн; $R_{\text{ном.р.}} = 2,1$ мОм.

2.1.3 Розрахунок і вибір силових елементів тиристорно-діодного модуля випрямляча

Попередній вибір тиристорно-діодного модуля виконується по двом параметрам:

- 1) $I_{\text{серр}}$ – середній робочий розрахунковий струм вентеля;
- 2) $U_{\text{зврї}}$ – зворотня розрахункова імпульсна напруга, що повторюється на вентелі.

2.1.3.1 Розрахунок струму вентеля

Визначаємо середній струм вентиля для трифазної мостової схеми в А:

$$I_{\text{с.в.}} = \frac{I_{\text{в.ном}}}{3}, \quad (2.7)$$

$$I_{\text{с.в.}} = \frac{618,58}{3} = 206,19 \text{ А.}$$

Визначаємо середній робочий струм модуля з урахуванням системи охолодження в А:

$$I_{\text{сер.р.}} = \frac{I_{\text{сп}}}{K_{\text{зап}}}, \quad (2.8)$$

де $K_{\text{зап}}$ – коефіцієнт запасу, який враховує умови охолодження модуля;

$K_{\text{зап}} = 0,5$ – охолодження штучно повітряне.

$$I_{\text{сер.р.}} = \frac{206,18}{0,5} = 412,39 \text{ А.}$$

2.1.3.2 Розрахунок напруги вентелів модуля

Визначаємо розрахункову зворотну напругу вентиля в В:

$$U_{\text{звр}} = U_{\text{bmax}} \cdot K_{\text{кп}} \cdot K_{\text{з}}, \quad (2.9)$$

де $K_{\text{кп}}$ - коефіцієнт, який враховує комутаційні перенапруження.

$K_{\text{кп}} = 1,4$

$K_{\text{з}}$ – коефіцієнт запасу. $K_{\text{з}} = 1,1$

U_{bmax} – розрахункова зворотна напруга в В:

$$U_{\text{bmax}} = \sqrt{6} \cdot U_{\text{ф.ном}} \cdot 1,15, \quad (2.10)$$

де 1,15 – коефіцієнт, який враховує комутаційні перенапруження

$$U_{\text{bmax}} = \sqrt{6} \cdot 220 \cdot 1,15 = 619,72 \text{ В}$$

$$U_{\text{звр}} = 619,72 \cdot 1,4 \cdot 1,1 = 954,37 \text{ В.}$$

Визначаємо зворотно імпульсну напругу вентиля в В, яка повторюється:

$$U_{\text{зврi}} = \frac{U_{\text{звр}}}{K_{\text{р}}}, \quad (2.10)$$

де $K_{\text{р}} = 0,75$ - співвідношення між робочою та імпульсною допустимою напругою, що повторюється на вентелі.

$$U_{\text{зврi}} = \frac{954,37}{0,75} = 1272,49 \text{ В.}$$

При виборі модуля повинні виконуватись умови:

$$\begin{aligned} U_{\text{зврi}}, \text{ В} &< U_{\text{звiмод}}, \text{ В} \\ I_{\text{серр}}, \text{ А} &< I_{\text{мод}}, \text{ А} \end{aligned}$$

У відповідності з розрахунковими даними вибираю тиристорно-діодний модуль.

Характеристики вибраного модуля:

- 1) $I_{F(AV)}$ - максимально допустимий середній прямий струм. $I_{F(AV)}=800$ А;
 - 2) U_{DRM} - імпульсна напруга, що повторюється. $U_{DRM}=1600$ В;
 - 3) U_0 – порогова напруга вольт-амперної характеристики. $U_0=1,05$ В;
 - 4) R_d – динамічний опір вольт-амперної характеристики. $R_d=0,00017$ Ом;
 - 5) $I_{уд.д}$ – ударний струм діода. $I_{уд.д}=23$ кА;
 - 6) $T_{стр.доп}$ – максимально допустима температура напівпровідникової структури. $T_{стр.доп}=130$ °С;
 - 7) $R_{теп}$ – тепловий опір напівпровідниковий перехід – середа.
 - 8) $R_{теп}=0,042$ °С/Вт;
 - 9) $i^2 \cdot t$ – інтеграл плавлення напівпровідникової структури вентеля. $i^2 \cdot t=2645$ кА²·с;
 - 10) Q_r – заряд зворотнього відновлення вентеля модуля. $Q_r=175$ мкКл;
 - 11) t_{rr} – час відновлення вентеля модуля. $t_{rr} = 10$ мкс.
- Виконуємо перевірку вибраного модуля по тепловому режиму.
Визначаємо витрати у вентилі в Вт:

$$P_B = U_0 \cdot I_{серр} \cdot \left(1 + K_{\phi}^2 \cdot I_{серр} \frac{R_d}{U_0}\right), \quad (2.12)$$

K_{ϕ} – коефіцієнт форми анодного струму вентеля, $K_{\phi}=1,57$.
 $I_{серр}$ – середній струм вентеля

$$P_B = 1,05 \cdot 412,39 \cdot \left(1 + 1,57^2 \cdot 412,39 \cdot \frac{0,00017}{1,05}\right) = 504,27 \text{ Вт.}$$

Визначаємо температуру напівпровідникової структури модуля в стаціонарному режимі у °С:

$$T_{стр} = T_{дов} + R_{теп} \cdot P_B, \quad (2.13)$$

де $T_{дов}$ – температура довколишнього середовища, $T_{дов}=40$ °С.

$$T_{стр} = 40 + 0,042 \cdot 504,27 = 61,18 \text{ °С.}$$

Для забезпечення нормальної роботи діода повинна виконуватися умова:

$$T_{стр} \text{ °С} < T_{стр доп} \text{ °С,}$$

$$61,18\text{ }^{\circ}\text{C} < 130\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Температура напівпровідникової структури має бути менше допустимої, що приймається.

Виконуємо перевірку вибраного діода за захисним показником.

Перевірка проводиться для найбільш важкого режиму внутрішнього короткого замикання, що виникає при пробі вентиля у момент закінчення комутації. При цьому не повинно відбуватися пошкодження модуля.

Визначаємо повний опір контура короткого замикання в Ом :

$$Z_a = 2 \cdot \sqrt{R_r^2 + X_L^2}, \quad (2.14)$$

де R_r – активний опір обмотки реактора. $R_r=0,0081\text{ Ом}$;

X_L – індуктивний опір обмотки реактора в Ом.

$$X_L = L_r \cdot \omega, \quad (2.15)$$

де

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_m, \quad (2.16)$$

f_m – частота живлячої мережі, $f_m = 50\text{ Гц}$

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314\text{ Гц}$$

$$X_L = 0,00064 \cdot 314 = 0,201\text{ Ом}$$

$$Z_a = 2 \cdot \sqrt{0,0081^2 + 0,201^2} = 0,402\text{ Ом}.$$

Визначаємо базисний струм короткого замикання в А:

$$I_{\zeta} = \frac{U_{\phi.\text{ном}}}{Z_a}, \quad (2.17)$$

$$I_{\zeta} = \frac{220}{0,402} = 547,26\text{ А}$$

Виходячи з величини відношення $\frac{R_a}{X_a} = \frac{0,0081}{0,402} = 0,02$ по графіку (рис. 2.2) визначаємо $K_{уд}$.

$$K_{уд}=1,7$$

Визначаємо ударний струм короткого замикання в А:

$$I_{уд,max} = K_{уд} \cdot I_{\zeta}, \quad (2.18)$$

$$I_{уд,max} = 1,7 \cdot 547,26 = 930,34 \text{ А.}$$

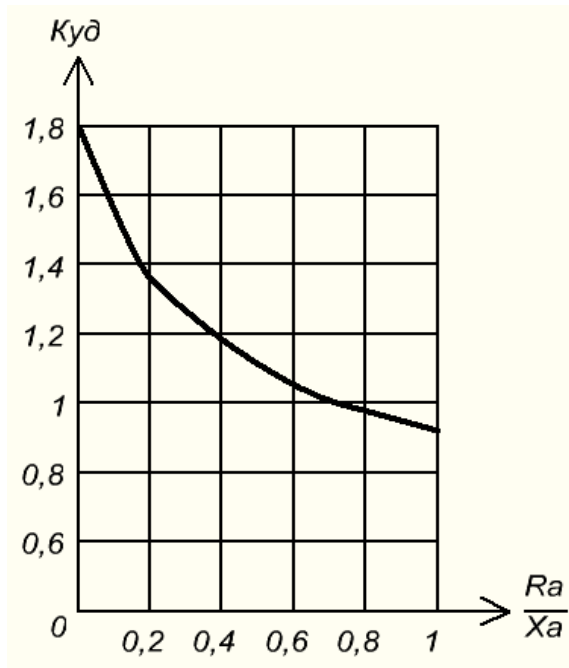


Рисунок 2.2 – Графік залежності $K_{уд}$, від $\frac{R_a}{X_a}$

Виходячи з величини відношення $\frac{R_a}{X_a}$ по графіку (рисунок 2.3) визначаємо $(i^2 \cdot t) \cdot 10^{-3} = 19 \cdot 10^{-3}$.

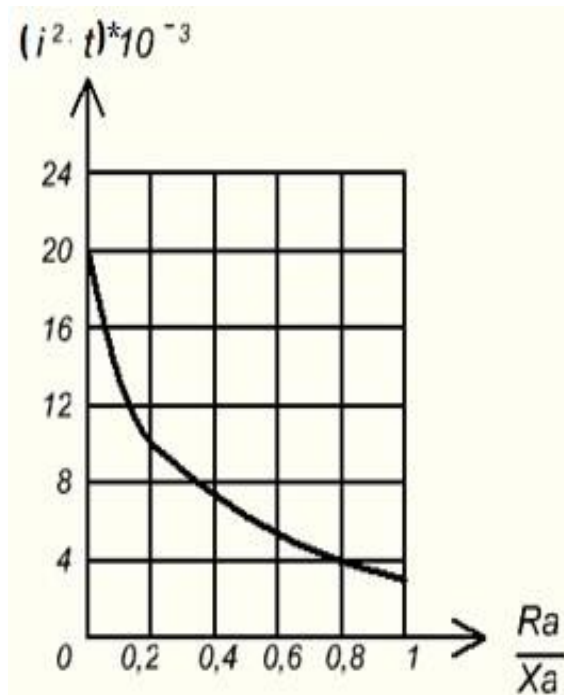


Рисунок 2.3 – Графік залежності $(i^2 \cdot t) \cdot 10^{-3}$ від $\frac{R_a}{X_a}$

Визначаємо максимальний тепловий еквівалент струму короткого замикання в A^2c :

$$\begin{aligned} (i^2 \cdot t)_{max} &= I_0^2 \cdot (i^2 \cdot t) \cdot 10^{-3}, \\ (i^2 \cdot t)_{max} &= 930,34^2 \cdot 19 \cdot 10^{-3} = 16455,2 A^2c. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Повинні виконуватись умови:

$$\begin{aligned} I_{уд.мод}, A &> I_{уд.мах}, A, \\ 23000, A &> 930.34, A. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (i^2 \cdot t)_{мод}, A^2c &> (i^2 \cdot t)_{мах}, A^2c. \\ 2645000, A^2c &> 35542, A^2c. \end{aligned}$$

Враховуючи температуру напівпровідникової структури обраний модуль проходить за захисним показником, так як умови виконуються.

2.1.3 Розрахунок і вибір елементів RC – ланцюга

При роботі вентиляного перетворювача, через наявність індуктивних ланцюгів з високою швидкістю зміни струмів, виникають викиди напруги, які значно перевищують номінальну напругу мережі (комутаційні перенапруження). Це може призвести до виходу з ладу силових вентилів. Крім того, на вентиляний перетворювач живлячого ланцюга змінного струму з боку мережі також впливають перенапруження, викликані відключенням потужних індуктивних навантажень (живлячих реакторів) і перенапруження, викликані атмосферними явищами (грозові розряди).

Для обмеження комутаційних перенапружень використовуються захисні RC-ланцюги, які підключаються паралельно вентилям. Для захисту з боку мережі застосовуються варистори, підключені паралельно фазам силових ланцюгів змінного струму.

Визначаємо індуктивність комутаційного контуру в Гн:

$$L_K = 2 \cdot L_{r.ном}, \quad (2.20)$$

де $L_{r.ном}$ – номінальна індукція реактору,

$$L_K = 2 \cdot 0,0064 = 0,0128 \text{ Гн.}$$

Визначаємо амплітуду зворотного струму в А:

$$I_{звор.мах} = \frac{Q_r}{t_{rr}}, \quad (2.21)$$

де Q_r – величина накопиченого заряду. $Q_r=175 \text{ мкКл}$

t_{rr} – час зворотного відновлення. $t_{rr}=10$ мкс

$$I_{звор.max} = \frac{175}{10} = 17,5 \text{ А.}$$

Визначаємо величину ємкості конденсаторів у мкФ індивідуальних захисних ланцюгів виходячи з умови, що енергія, яка накопичена в індуктивності L_k при запиранні вентиля накопичується в конденсаторі RC - ланцюга і до кінця процесу запирання напруги на конденсаторі не повинно перебільшити $U_{c.max.}=U_{DRM} = 1600 \text{ В}$.

$$C \cdot \frac{U_{c.max}^2}{2} = L_k \cdot \frac{I_{звор.max}^2}{2},$$

$$C = L_k \cdot \frac{I_{звор.max}^2}{U_{c.max}^2}, \quad (2.22)$$

$$C = 0,0128 \cdot \frac{17,5^2}{1600^2} = 1,53 \text{ мкФ.}$$

При виборі конденсатора повинні виконуватися умови:

$$U_{ном.p, В} \geq U_{ф.ном, В},$$
$$C_{ном.p, мкФ} \geq C, мкФ,$$

По розрахункових даним вибираю конденсатор з наступними характеристиками: $U_{ном.p}=1600 \text{ В}$; $C_{ном.p}= 2 \text{ мкФ}$.

2.1.4 Розрахунок і вибір резистора захисного ланцюга

Розрахунок опорів цих резисторів виконується, виходячи з необхідності виконання наступних умов:

1) розрядний струм конденсатора не повинен перевищувати допустимий струм вентиля (не більше 10-15% від номінального струму вентиля);

2) за час відкритого стану вентиля конденсатор повинен встигнути розрядитися до початку моменту запирання вентиля.

Визначаємо опір резистора в Ом:

$$R = \frac{U_{d.max}}{0,1 \cdot I_{вент}}, \quad (2.23)$$

де $I_{вент}$ - струм на вентилі випрямляча;

$U_{d.max}$ - максимальна напруга на вентилі випрямляча.

$$R = \frac{1600}{0,1 \cdot 800} = 20 \text{ Ом.}$$

Визначаємо сталу часу розрядки RC – ланцюга у мкс:

$$\tau_p = R \cdot C, \quad (2.24)$$

$$\tau_p = 20 \cdot 1,53 = 30,6 \text{ мкс.}$$

Визначаємо потужність, яка розсіюється в резисторі захисного ланцюга в Вт:

$$P_p = C \cdot U_{d.max}^2 \cdot f_m, \quad (2.25)$$

$$P_p = 1,53 \cdot 10^{-6} \cdot 1600^2 \cdot 50 = 19,6 \text{ Вт.}$$

По розрахунковим даним вибираю резистор в алюмінієвому корпусі з наступними характеристиками: $R_{ном.р.}=20 \text{ Ом}$; $P_{ном.р.}=20 \text{ Вт}$.

2.1.5 Розрахунок і вибір варистора

Варистори, які є нелінійними резисторами, використовуються як захисні елементи. Їх опір різко зменшується, коли підведена напруга перевищує певний поріг. Характеристики варистора включають напругу, при якій починається різке падіння опору, енергію, яку варистор може поглинути без руйнування під час імпульсу перенапруги, та потужність розсіювання. При розрахунку захисту для реакторного виконання, джерелом перенапруги з боку живильної мережі зазвичай виступає струмообмежувальний реактор під час відключення силового автомата.

Енергія, що накопичується в обмотках реактора, визначається виразом в Дж:

$$W_{вар} = \frac{L_p \cdot I_{max}^2}{2}, \quad (2.26)$$

де L_p – індуктивність фази реактора;

I_{max} – максимальний струм фази реактора при перевантаженнях

в А:

$$I_{max} = 1,5 \cdot I_{л.ном}, \quad (2.27)$$

$$I_{max} = 1,5 \cdot 660 = 990 \text{ А}$$

$$W_{вар} = \frac{0,00064 \cdot 990^2}{2} = 313,63 \text{ Дж}$$

Класифікаційну напругу у В вибираємо рівною :



$$U_k = 1,15 \cdot U_{вр}, \quad (2,28)$$

$$U_k = 1,15 \cdot 1600 = 1840 \text{ В}$$

При виборі варистора повинні виконуватися умови:

$$W_{вар.р, Дж} < W_{вар, Дж},$$

$$U_k, \text{ В} < U_{вар, \text{ В}}.$$

Вибираю оксидоцинкові варистори типу К20 . Допустима енергія розсіювання $W_{вар.доп} = 320 \text{ Дж.}$, $U_{вар} = 2000 \text{ В}$.

2.1.6 Розрахунок і вибір конденсаторного фільтра

Розрахунок ємкості конденсаторного фільтра заснований на:

- 1) визначені допустимого рівня і пульсацій виходячи з допустимих втрат, які визначають нагрівання конденсатора;
- 2) визначені допустимого рівня струму, який протікає через електроди і місця їх контакту з обкладаннями конденсатора.

Визначаємо амплітуду напруги на конденсаторі в В:

$$U_{с.мах} = \sqrt{2} \cdot 1,15 \cdot U_{л.ном}, \quad (2,30)$$

$$U_{с.мах} = \sqrt{2} \cdot 1,15 \cdot 380 = 618 \text{ В}.$$

Визначаємо необхідну ємність конденсатора в мкФ:

$$C_{\phi} = I_{d.ном} \cdot \frac{t_{п}}{\Delta U_{d.ном}}, \quad (2,31)$$


де $t_{п}$ – час паузи при ШІМ – модуляції. $t_{п} = 62,5 \text{ мкс}$
 $f_{роб}$ – робоча частота ШІМ – модуляції. $f_{роб} = 8 \text{ кГц}$;
 $\Delta U_{пульс}$ – допустима амплітуда пульсації напруги при робочій частоті $f_{роб}$ ШІМ – модуляції, $\Delta U_{пульс} = 1,5 \text{ В}$
 $I_{d.ном}$ – номінальний струм двигуна А:

$$I_{d.ном} = \frac{P_{d.ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{d.ном} \cdot \eta_{d.ном} \cdot \cos \phi}, \quad (2,32)$$

$$I_{d.ном} = \frac{200000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,956 \cdot 0,89} = 357,14$$

$$C_{\phi} = 357,14 \cdot \frac{62,5 \cdot 10^{-6}}{1,5} = 14880 \text{ мкФ}.$$

По розрахунковим даним вибираю конденсатор з наступними характеристиками: $U_p = 630 \text{ В}$; $C_{ном} = 4300 \text{ мкФ}$.



Даний конденсатор не задовольняє за показниками ємності, тому з'єднуємо чотири конденсатори у паралель

$$C_{\text{НОМ}} = 4 \cdot 4300 = 17200 \text{ мкФ}$$

2.1.7 Розрахунок і вибір силового транзистора

Силові транзистори є повністю керованими напівпровідниковими приладами. На відміну від тиристорів, вони можуть вмикатися та вимикатися в будь-який момент при наявності напруги відповідної полярності. Тиристри ж можуть включатися тільки при зменшенні анодного струму до нуля або зміні його полярності. У силових транзисторах відсутній механізм позитивного зворотного зв'язку в режимі провідності, тому вони менш стійкі до струмових перевантажень порівняно з тиристорами. Тиристри здатні витримувати струмові перевантаження у 5-10 разів і більше від номіналу, тоді як стійкість транзисторів визначається допустимим зниженням коефіцієнта посилення у біполярних транзисторах або опором каналу провідності у польових транзисторах. Коефіцієнт перевантаження для правильно обраних транзисторів рідко перевищує 2-2,2 від номінального струму.

Як і тиристри, силові транзистори дуже чутливі до перевищення допустимих перенапруг. Допустимі температури напівпровідникової структури транзисторів практично аналогічні до температур, допустимих для структур тиристорів.

Визначаємо максимальний струм транзистора в А:

$$I_{\text{max}} = \frac{\sqrt{2} \cdot P_{\text{розр}} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{\text{ф.ном}}} \cdot \frac{\lambda}{\eta_{\text{двиг}} \cdot \cos \varphi}, \quad (2.33)$$

де λ - перевантажувальна здатність двигуна. $\lambda = 1,5$

$$I_{\text{max}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 200 \cdot 10^3}{3 \cdot 220} \cdot \frac{1,5}{0,956 \cdot 0,89} = 755,5 \text{ А.}$$

Визначаємо максимальну робочу напругу колектора в В:

$$U_{\text{ке}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{л}} \cdot K_{\text{с}} \cdot K_{\text{з}}, \quad (2.34)$$

де $K_{\text{с}}$ – коефіцієнт допустимого підвищення напруги мережі. $K_{\text{с}} = 1,15$
 $K_{\text{з}}$ – коефіцієнт запасу. $K_{\text{з}} = 1,2$

$$U_{\text{ке}} = \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1,15 \cdot 1,2 = 714,6 \text{ В.}$$

Обираю «IGBT» модулі транзисторного типу з наступними параметрами:

- 1) Постійний струм $I_{\text{н}} = 800 \text{ А}$
- 2) Допустима напруга $U_{\text{ке.макс}} = 1200 \text{ В}$

- 3) Загальний тепловий опір, що встановився, при стандартних умовах $R_T=0,009^\circ\text{C}/\text{Вт}$
- 4) Час виключення $t_{\text{викл}}=2$ мкс
- 5) Максимально-допустима температура напівпровідникової структури $T_{\text{стр}}=125^\circ\text{C}$
- 6) Напряга насичення колектора при максимальному струмі $U_{\text{ке.sat}}=1,8$ В
- 7) Частота комутації $f_{\text{ком}} 1/T_{\text{ком}}=8 \cdot 10^{-3}$ Гц; $T_{\text{ком}}=125 \cdot 10^{-3}$ с
- 8) Максимальна температура навколишнього середовища $T_{\text{нс.max}}=40$ °С.
- По розрахунковим даним вибираємо частотний перетворювач.

2.2 Дослідження механічних характеристик насосних агрегатів у системах водопостачання

2.2.1 Характеристики насосів та мережі

В таблиці 1.1 представлені характеристики насосів насосної станції мартенівського цеху. Щоб визначити реальні характеристики насоса, необхідно аналізувати як сам насос, так і мережу, в якій він працює. Характеристика мережі $H = f(Q)$ визначає тиск, який насос повинен створювати на початку мережі для транспортування певного об'єму рідини. Цей тиск складається з двох компонентів: $H_{\text{ст}}$ - тиск, необхідний для підйому рідини на певну висоту в системі, $H_{\text{д}}$ - тиск, потрібний для подолання гідродинамічного опору в мережі, що виникає через тертя рідини об стінки труб та інших перешкод.

Загалом, характеристика мережі допомагає визначити, який тиск повинен забезпечувати насос для ефективної роботи системи, враховуючи як висоту підйому рідини, так і опір трубопроводу.

Точка перетину між характеристикою насоса (крива 1) та характеристикою мережі (крива 2) визначає робочий режим насоса, значення тиску та витрати, при яких система буде працювати оптимально (рис. 2.4). Характеристика мережі з постійними параметрами включає втрати тиску, викликані внутрішнім тертям, тертям потоку об стінки трубопроводу, а також подоланням місцевих опорів. Ці втрати тиску пропорційні квадрату швидкості потоку або квадрату продуктивності насоса. За цих умов характеристика мережі може бути описана відповідним рівнянням [18]:

$$H = H_{cm} + RQ^2, \quad (2.35)$$

де R – коефіцієнт опору мережі.

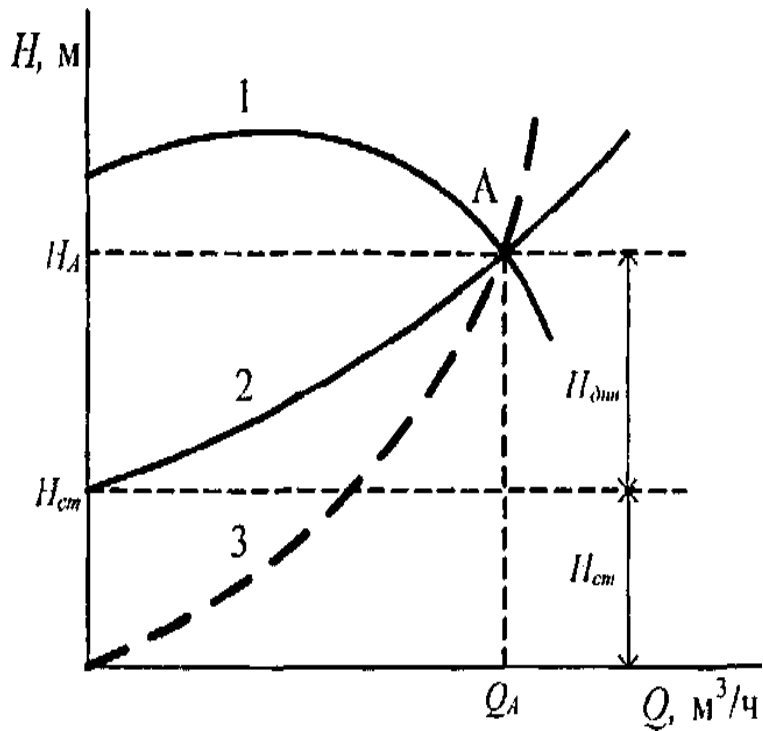


Рисунок 2.4 – Показники роботи насоса в системі: 1 – характеристика насоса; 2 – характеристика мережі при наявності протитиску; 3 – характеристика мережі без протитиску

Рисунок 2.4 допомагає зрозуміти взаємодію між насосом та мережею, показуючи, як змінюється робочий режим насоса залежно від умов у мережі, зокрема наявності або відсутності протитиску.

2.2.2 Регулювання продуктивності та частотне регулювання

Зміна продуктивності насоса можлива шляхом регулювання його швидкості. Коли швидкість зменшується для корекції продуктивності насоса, його характеристики зсуваються вниз, тоді як характеристика мережі залишається незмінною. Для визначення різних характеристик насосного агрегату можна використовувати формули приведення, виражені у відносних одиницях.

$$Q^* = Q_i^* \left(\frac{n_H}{n_i} \right); H^* = H_i^* \left(\frac{n_H}{n_i} \right)^2; P^* = P_i^* \left(\frac{n_H}{n_i} \right)^3; \quad (2.36)$$

При частотному регулюванні продуктивності насоса зміна швидкості обертання має сенс лише до певного рівня, коли напір насоса дорівнює статичному натиску ($H_{ст}$). У цей момент продуктивність насоса падає до нуля ($Q = 0$). Подальше зниження швидкості робить роботу двигуна неефективною.

З характеристик видно, що діапазон частотного регулювання обмежується величиною статичного натиску. Наприклад, при частоті обертання n_4 (рисунок 2.5) напір насоса буде недостатнім для подолання

протитиску мережі, що викличе спрацювання зворотного клапана в механічній системі. Таким чином, наявність статичного натиску обмежує діапазон частотного регулювання та можливості енергозбереження при експлуатації насоса. Зміна частоти обертання робочого колеса насоса дає можливість коригувати його продуктивність, що сприяє зниженню енергоспоживання та підвищенню ефективності роботи системи подачі рідини.

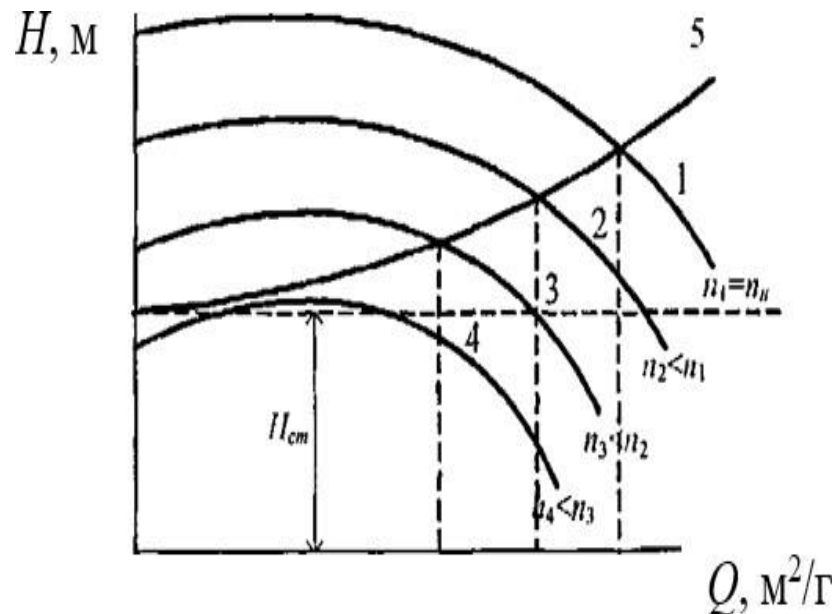


Рисунок 2.5 – Регулювання продуктивності через зміну швидкості обертання робочого колеса: 1, 2, 3, 4 – характеристики насоса; 5 – характеристика мережі при наявності протитиску.

Оптимальною характеристикою для насосів є максимальна продуктивність при найвищій швидкості та номінальній напрузі на статорі, коли струм статора або загальні втрати в двигуні не перевищують значення, зазначені в паспортних характеристиках двигуна. Для забезпечення стабільної роботи електродвигуна, обмеження його перевантаження за струмом та магнітним потоком, а також підтримки високих енергоефективних показників, перетворювач частоти (ПЧ) має забезпечувати певне співвідношення між вхідними та вихідними параметрами, що залежать від типу механічної характеристики насоса. Це співвідношення визначається рівнянням закону частотного регулювання.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1}{f_2} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \quad (2.37)$$

Для насосів, які працюють без статичного напору, тобто для тих, у яких механічна характеристика описується рівнянням квадратної

параболи, необхідно дотримуватися відповідного співвідношення, яке визначає взаємозв'язок між швидкістю обертання та продуктивністю насоса в умовах відсутності статичного тиску.

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \frac{U_2}{f_2^2} = const \quad (2.38)$$

Для насосів, які працюють зі статичним напором, потрібно застосовувати більш складне співвідношення, в якому k є показником ступеня в рівнянні механічної характеристики насоса. Це співвідношення враховує вплив статичного напору на механічну характеристику та визначає коректне співвідношення між параметрами роботи насоса в умовах змінної швидкості обертання.

$$\frac{U_1}{f_1^{1+\frac{k}{2}}} = \frac{U_2}{f_2^{1+\frac{k}{2}}} \quad (2.39)$$

У більшості випадків для насосних установок використовуються промислові перетворювачі частоти (ПЧ), які забезпечують підтримку необхідних співвідношень між параметрами роботи насоса. Це дозволяє оптимізувати енерговитрати, підтримуючи стабільність роботи насоса при змінних умовах експлуатації.

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_2}{f_2} = const, \quad (2.40)$$

Враховуючи зазначене, співвідношення для моменту асинхронного двигуна при частотному регулюванні можна записати з урахуванням індуктивного опору контуру намагнічування та відносної частоти напруги живлення як:

$$M_{дв} = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{KH}^2 \cdot f_1^2 \cdot \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu n} \cdot f_1^*} \right)^2 \right]} \quad (2.41)$$

де $X_{\mu n}$ – індуктивний опір контуру намагнічування;

$f_1^* = f_1 / f_{1n}$ – відносне значення частоти напруги живлення.

Основною характеристикою для визначення робочої точки при різних частотах обертання є механічна характеристика насосного агрегату. Для прикладу розглянемо насосний агрегат WILLO SCP 200/460HA. На рисунку 2.6 зображено характеристику цього насоса, яка демонструє взаємозалежність між напором H , подачею Q та потужністю P_n при номінальній частоті обертання двигуна $n_n = 1470$ об/хв.

Ця характеристика дає змогу визначити оптимальні умови роботи насоса в залежності від змінних параметрів системи, зокрема від зміни

частоти обертання, що є важливим для коректної настройки та вибору робочої точки насоса в кожному конкретному випадку.

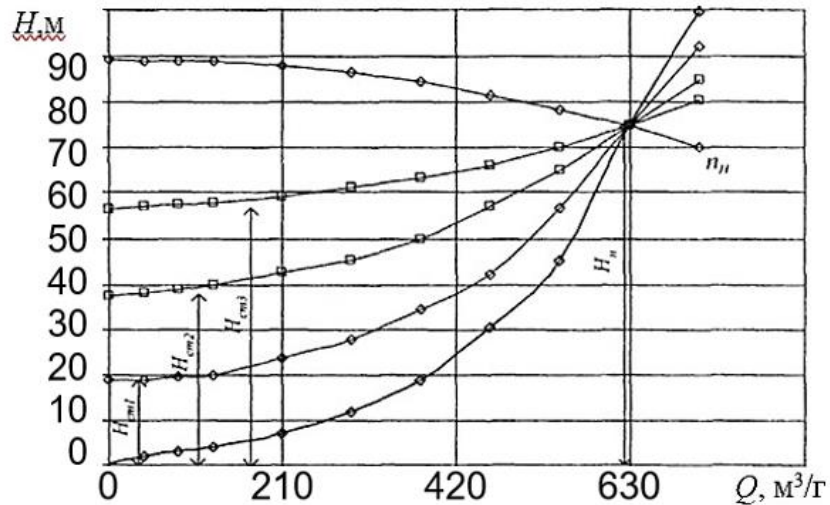


Рисунок. 2.6 – Графік роботи насосного агрегату WILLO SCP 200/460HA та трубопроводу

2.2.3 Механічні характеристики насоса

Однією з основних характеристик насосних агрегатів, як навантажувальних машин для електроприводів, є їхня механічна характеристика, яка описує залежність між моментом M_c та частотою обертання n , тобто $M_c = f(n)$.

Тип характеристики мережі, зокрема співвідношення між статичним та динамічним напором, має значний вплив на механічну характеристику насосного агрегату. Механічну характеристику можна отримати шляхом комплексного аналізу характеристик трубопроводу та насосного агрегату при різних частотах обертання асинхронного двигуна (АД). Залежно від величини статичного напору ($H_{ст}$), форма механічної характеристики може змінюватися. Момент опору насосного агрегату визначається за допомогою спеціального рівняння, яке враховує вплив різних параметрів на його роботу.

$$M_c = 9,565 \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_n \cdot n}, \quad (2.42)$$

де ρ – щільність рідини, що перекачується, в нашому випадку води;
 g – прискорення вільного падіння;
 η_n – ККД насосного агрегату.

Характеристика трубопроводу з постійними параметрами визначається втратами напору, які виникають через внутрішнє тертя, тертя потоку об стінки трубопроводу та подолання місцевих опорів. Ці

втрати пропорційні квадрату швидкості потоку або квадрату продуктивності насоса. Коефіцієнт опору мережі залежить від різних факторів, зокрема від довжини трубопроводу, його поперечного перерізу, в'язкості рідини, шорсткості стінок трубопроводу, а також наявності додаткових елементів конструкції, таких як коліна, зворотні клапани, засувки тощо.

Характеристики насоса при номінальній частоті обертання можуть бути перераховані для будь-якої частоти обертання за допомогою формул подібності. Це дозволяє отримати механічні характеристики насоса при зміні частоти обертання, і вони можуть бути представлені у вигляді:

$$H = H_0 \left(\frac{n}{n_H} \right)^2 + Q^2 \frac{H_0 \cdot H_H}{Q_H^2}, \quad (2.43)$$

де n_H – це частота обертання механізму, яка є номінальною;

H_0 – статичний напір, що створюється при номінальній частоті обертання, коли витрата рідини дорівнює нулю;

H_H – напір насоса при номінальній роботі;

Q_H – номінальна продуктивність насоса.

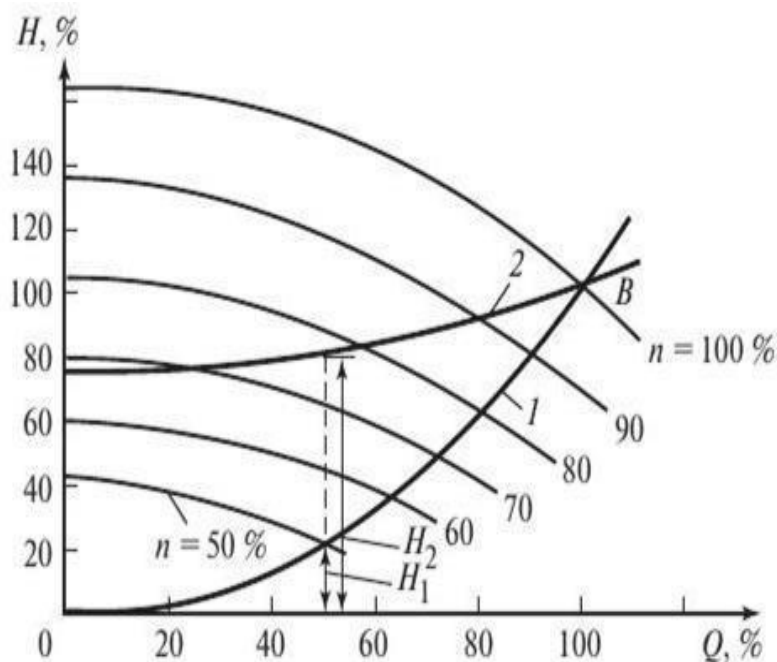


Рисунок 2.7 – Характеристики насосного агрегату WILCO SCP 200/460HA та трубопроводу при зміні частоти обертання

Момент опору насосного агрегату в загальному випадку можна описати рівнянням:

На рисунку 2.7 представлені характеристики насосного агрегату при різних частотах обертання, а також характеристика трубопроводу

для статичного напору $H_{ст2} = 0,5H_n$. Точки перетину цих характеристик визначають робочі точки насосного агрегату.

$$M_c = 9,565 \cdot \frac{P_H}{n}, \quad (2.44)$$

Момент опору насосного агрегату можна визначити за допомогою формули (2.42), яка показує, як момент опору змінюється залежно від витрати або швидкості обертання. Оскільки насоси працюють при наявності протитиску, залежність моменту опору від швидкості обертання є більш вираженою, ніж квадратична. Це означає, що з підвищенням швидкості обертання насоса опір зростає більш стрімко, ніж у випадку з простими квадратними залежностями.

Такі характеристики, які вказують на те, як змінюється момент опору в залежності від параметрів роботи насоса, можна побачити на рисунку 2.8, де представлено відображення цих залежностей.

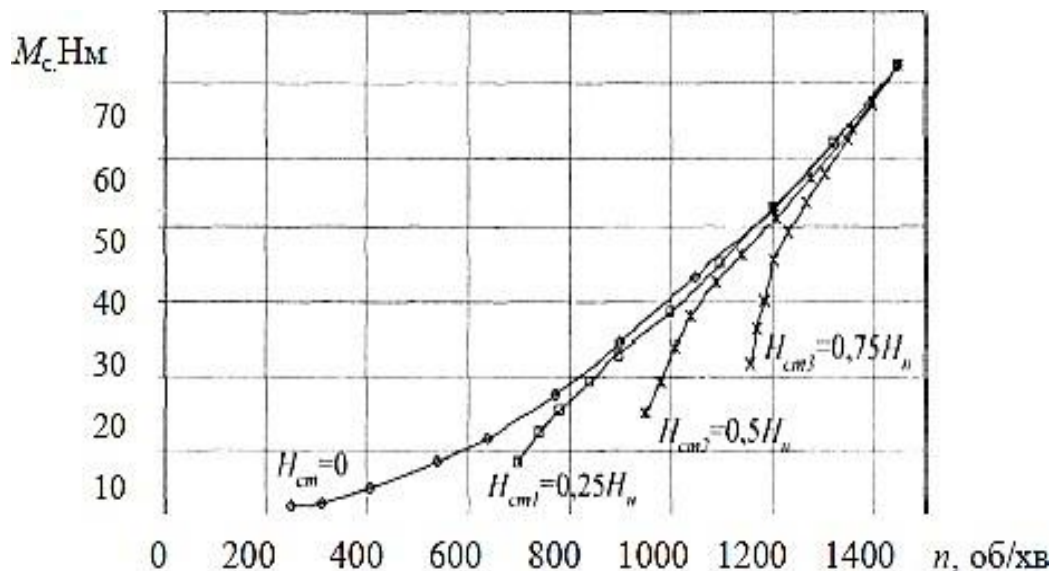


Рисунок 2.8 – Механічні характеристики насосного агрегату WIL0 SCP 200/460HA при різних значеннях статичної складової напору

При зміні швидкості від нуля до мінімального значення залежність моменту опору від швидкості має квадратичний характер. Коли насос досягає необхідного натиску для подолання статичного напору, характер цієї залежності змінюється, і вона починає залежати від величини статичної складової напору. Апроксимація цієї залежності дозволяє отримати аналітичну характеристику насосного агрегату. Як показано на рисунку 2.8, механічні характеристики значною мірою залежать не тільки від величини статичного напору, але й від типу характеристики трубопроводу, що робить цю залежність більш складною для насосного агрегату.

Однак, коли система працює з підтримкою постійного значення напору ($H = H_n = \text{const}$) у мережі, механічна характеристика насосного агрегату змінюється порівняно з раніше отриманими характеристиками. На рисунку 2.9 зображена механічна характеристика насосного агрегату як навантажувальної машини асинхронного двигуна при умовах підтримки постійного напору ($H = H_n = \text{const}$), де статична складова напору становить ($H_{ст2} = 0,5H_n$).

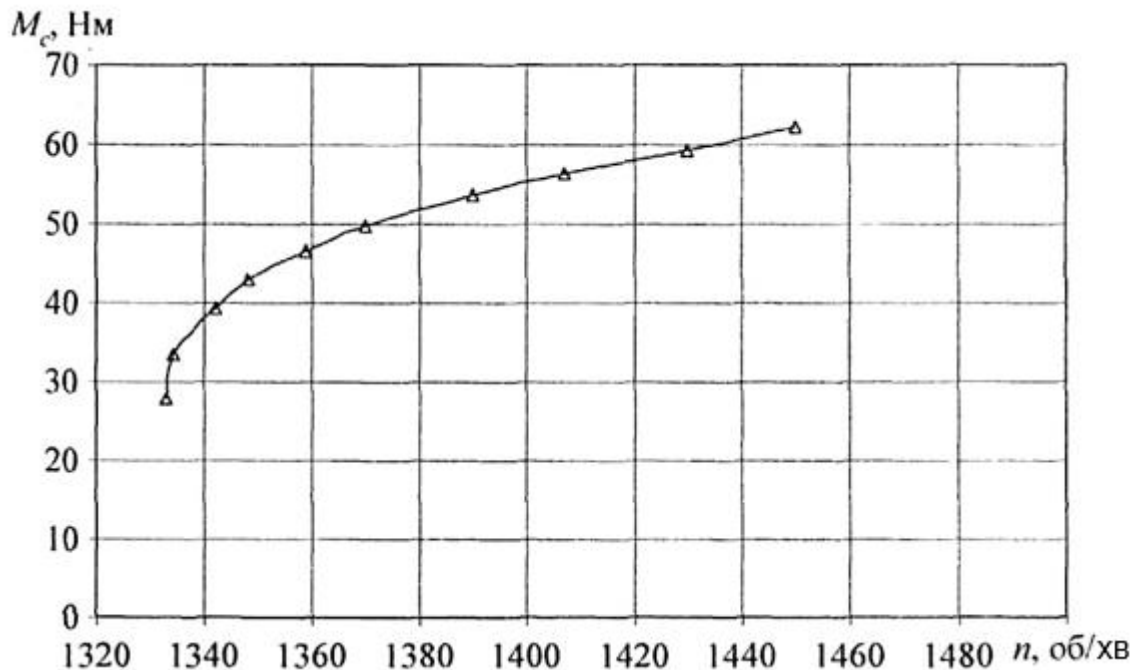


Рисунок 2.9 – Механічна характеристика насосної установки

Аналіз механічних характеристик показує, що зі збільшенням статичного напору діапазон можливого регулювання насосної установки зменшується. При зниженні швидкості момент опору зменшується швидше, ніж передбачає квадратична залежність (рисунок 2.9). З цього можна зробити висновок, що для точного визначення робочих параметрів насосів не достатньо лише використовувати формули; необхідно також враховувати реальний режим роботи насосного обладнання. Механічна характеристика насосного агрегату при фіксованому значенні напору в мережі має більш складну форму, ніж квадратична залежність, і залежить від величини постійного напору ($H = H_n = \text{const}$).

3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою дослідження є оцінка ефективності використання частотного перетворювача для керування насосами на насосній станції високого тиску, зокрема для зниження енергоспоживання та забезпечення стабільності роботи насосної установки при різних режимах навантаження.

В ході дослідження необхідно оцінити вплив частотного перетворювача на енергоспоживання насосної станції, дослідити зміни в показниках тиску та частоти обертання насоса в різних режимах роботи за для визначення впливу зміни частоти обертання на ефективність роботи насосної станції.

Для проведення дослідження необхідно:

- 1) частотний перетворювач;
- 2) датчики тиску для вимірювання робочого тиску в трубопроводах насосної станції;
- 3) датчик частоти обертання для вимірювання частоти обертання валу асинхронного двигуна;
- 4) датчики струму та напруги для вимірювання змін в електричному ланцюгу, що дозволяє оцінити ефективність використання частотного перетворювача;
- 5) програмне забезпечення.

3.1 Застосування енкодера для контролю частоти обертання асинхронного електродвигуна

Для моєї моделі насосної станції з високовольтними двигунами найкращим вибором буде енкодер типу Koyo TRD-S Series (рис. 3.1), основні характеристики представлені в таблиці 3.1.



Рисунок 3.1 – Інкрементальний енкодер Koyo TRD-S Series для вимірювання частоти обертання

Кою TRD-S Series забезпечує високу точність і роздільну здатність вимірювання, що є важливим для точного керування частотним перетворювачем і оптимізації роботи насосної станції. Крім того, енкодери відрізняються високою надійністю та стійкістю до зовнішніх умов, що є важливим для промислового застосування.

Таблиця 3.1 – Основні характеристики інкрементального енкодера Кою TRD-S Series

Максимальна швидкість обертання	6000 об/хв
Роздільна здатність	Від 100 до 5000 імпульсів на оберт
Напруга живлення	5-24 В
Робоча температура	-10 °С до +70 °С
Захист	IP 54



Рисунок 3.2 – Схема системи з використанням частотного перетворювача та енкодера Кою TRD-S

Енкодер монтується на вал асинхронного двигуна або на приводний вал насоса, щоб забезпечити точне вимірювання частоти обертання. Вихідні сигнали енкодера (А, В, Z) підключаються до системи керування частотним перетворювачем. Це дозволяє системі керування отримувати дані про частоту обертання і відповідно коригувати роботу двигуна. Після встановлення енкодера Кою TRD-S Series проводимо калібрування енкодера для забезпечення точності вимірювань та

налаштовуємо систему керування для обробки сигналів від енкодера. Система з енкодером Kooyo TRD-S має схему представлену на рисунку 3.2.

3.2 Застосування датчика тиску в насосній станції мартенівського цеху

Для моєї моделі насосної станції використаємо існуючий датчик тиску Сафір М 5151 призначений для вимірювання тиску рідин і газів в різних промислових застосуваннях (рис. 3.3).

Сафір М 5151 забезпечує високу точність, надійність та стійкість до зовнішніх впливів, що робить його ідеальним вибором для вашої насосної станції. Основні характеристики представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні характеристики датчика тиску Сафір М 5151

Діапазон вимірювання	від 0 до 16 МПа
Тип вихідного сигналу	аналоговий (4 - 20 мА, 0 - 10В)
Живлення	12-36 В постійного струму
Температурний діапазон	від -40°C до +85°C
Точність	±0.25% від повного діапазону
Захист	IP65 або вище, залежно від моделі



Рисунок 3.3 – Датчика тиску Сафір М 5151

Датчик встановлюється на трубопровід або колекторе, де необхідно вимірювати тиск. Рекомендується вибирати місце з найменшими вібраціями та температурами, які знаходяться в межах робочого діапазону датчика. Використовують відповідні фітинги та ущільнювачі для забезпечення герметичного з'єднання між датчиком та трубопроводом. Підключаємо датчик до джерела живлення та системи керування відповідно до схеми підключення, зазначеної в документації до датчика. Зазвичай це включає підключення вихідних сигналів до входів контролера або частотного перетворювача. Після встановлення виконуємо початкове калібрування датчика згідно з інструкціями виробника. Це може включати налаштування нуля і масштабу для забезпечення точних вимірювань.

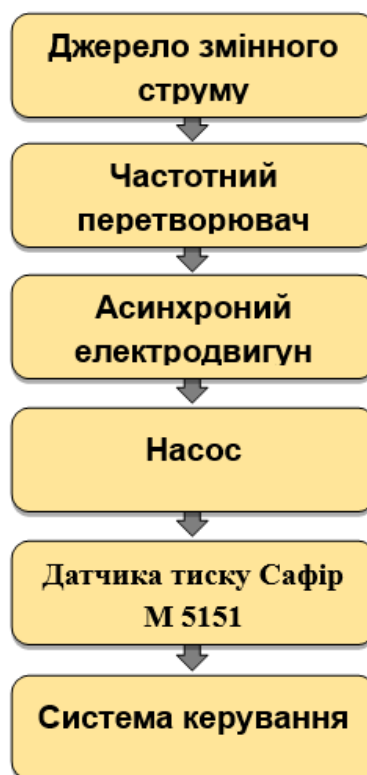


Рисунок 3.4 – Схема системи з використанням частотного перетворювача та датчика тиску Сафір М 5151

Джерело живлення забезпечує електроенергію для всієї системи, включаючи частотний перетворювач, асинхронний двигун та датчик тиску. Частотний перетворювач змінює частоту та напругу, подані на асинхронний двигун, що дозволяє регулювати швидкість обертання насоса. Датчик тиску «Сафір М 5151» вимірює тиск у системі та передає ці дані до системи керування. Система керування на основі даних від датчика коригує роботу частотного перетворювача для підтримки оптимального режиму роботи насосної станції.

3.3 Схеми модернізації системи пуску електродвигунів насосної станції високого тиску

На рисунку 3.5 зображена схема модернізації системи пуску електродвигунів насосної станції високого тиску з використанням частотного перетворювача та датчиків тиску і частоти обертання.

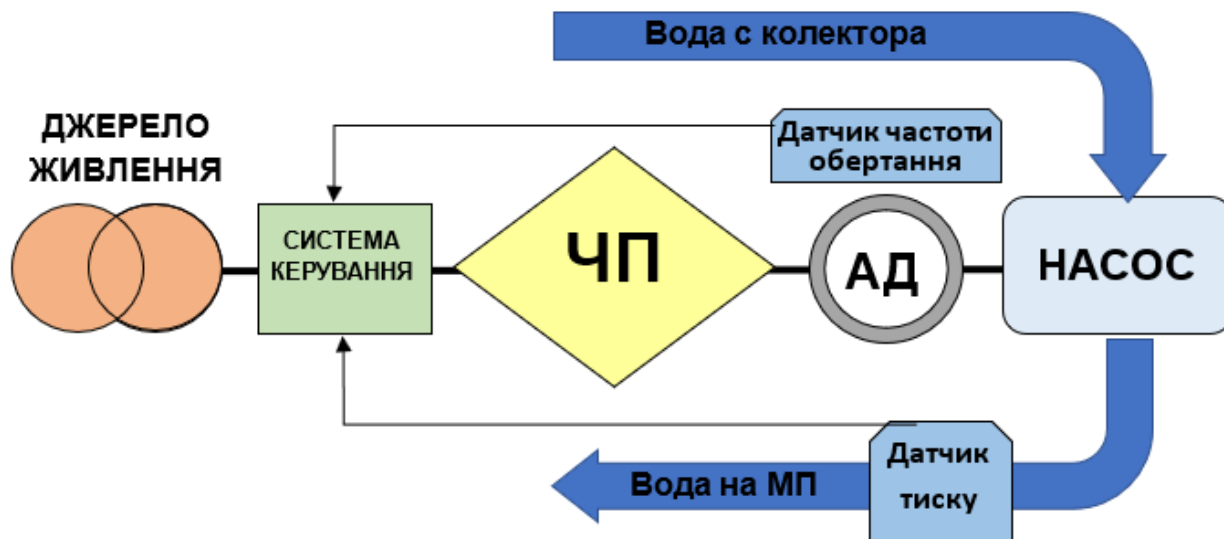



Рисунок 3.5 – Схема модернізації системи пуску електродвигунів насосної станції високого тиску з використанням частотного перетворювача

Після встановлення частотного перетворювача, датчика тиску та датчика частоти обертання, проводимо налаштування датчиків та всієї системи за потрібними нам параметрами. В процесі проведення експерименту ми починаємо з увімкнення джерела живлення, яке забезпечує електроенергію для всієї системи керування. Це джерело живлення є важливою складовою, оскільки воно подає необхідну енергію для роботи системи керування, яка, в свою чергу, координує роботу всіх компонентів.

Система керування відправляє команди на частотний перетворювач, який регулює як частоту, так і напругу, що подаються на асинхронний двигун. Завдяки цьому двигун може працювати на оптимальній швидкості обертання, що, в свою чергу, забезпечує ефективну роботу насоса. Вода з колектора надходить до насоса, який перекачує її до місця призначення та забезпечує охолодження механізмів та обладнання мартенівських печей.

На виході насоса встановлено датчик тиску, який постійно контролює тиск води, що перекачується. В цей же час датчик частоти обертання, встановлений на асинхронному двигуні, передає дані про швидкість обертання до системи керування. Ці дані надзвичайно важливі, оскільки вони дозволяють системі керування коригувати роботу



частотного перетворювача для підтримки оптимального режиму роботи насоса.

Система керування обробляє отримані дані від датчиків і на основі цієї інформації вносить необхідні корективи в роботу частотного перетворювача. Це забезпечує стабільну та ефективну роботу насоса, що перекачує воду з колектора до місця призначення.

Під час експерименту ми записуємо параметри роботи системи, такі як частота обертання двигуна та тиск води. Ці дані є критично важливими для подальшого аналізу. Вони використовуються для оцінки ефективності роботи системи та для визначення можливостей її вдосконалення.

Дані, отримані від датчика частоти обертання, дозволяють нам оцінити, наскільки ефективно частотний перетворювач регулює швидкість обертання асинхронного двигуна. Аналізуючи ці дані, ми можемо визначити, чи є якісь відхилення від заданих параметрів і як ці відхилення впливають на роботу насоса.

Дані з датчика тиску дають нам інформацію про тиск в системі при різній частоті обертання асинхронного двигуна. Аналізуючи ці дані, ми можемо оцінити стабільність та ефективність роботи насоса при різних режимах роботи. Це дозволяє нам зробити висновки про загальну продуктивність системи та її надійність.

Таким чином, методика проведення експерименту включає комплексний підхід до аналізу роботи системи, що дозволяє отримати повне уявлення про її ефективність та стабільність при різних режимах роботи.

Ця модернізована схема дозволяє знизити енергоспоживання, підвищити надійність роботи системи та зменшити зношення механічних частин насосів завдяки плавному регулюванню швидкості обертання.

4 РОЗДІЛ 3 ЕКОНОМІКИ

4.1 Споживання електроенергії насосної станції

Споживання електроенергії розраховуються за формулою:

$$E = P \cdot t; \quad (4.1)$$

де P - потужність (кВт)
 t - час роботи (години)

Нам відомо що наш двигун має потужність 250 кВт і працює він 24 години на добу та цілий місяць то виходить що за рік він працює 8766 годин, тоді спожита електроенергія буде дорівнювати;

$$E_1 = 250 \cdot 10^3 \cdot 8766 = 2\,191\,500 \text{ кВт};$$

Щоб розрахувати спожиту електроенергію при використанні частотного перетворювача давайте подивимось на рисунок 4.1 на якому ми бачимо графік тиску протягом певного часу та можемо зробити висновки що на графіку тиск тримається на позначки близької до 6 кг/см² при необхідності 5 кг/см².

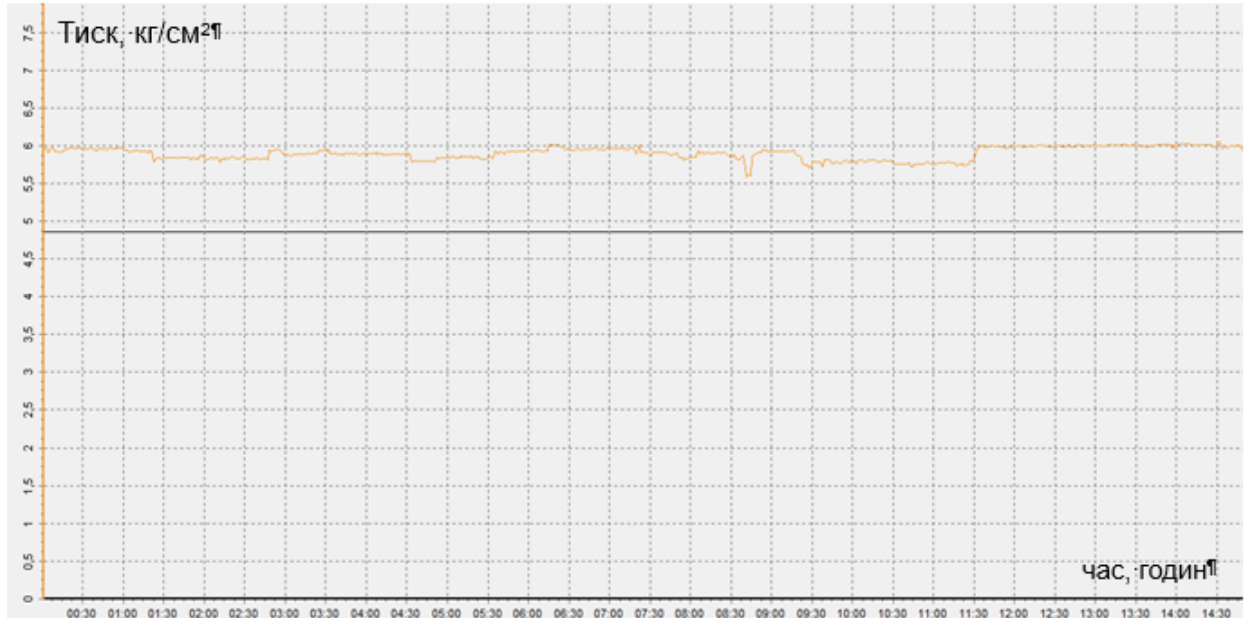


Рисунок 4.1 – Графік тиску протягом певного часу

За допомогою частотного перетворювача можливо зменшити частоту обертання електродвигуна.

За законом подібності для насосів ми маємо, що відношення тисків пропорційно квадрату відношення швидкостей обертання:

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2, \quad (4.2)$$

де: P_1 та P_2 – початковий і кінцевий тиски,
 N_1 та N_2 – початкова і кінцева швидкості обертання.

Це означає, що для зниження тиску з 6 кг/см² до 5 кг/см², швидкість обертання двигуна повинна зменшитися приблизно на 10%.

Зменшення частоти обертання двигуна на 10% може суттєво знизити його споживання електроенергії завдяки принципам регулювання швидкості в асинхронних двигунах. Для розрахунку споживання електроенергії можна скористатися законом подібності для насосів і формулами, які описують взаємозв'язок між частотою обертання, потужністю і споживанням енергії.

Потужність, споживана двигуном, пропорційна кубу швидкості обертання:

$$P_{\text{нов}} = P_{\text{поч}} \cdot \left(\frac{N_{\text{нов}}}{N_{\text{поч}}}\right)^3, \quad (4.3)$$

Таким чином, при зменшенні частоти обертання двигуна на 10 %, його споживання електроенергії зменшиться приблизно на 27 %. Це пояснюється тим, що зменшення швидкості обертання зменшує як механічну роботу, яку виконує двигун, так і його електричну потужність.

Споживча потужність електродвигуна при зменшенні частоти обертання буде дорівнювати 182,5 кВт. Спожиту електроенергію розраховуємо за формулою (4.1):

$$E_2 = 182,5 \cdot 10^3 \cdot 8766 = 1599795 \text{ кВт.}$$

Економія електроенергії за рік складе:

$$E_e = E_1 - E_2, \quad (4.4)$$

$$E_e = 2191500 - 1599795 = 591705 \text{ кВт.}$$

4.2 Економічний розрахунок

Для економічного розрахунку модернізації насосної станції з використанням частотного перетворювача та датчиків тиску і частоти обертання, необхідно врахувати кілька ключових факторів: початкові витрати, експлуатаційні витрати, економію енергії, амортизацію та період окупності [19].

В таблиці 4.1 представлені приблизні вартість обладнання та послуг.

Таблиця 4.1 – Вартість обладнання та послуг

Найменування	Вартість
Частотний перетворювач (ЧП)	1700000 грн
Енкодер Koyo TRD-S Series	8000 грн
Монтажні роботи і матеріали	500000 грн
Вартість електроенергії	6,93 грн/кВт
Датчик тиску Сафір М 5151	використовуємо існуючий

Загальні початкові витрати дорівнює добутку всіх затрат на модернізацію насосної станції мартенівського цеху та дорівнює:

$$V_{\text{поч}} = \text{ЧП} + E + C_{\text{монт}}, \quad (4.5)$$

де $V_{\text{поч}}$ – початкові витрати,
 ЧП – вартість частотного перетворювача,
 E – вартість енкодера,
 $C_{\text{монт}}$ – сума витрат за монтажні роботи та матеріали.

$$V_{\text{поч}} = 1700000 + 8000 + 500000 = 2208000 \text{ грн.}$$

Вартість зекономленої електроенергії буде дорівнювати:

$$V_{\text{з.ел.ен.}} = E_e \cdot C_{\text{ел.ен.}}, \quad (4.6)$$

де $C_{\text{ел.ен.}}$ – вартість електроенергії

$$V_{\text{з.ел.ен.}} = 600000 \cdot 6,93 = 4185000 \text{ грн.}$$

Чистий прибуток буде дорівнювати:

$$\Pi = V_{\text{з.ел.ен.}} - V_{\text{поч}}, \quad (4.7)$$

$$\Pi = 4185000 - 220800 = 1\,950\,000 \text{ грн.}$$

Індекс доходності буде дорівнювати:

$$PI = \frac{V_{\text{з.ел.ен.}}}{V_{\text{поч}}}, \quad (4.8)$$

$$PI = \frac{4\,185\,000}{2\,208\,000} = 1,9$$

Для розрахунку періоду окупності використовуємо формулу:

$$PP = \frac{V_{\text{поч}}}{V_{\text{з.ел.ен.}}}, \quad (4.9)$$

$$PP = \frac{2208000}{4185000} = 0.53 \text{ роки.}$$

Данні економічного розрахунку для зручності зведені в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Данні економічного розрахунку

Економія електроенергії за рік (E_e)	600 000 кВт
Вартість зекономленої електроенергії за рік ($V_{\text{з.ел.ен.}}$)	4 185 000 грн
Початкові витрати ($V_{\text{поч}}$)	2 208 000 грн
Чистий прибуток (Π)	1 950 000 грн
Індекс доходності (PI)	1,9
Період окупності (PP)	0.53 роки

Проект є високорентабельним і швидкоокупним. Встановлення частотного перетворювача забезпечує значну економію електроенергії, що призводить до швидкої компенсації початкових витрат і подальшого отримання чистого прибутку. Це робить проект привабливим для реалізації з економічної точки зору, забезпечуючи ефективну та стабільну роботу насосної станції.



ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі розглянуто модернізацію системи пуску електродвигунів насосної станції високого тиску мартенівського цеху з використанням частотного перетворювача. В умовах сучасних викликів, особливо з огляду на економічну ситуацію та необхідність енергозбереження в Україні, ця модернізація є надзвичайно актуальною.

Аналіз існуючої системи показав, що встановлення частотного перетворювача є необхідним для підвищення енергоефективності та надійності роботи насосної станції. Використання частотного перетворювача дозволяє оптимізувати швидкість обертання електродвигунів, що знижує енергоспоживання та збільшує термін служби обладнання.

Теоретичні дослідження підтвердили ефективність застосування частотних перетворювачів для регулювання швидкості асинхронних двигунів. Використання частотних перетворювачів дозволяє забезпечити стабільну та ефективну роботу насосної станції в складних умовах експлуатації.

Методика експериментальних досліджень включали моделювання роботи насосної станції, встановлення частотного перетворювача, енкадера Koyo TRD-S Series та датчика тиску Сафір М 5151. Експерименти підтвердили, що зменшення частоти обертання двигуна на 10% дозволяє знизити споживання електроенергії приблизно на 27%.


Економічний розрахунок показав високу економічну ефективність проекту. Загальні початкові витрати на модернізацію складають 2 208 000 грн, при цьому річна економія електроенергії становить 591 705 кВт·год, що відповідає 4 185 000 грн. Чистий прибуток складає 1 950 000 грн, а період окупності проекту становить лише 0,53 роки (близько 6 місяців).

Практичні рекомендації щодо впровадження частотних перетворювачів на промислових підприємствах дозволяють підвищити енергоефективність та знизити експлуатаційні витрати. Результати дослідження можуть бути використані для модернізації інших промислових об'єктів, що працюють у важких умовах.

Таким чином, проведені дослідження та розрахунки підтвердили доцільність та ефективність модернізації системи пуску електродвигунів насосної станції високого тиску з використанням частотного перетворювача. Це забезпечує значну економію енергоресурсів, підвищує надійність і стабільність роботи обладнання, що є надзвичайно важливим в умовах сучасних економічних та енергетичних викликів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРАСТИНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Юрченко О. Ю., Барсукова Г. В. Використання частотного перетворювача – дієвий та зручний спосіб регулювання швидкості насосного агрегату. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: Mechanization and Automation of Production Processes*. 2022. Т. 45, № 3. С. 57–63.
2. Охота К.А. Адаптивна система керування продуктивністю насосної станції подачі води на збагачувальну фабрику. *Вісник Криворізького національного університету*. 2016. № 42. С. 208-212.
3. Холодько, С.Г. Оптимізація системи автоматичного керування насосної станції. *Інформатика, математика, автоматика*: матеріали та програма науково-технічної конференції, м. Суми, 18-22 квітня 2016 р. Суми. 2016. С. 149.
4. Коротаєв П. О. Енергоефективний електропривод насосного агрегату з покращеними пусковими характеристиками: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.09.03 / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків, 2016. 20 с.
5. Gomes Borga Delgado, João Nuno. Pumps running as turbines for energy recovery in water supply systems: thesis. Lausanne, EPFL, 2018. 174.
6. Холодько С.Г. Оптимізована система керування насосної станції водопостачання житлового будинку. *Інформатика, математика, автоматика*: матеріали та програма науково-технічної конференції, м. Суми, 17-21 квітня 2017 р. Суми 2017. С. 141.
7. Ковальова Ю. В. Компенсація реактивної потужності електроприводів з тиристорними перетворювачами напруги : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.09.03 / нац. ун-т міського госп-ва. Харків, 2016. 157 с.
8. Сарняк І. М. Розробка автоматизованої системи управління електроприводом для постачання води приватним житловим господарствам : дипломна робота магістра за спеціальністю „141 — електроенергетика, електротехніка та електромеханіка“ / Тернопіль : ТНТУ, 2020. — 72 с.
9. Автоматична насосна станція: пат. 133016 Україна: МПК 2019.01; № u 2018 09125; заявл. 04.09.2018; опубл. 25.03.2019, Бюл. № 6
10. Спосіб захисту асинхронного електродвигуна з живленням від перетворювача частоти: пат. 129616 Україна: МПК H02H 7/08 (2006.01); № u201803696; заявл. 06.04.2018; опубл. 12.11.2018, бюл. № 21.
11. High pressure manifold , assembly , system and method: patent MGB OILFIELD SOLUTIONS , L.L.C. , Houston , TX (US); № US 10,768,642 B2 Apr. 25. 2018; Date of Patent. Sep. 8. 2020.
12. Соколова К. А. ПРИНЦИП РОБОТИ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА. *Automation Technological and Business - Processes*. 2014. Т. 15, № 15-16.



13. Bilynsky Y. Y., Burdeinyi V. B. Investigation of the Opportunity to Develop a Phase-Frequency Ultrasonic Measuring Converter for the Speed of Natural Gas Flow in Closed Small Diameter Pipeline. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*. 2019. Vol. 146, no. 5. P. 7–13.

14. Пирогов В. О. Модернізація привода насосних станцій трубопроводів. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*. 2022. № 1(52). С. 50–56.

15. Михайленко Ю. І. Підвищення ефективності електроспоживання технологічного обладнання промислового підприємства : кваліфікаційна робота бакалавра спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / наук. керівник С. В. Башлій. Запоріжжя : ЗНУ, 2024. 63 с.

16. Kutsyk A., Semeniuk M., Podskarbi G. DUAL-MOTOR INDUCTION FREQUENCY-REGULATED ELECTRIC DRIVE WITH IMPROVED ELECTROMAGNETIC AND ELECTROMECHANICAL COMPATIBILITY. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ, № 1 (5), 2022. P. 24-35

17. Возняк О.М., Штуць. А.А., Колісник М.А. Сучасні системи електроприводів. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ТВОРИ, 2021. – 280 с.

18. Муравльова О. О. Енергозбереження насосного агрегату при використанні асинхронного регульованого – 2007. – С. 467-470.

19. Лобов Р. В. Дослідження шляхів підвищення енергоефективності технологічного обладнання підприємства водопостачання : кваліфікаційна робота магістра спеціальності 144 "Теплоенергетика" / наук. керівник О. І. Осаул. Запоріжжя : ЗНУ, 2022. 75 с.