

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

«На правах рукопису»

УДК 621.51

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій Бойченко

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг інтелектуальних
електротехнічних та мехатронних комплексів»**

**зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

**на тему: «Оптимізація режиму роботи системи охолодження за
критерієм мінімуму електроспоживання компресорною установкою»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ГА-31мп

Брижук В.І.

Науковий керівник:

к.т.н., доцент, Мейта О.В.

Консультант з «Стартап-проект»:

к.е.н., доцент, Шевчук Н.А.

Рецензент:

к.т.н., доцент, Калінчик В.П.

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій Бойченко

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Брижуку Вадиму Ігоровичу

1. Тема дисертації «Оптимізація режиму роботи системи охолодження за критерієм мінімуму електроспоживання компресорною установкою», науковий керівник дисертації к.т.н., доцент Мейта Олександр Вячеславович затверджені наказом по університету від «08» листопада 2024 р. № 5008-с
2. Термін подання студентом дисертації
3. Об'єкт дослідження: процес виробництва стисненого повітря
4. Предмет дослідження: система водяного охолодження компресорної установки
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - a) Провести аналіз існуючих конструкцій і характеристик компресорних установок та визначити чинники, що впливають на їх електроспоживання.
 - b) Розрахувати та вибрати обладнання компресорної установки
 - c) Обґрунтувати та розрахувати параметри системи охолодження компресорної установки.
 - d) Розробити систему автоматичного керування системою охолодження за умовою мінімуму витрат електричної енергії
 - e) Розробити стартап-проект.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: схема автоматизації компресорної установки, схема компресорної установки.
7. Орієнтовний перелік публікацій: «Оптимізація режиму роботи системи охолодження за критерієм мінімуму електроспоживання компресорною» VII науково-технічна конференція магістрантів ім. професора В.М. Винославського; «Оптимізація режиму роботи компресорної установки» XI Міжнародної науково-технічної конференції Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування; «Напрями підвищення енергоефективності компресорної установки» The 2nd International scientific and practical conference “Science and technology: challenges, prospects and innovations”.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап-проект	к.т.н., доцент, Шевчук Н.А.	26.11.2024	

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Оцінка стану питання, літературний огляд, аналіз наукових публікацій і досліджень.	01.11.2024 - 07.11.2024	
2.	Розрахунок та вибір обладнання компресорної установки	07.11.2024 - 14.11.2024	
3.	Виконання спеціальної частини магістерської дисертації. Розробка системи керування охолодженням КУ	14.11.2024 - 28.11.2024	
4.	Оформлення теоретичної та графічної частини.	28.11.2024 - 12.12.2024	
5.	Отримання відгуку та рецензії, захист магістерської дисертації	12.12.2024 - 17.12.2024	

Студент

Науковий керівник дисертації

Брижук В.І.

Мейта О.В.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить: 77 сторінок, 22 рисунки, 13 таблиць та 17 посилань.

Компресорні установки відіграють важливу роль у забезпеченні стиснення повітря та газів у різних промислових галузях. Оскільки процес стиснення супроводжується значним тепловиділенням, охолодження компресорів є критично важливим для підтримання їх ефективності, довговічності та безпечної роботи. Теплове навантаження на компресори вимагає відведення тепла, оскільки перегрів може призводити до пошкодження обладнання, зниження продуктивності та зростання енергоспоживання. У цьому контексті особливого значення набуває розробка та впровадження ефективних систем охолодження, які мінімізують енергетичні витрати.

Мета: Метою роботи є зниження електроспоживання компресорною установкою.

Основні завдання включають:

- аналіз режимів роботи компресора;
- розрахунок та вибір обладнання компресорної установки;
- розрахунок енерговитрат на охолодження при різних режимах роботи;
- розробка системи автоматичного керування продуктивністю охолодження компресорної установки в залежності від навантаження та умов охолодження.

- Розробка стартап-проекту.

Об'єкт дослідження: процес виробництва стисненого повітря

Предмет дослідження: система водяного охолодження компресорної установки

Ключові слова: компресор, система охолодження, енергоспоживання, оптимізація.

ABSTRACT

Master's thesis contains: 77 pages, 22 figures, 13 tables and 17 references.

Compressor units play an important role in ensuring the compression of air and gases in various industrial sectors. Since the compression process is accompanied by significant heat generation, cooling of compressors is critically important for maintaining their efficiency, durability and safe operation. The thermal load on compressors requires heat removal, since overheating can lead to equipment damage, reduced productivity and increased energy consumption. In this context, the development and implementation of efficient cooling systems that minimize energy costs is of particular importance.

Objective: The aim of the work is to reduce the power consumption of a compressor unit.

The main tasks include:

- analysis of compressor operating modes;
 - calculation and selection of compressor unit equipment;
 - calculation of energy consumption for cooling in different operating modes;
 - development of a system for automatic control of the cooling performance of a compressor unit depending on the load and cooling conditions.
- Development of a startup project.

Object of research: compressed air production process

Subject of research: water cooling system of a compressor unit

Keywords: compressor, cooling system, energy consumption, optimization.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ІНФОРМАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ	10
1.1 Напрями підвищення енергоефективності компресорної установки.....	10
1.2 Аналіз існуючих систем охолодження компресорних установок	13
1.3 Патентний пошук	20
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ.....	25
2.1 Технологічний процес виробництва стисненого повітря	25
2.2. Розрахунок та вибір обладнання компресорної установки	27
2.3. Розрахунок та вибір параметрів системи охолодження.....	31
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КОМПРЕСОРНОЮ УСТАНОВКОЮ	36
3.1 Режими роботи компресорної установки	36
3.2 Вибір обладнання для автоматизованої системи управління	38
3.3 Визначення витрат електричної енергії при роботі компресорної установки	48
3.4 Задача оптимізації електроспоживання компресорною установкою	53
3.6 Розробка алгоритму керування насосною компресорною установкою	56
РОЗДІЛ 4 . СТАРТАП	62
4.1 Опис ідеї проєкту	62
4.2 Аналіз конкурентного середовища	63
4.3 Аналіз цільової аудиторії	65
4.4 Аналіз ринкових можливостей	66
4.5 Фінансове обґрунтування проєкту	68
4.6 Розроблення бізнес-моделі та маркетингового плану стартап-проєкту.....	69
4.7 Бізнес-модель	71
Висновки по роботі.....	75
Перелік джерел.....	76

ВСТУП

Сучасна промислова експлуатація компресорної установки супроводжується значним споживанням енергії, велика частина якої припадає на систему охолодження. При стисненні газу виділяється значна кількість тепла, яке необхідно ефективно відводити для забезпечення стабільності роботи пристрою, продовження терміну служби і запобігання нещасних випадків. Однак традиційний метод охолодження, часто застосовуваний при установці компресорів, має певні недоліки, в тому числі великі енерговитрати.

Оптимізація режиму роботи системи охолодження є важливим завданням для зниження енергоспоживання. Зниження енергоспоживання можливе за рахунок впровадження інноваційного підходу до регулювання температури, адаптації роботи обладнання до умов змінного навантаження та температур, а також використання сучасних технічних рішень. Серед таких підходів особливе місце займає автоматизація контролю температури і впровадження алгоритмів динамічного регулювання параметрів охолодження.

Дослідження та вдосконалення методів охолодження на основі критерію мінімального енергоспоживання є важливим як з точки зору енергоефективності, так і з точки зору економічної життєздатності. Вартість енергетичних ресурсів можна знизити, щоб знизити експлуатаційні витрати, підвищити конкурентоспроможність виробництва та гарантувати екологічну стійкість — усе це є критично важливими складовими сучасного промислового розвитку.

У цьому дослідженні розглядаються основи оптимізації системи охолодження компресорного агрегату, а також вплив передових технологій на енергозбереження. Особлива увага приділяється аналізу теплових режимів роботи компресорів, впровадженню автоматизованих систем керування, які дозволяють знизити витрати на електроенергію без шкоди для ефективності системи охолодження.

Коли йдеться про підвищення ефективності систем охолодження, важливо зосередитись на адаптивних алгоритмах керування, які дозволяють коригувати параметри системи охолодження на основі реальних умов роботи компресорної

установки. Ці алгоритми розроблені для обробки даних у реальному часі та дозволяють автоматично коригувати температуру охолоджуючої рідини, швидкість вентилятора та обертання насоса, серед інших параметрів. Це гарантує адаптивність системи та запобігає надмірному споживанню енергії в періоди низького попиту.

Метою цього дослідження є знайти найкращий баланс між ефективністю компресорної установки та витратами, пов'язаними з енергоспоживанням. У цьому контексті вкрай важливо враховувати не лише технічні чинники, а й економічні міркування, такі як витрати, пов'язані з впровадженням та обслуговуванням сучасних систем охолодження. Вибір найкращого рішення визначається унікальними характеристиками виробничого процесу, режимами роботи компресорної установки, наявністю енергоресурсів і необхідністю стабільної роботи.

Як наслідок, пошук найбільш ефективного способу роботи систем охолодження з метою мінімізації енергоспоживання є критично важливим завданням. Вирішивши цю проблему, можна підвищити енергоефективність компресорних установок, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити екологічну стійкість. Ця тема важлива як для науковців, так і для практиків, оскільки розглядає сучасні виклики економічного розвитку та зростаючу потребу в енергозбереженні в різних галузях промисловості.

Актуальність: У зв'язку зі зростанням вартості енергії, вищими цінами та суворішими екологічними нормами промисловим підприємствам необхідно знайти способи зробити свої процеси ефективнішими, особливо коли йдеться про використання компресорних установок. Компресори відіграють вирішальну роль у багатьох виробничих системах, але вони також споживають багато енергії. Системи охолодження відіграють вирішальну роль у збереженні стабільності обладнання та запобіганні його перегріву.

Мета роботи. Задачі. Метою роботи є зниження електроспоживання компресорною установкою.

Основні завдання включають:

- аналіз режимів роботи компресора;
- розрахунок та вибір обладнання компресорної установки;
- розрахунок енерговитрат на охолодження при різних режимах роботи;
- розробка системи автоматичного керування продуктивністю

охолодження компресорної установки в залежності від навантаження та умов охолодження.

Об'єкт дослідження: процес виробництва стисненого повітря

Предмет дослідження: система водяного охолодження компресорної установки

РОЗДІЛ 1. ІНФОРМАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ

1.1 Напрями підвищення енергоефективності компресорної установки

1.1.1 Основні фактори, що впливають на енергоефективність систем охолодження

Теплове навантаження на систему. Одним із головних факторів є кількість тепла, яке необхідно відвести від компресора. Чим більше теплове навантаження, тим більші енергетичні витрати на його відведення.

Тип компресора та робочого середовища. Різні типи компресорів (поршневі, гвинтові, відцентрові) мають різні характеристики тепловиділення. Робоче середовище (повітря, газ, рідини) також впливає на ефективність процесу охолодження [1].

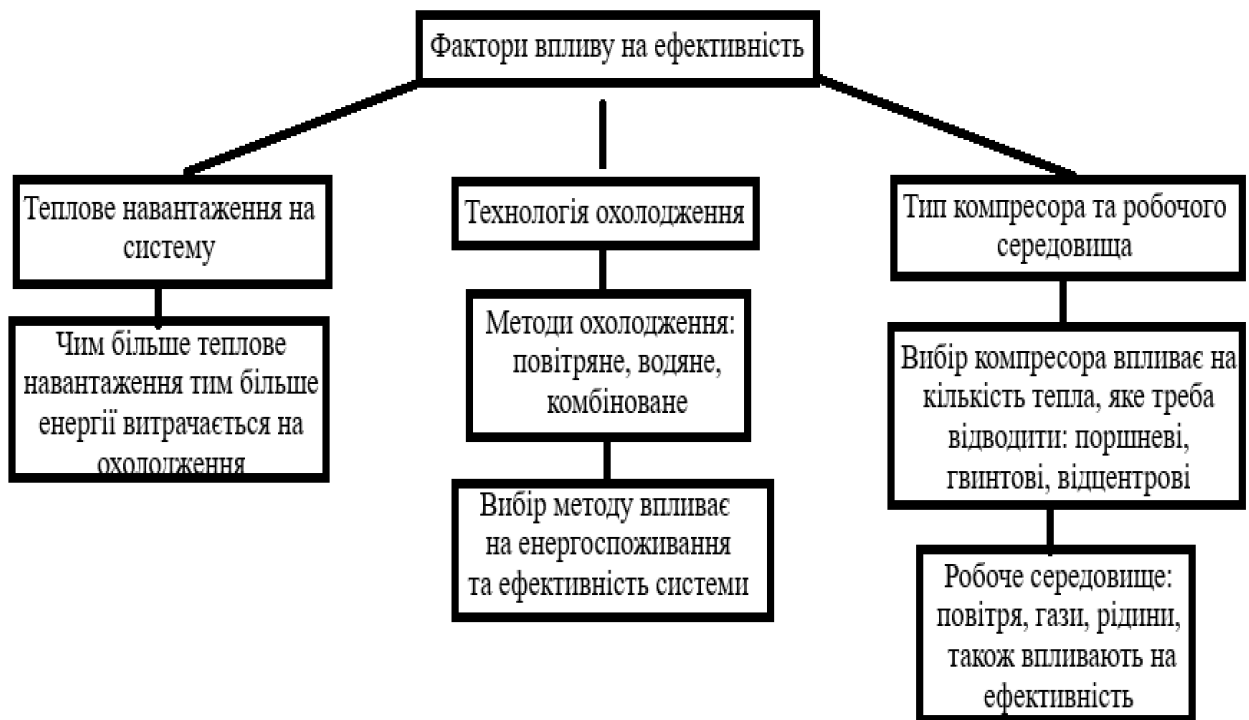


Рис.1.1 Схема основних факторів впливу

Технологія охолодження. Існує кілька методів охолодження компресорів: повітряне, водяне, комбіноване. Вибір методу впливає на споживання енергії та

ефективність системи в цілому [2]. Результати аналізу чинників наведено на рисунку 1.1.

1.1.2 Шляхи підвищення енергоефективності компресорних установок

Рекуперация тепла. Одним із найбільш перспективних методів підвищення енергоефективності системи охолодження компресорних установок є використання рекуператії тепла. Під час роботи компресорів виділяється значна кількість теплової енергії, яка фактично просто розсіюється в навколишньому середовищі. Впровадження системи рекуператії дозволяє використовувати це тепло для обігріву приміщень, підігріву води або інших технологічних процесів. Наприклад, тепло може бути спрямоване на підготовку гарячої води для побутових чи промислових потреб, або на попередній підігрів сировини у виробничому процесі. Це дозволяє зменшити потребу в додаткових джерелах енергії та, як наслідок, знизити загальні витрати. Завдяки рекуператії тепла енергоефективність установки може підвищитися на 10-20% [3].

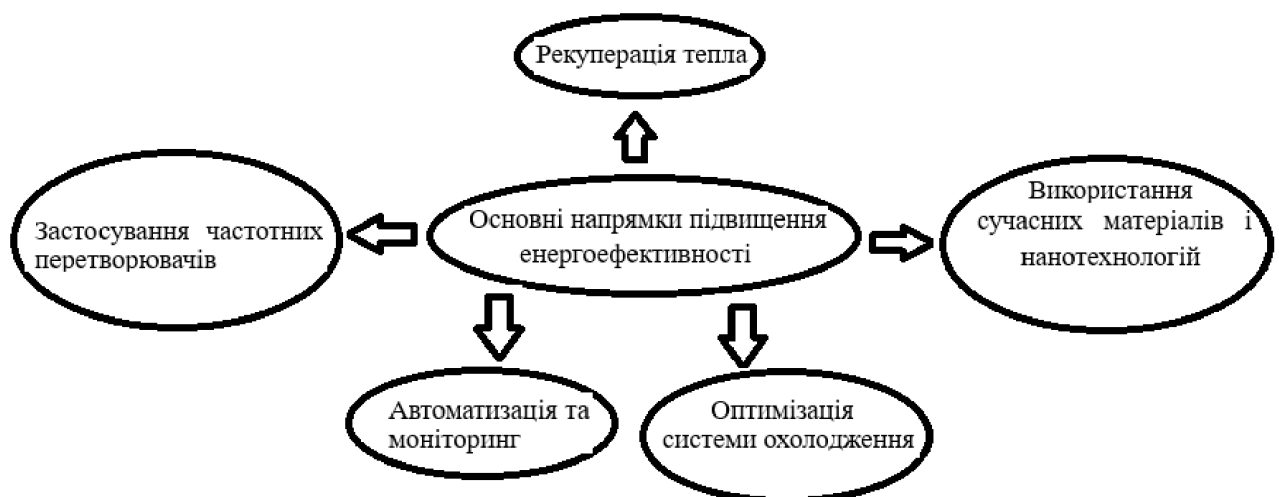


Рис.1.2 Схема основних напрямків підвищення енергоефективності

Оптимізація системи охолодження. Система охолодження компресорної установки з термодинамічної точки зору призначена для зниження температури

робочого газу після стискання. Під час компресії газ нагрівається, а за законом ідеальних газів, при високій температурі збільшується об'єм газу при фіксованому тиску. Це потребує більше енергії для подальшого стискання. Охолодження газу між етапами компресії зменшує його об'єм, знижуючи ентальпію та зменшуючи витрати енергії на подальше стискання. Це покращує ефективність роботи компресора, зменшуючи енергозатрати на наступних етапах стиснення [4, 5].

Ефективність системи охолодження багато в чому залежить від правильного вибору та регулювання таких параметрів, як температура охолоджувальної рідини, тиск у системі та швидкість потоку. Важливо підібрати оптимальні значення для цих параметрів, щоб зберегти необхідний рівень охолодження при мінімальних витратах енергії. Наприклад, система може автоматично знижувати температуру охолоджувальної рідини, якщо компресор працює при нижніх навантаженнях, або підвищувати тиск тільки тоді, коли це необхідно. Така гнучкість в управлінських параметрах дозволяє зменшити енерговитрати без втрати продуктивності чи безпеки роботи компресорної установки. Оптимізація параметрів охолодження може підвищити енергоефективність на 8-12% [6].

Використання сучасних матеріалів і нанотехнологій. Застосування нових матеріалів з підвищеною теплопровідністю та низьким тертя може значно знизити кількість тепла, яке виділяється під час роботи компресорів. Крім того, використання наноматеріалів у мастильних рідинах може покращити охолоджувальні властивості системи. Це дозволяє знизити теплове навантаження на компресор і, відповідно, зменшити споживання енергії [7].

Застосування частотних перетворювачів. Частотні перетворювачі дозволяють регулювати швидкість обертання електродвигунів насосів і вентиляторів, що вимагає для циркуляції охолоджувальної рідини та повітря. Така можливість дозволяє адаптувати роботу системи охолодження до поточних умов використання компресора, зменшуючи непотрібне споживання електроенергії. Наприклад, при частковому навантаженні компресора можна зменшити швидкість обертання вентиляторів або насосів, що істотно зменшує витрати енергії на охолодження. Частотні перетворювачі також дозволяють уникати пікових

навантажень на електромережу при запуску обладнання, що також сприяє загальному підвищенню енергоефективності. Застосування частотних перетворювачів дозволяє знизити витрати на охолодження на 15-25% [7].

Автоматизація та моніторинг систем охолодження. Сучасні системи автоматизації та моніторингу здатні значно підвищити енергоефективність системи охолодження. Вони зможуть в режимі реального часу аналізувати роботу компресорної установки та системи охолодження, виявляючи будь-які аномалії або непотрібні витрати енергії. Автоматичне регулювання параметрів на основі даних із сенсорів дозволяє оперативно регулювати зміни умов робочого середовища та коригувати роботу системи охолодження відповідно до потреб компресора. Це мінімізує витрати енергії, покращує стабілізує роботу обладнання та зменшує ризики поломок або аварійних ситуацій. Впровадження систем автоматизації підвищує енергоефективність на 5-10% [8].

1.2 Аналіз існуючих систем охолодження компресорних установок

1.2.1 Системи водяного охолодження

Водяне охолодження компресорної установки — це система, яка активно використовується для зниження температури обладнання, особливо у випадках, коли компресори працюють під великими навантаженнями. Нижче наведено детальніший опис цієї системи, її компонентів, принципів роботи, переваг і недоліків.

Принцип роботи водяного охолодження компресорної установки. Компресори виділяють значну кількість тепла під час стиснення газів, особливо коли працюють безперервно. Вода, маючи високу теплопровідність і теплоємність, ідеально підходить для відведення тепла. Система водяного охолодження компресора функціонує як замкнений контур, де охолоджувальна вода циркулює через компресор та теплообмінник, відводячи надлишкове тепло.

Охолоджувальна вода подається до компресора через насос і охоплює ключові ділянки, які зазвичай схильні до нагрівання (циліндри, головки компресора, корпус). Вода забирає тепло від нагрітих частин компресора і транспортує його до теплообмінника. Теплообмінник віддає тепло води в навколишнє середовище (через радіатори або охолоджувальні башти) або у вторинний контур. Охолоджена вода знову циркулює до компресора, забезпечуючи безперервний процес відведення тепла.

Основні компоненти системи водяного охолодження. Насос для циркуляції води — забезпечує необхідний тиск для циркуляції води через усі елементи системи.

Теплообмінник — призначений для передачі тепла від охолоджувальної води в навколишнє середовище. Залежно від потреб системи, використовуються різні типи теплообмінників:

Пластинчасті — компактні, підходять для великих теплових навантажень;

Трубчасті — стійкі до високих температур і тиску;

Радіаторні або повітряні — ефективні для охолодження в невеликих системах.

Система фільтрації води — захищає від утворення накипу і забруднень. Фільтри важливі для попередження корозії трубопроводів та внутрішніх компонентів системи.

Регулююча система та датчики температури — для контролю температури охолоджувальної води. Датчики температури забезпечують автоматичне регулювання кількості охолоджувальної води, яка подається на компресор.

Переваги водяного охолодження компресорів:

1. Висока ефективність охолодження. Завдяки хорошій теплопровідності, вода здатна швидко відводити тепло, забезпечуючи стабільну температуру роботи компресора. Це особливо важливо для потужних і промислових компресорів.

2. Довговічність обладнання. Постійне охолодження запобігає перегріву, знижує зношення і подовжує термін експлуатації компресорних вузлів.

3. Повторне використання води. У закритих системах вода циркулює в контурі та повторно використовується після охолодження, що економить витрати на воду і знижує вплив на довкілля.

4. Зниження шуму. У порівнянні з повітряним охолодженням, водяне охолодження працює тихіше, що робить його зручнішим для роботи у закритих приміщеннях.

Недоліки водяного охолодження компресорів:

1. Високі витрати на встановлення. Система водяного охолодження є більш складною і вимагає значних витрат на закупівлю та монтаж насосів, теплообмінників, трубопроводів.

2. Ризик корозії та накипу. Якщо вода містить домішки, це може призвести до корозії або утворення накипу в системі. Для вирішення цієї проблеми використовуються спеціальні фільтри або система хімічної підготовки води.

3. Технічне обслуговування. Система водяного охолодження потребує регулярного обслуговування: очищення фільтрів, перевірки трубопроводів та теплообмінників. Наявність багатьох компонентів також збільшує ймовірність збоїв.

4. Залежність від якості води. Забруднена вода може пошкодити теплообмінник і внутрішні компоненти компресора, тому необхідно використовувати очищену або демінералізовану воду, що збільшує витрати на експлуатацію.

1.2.2 Системи повітряного охолодження

Повітряне охолодження компресорної установки є одним із найпоширеніших способів зниження температури компресора, особливо в умовах, коли доступ до водних ресурсів обмежений або система не потребує надзвичайно потужного охолодження. Така система використовує потоки повітря для відведення тепла, яке виділяється під час роботи компресора.

Принцип роботи повітряного охолодження компресорної установки. У процесі стиснення газів компресор виділяє багато тепла. Повітряне охолодження базується на принципі теплообміну між нагрітими частинами компресора і навколишнім повітрям, що проходить крізь спеціальні охолоджувальні елементи або безпосередньо контактує з корпусом компресора. Під час роботи компресора вентилятори направляють потік повітря через охолоджуючі ребра або через радіатор, в якому нагріте повітря відводить тепло. Повітряний потік забезпечується вентиляторами, які створюють потужний потік, що проходить через систему радіаторів або ребер на корпусі компресора.

Тепловідведення здійснюється за допомогою радіаторів, розміщених поблизу нагрітих елементів компресора. Ребра збільшують площу поверхні, забезпечуючи швидше охолодження. Розсіювання тепла в навколишнє середовище відбувається без використання будь-яких рідин, що дозволяє уникнути витрат на охолоджувальну воду і системи фільтрації.

Основні компоненти системи повітряного охолодження.

Вентилятори. Це ключові елементи, які забезпечують рух повітря через охолоджувальні елементи компресора. Вентилятори можуть бути різної потужності, залежно від розмірів компресора і обсягу тепла, яке потрібно відводити.

Охолоджувальні ребра. Це елементи, що прикріплені до корпусу компресора або встановлені у радіаторі. Ребра виготовляються з матеріалів з високою теплопровідністю, таких як алюміній або мідь, для збільшення площі контакту з повітрям.

Радіатор. Деякі системи використовують повітряний радіатор, через який проходить повітряний потік для відведення тепла. Радіатор складається з ряду тонких пластин, що максимально збільшують площу теплообміну.

Захисні решітки. Використовуються для захисту лопатей вентилятора від пошкоджень і для безпеки персоналу, оскільки лопаті можуть обертатися на великій швидкості.

Контроль температури. Датчики температури можуть встановлюватися на компресорі, щоб контролювати рівень нагріву і при необхідності регулювати потужність вентиляторів.

Переваги повітряного охолодження компресорів.

Низькі експлуатаційні витрати. Повітряне охолодження не потребує води, тому система є більш економічнішою в експлуатації. Це особливо важливо в умовах, де доступ до водних ресурсів обмежений або дорогий.

Відсутність ризику корозії та накипу. Оскільки система не використовує воду, вона не схильна до утворення накипу або корозії, що спрощує технічне обслуговування і знижує витрати на його проведення.

Компактність. Система повітряного охолодження не вимагає додаткового обладнання для водяного контуру, такого як насоси, теплообмінники або фільтри, тому займає менше місця і простіша в монтажі.

Надійність і простота обслуговування. Повітряна система охолодження є простішою, тому потребує меншого обсягу обслуговування і має менше частин, які можуть зламатися.

Екологічність. Відсутність необхідності в охолоджувальній воді робить систему більш екологічною, оскільки не відбувається додаткового витратного використання ресурсів.

Недоліки повітряного охолодження компресорів.

Обмежена ефективність. Повітряне охолодження менш ефективне, ніж водяне, особливо при високих навантаженнях. В умовах інтенсивного тепловиділення повітря може не забезпечувати достатньо швидке відведення тепла.

Залежність від температури навколишнього середовища. У жарких умовах ефективність повітряного охолодження значно знижується, оскільки повітря не може ефективно відводити тепло. Це може призвести до перегріву компресора.

Підвищений рівень шуму. Вентилятори, що працюють на великих швидкостях, можуть створювати додатковий шум, що може бути небажаним у робочих приміщеннях або закритих просторах.

Необхідність забезпечення циркуляції повітря. У приміщеннях з обмеженою вентиляцією повітряне охолодження може бути неефективним, тому потрібна додаткова система вентиляції.

Великі витрати енергії на роботу вентиляторів. Для ефективного охолодження потужних компресорів потрібні вентилятори з високою продуктивністю, що споживає більше енергії.

1.2.3 Системи масляного охолодження

Масляне охолодження компресорної установки є методом, який широко використовується для зниження температури компресорів, особливо у випадках, коли компресор працює в умовах високих навантажень і виділяє значну кількість тепла. Ця система використовує масло як охолоджувальну і одночасно змащувальну рідину, що дозволяє ефективно відводити тепло і знижувати тертя між рухомими частинами компресора.

Принцип роботи масляного охолодження компресорної установки.

Масляне охолодження компресора передбачає циркуляцію масла через нагріті частини компресора. Під час роботи компресора масло проходить через компресорний блок, поглинає тепло від нагрітих деталей і потім переміщується до теплообмінника, де охолоджується. Охоложене масло знову циркулює до компресора, забезпечуючи безперервний процес охолодження і змащування.

Циркуляція масла. Спеціальний насос забезпечує циркуляцію масла через нагріті компоненти компресора, такі як циліндри, поршні та вали, де відбувається активне тертя і нагрівання.

Поглинання тепла. Масло поглинає тепло, знижуючи температуру деталей компресора і одночасно змащуючи їх.

Охолодження масла в теплообміннику. Нагріте масло надходить у теплообмінник (радіатор), де охолоджується за допомогою повітря або води.

Рециркуляція. Охоложене масло знову надходить до компресора, і процес повторюється.

Основні компоненти системи масляного охолодження. Насос для циркуляції масла. Забезпечує циркуляцію масла через компресор, підтримуючи постійний потік для ефективного охолодження і змащення.

Теплообмінник (радіатор). Призначений для охолодження масла перед тим, як воно знову повертається в компресор. Може бути повітряного або водяного типу:

Повітряний теплообмінник охолоджується за рахунок проходження потоку повітря через радіатор;

Водяний теплообмінник використовує воду для більш інтенсивного охолодження масла.

Фільтри для очищення масла. Забезпечують очищення масла від забруднень і домішок, які можуть накопичуватися під час роботи компресора і впливати на змащувальні властивості.

Резервуар для масла. Зберігає запас масла для системи і дозволяє підтримувати оптимальний рівень рідини.

Датчики температури і тиску. Використовуються для контролю температури масла і тиску в системі, що дозволяє своєчасно виявити можливі збої та уникнути перегріву.

Переваги масляного охолодження компресорів.

Ефективність охолодження і змащування. Масляне охолодження забезпечує відведення тепла від нагрітих частин компресора і одночасно змащує рухомі деталі, знижуючи тертя і знос.

Підвищення надійності і довговічності. Постійне змащення і охолодження знижують ризик зносу і пошкодження, що подовжує термін служби компресора.

Стабільність при високих навантаженнях. Масляне охолодження є стійким до високих температур, тому підходить для компресорів, які працюють при значних навантаженнях.

Плавна і стабільна робота компресора. Змащення деталей забезпечує плавний рух, зменшуючи рівень шуму та вібрації під час роботи компресора.

Недоліки масляного охолодження компресорів.

Складність системи і необхідність технічного обслуговування. Масляне охолодження потребує додаткових компонентів, таких як насоси, теплообмінники, фільтри, що ускладнює систему і вимагає регулярного обслуговування.

Витрати на заміну і очищення масла. Масло необхідно регулярно замінювати і очищувати від забруднень. Це потребує витрат на нове масло, фільтри та обслуговування.

Ризик забруднення компресора. Забруднене масло або неякісна фільтрація можуть призвести до забруднення внутрішніх компонентів компресора, що може викликати зниження продуктивності і навіть поломки.

Можливість протікання. Протікання масла може призвести до забруднення навколишнього середовища, а також втрати тиску і теплових властивостей, що порушить ефективність системи.

1.3 Патентний пошук

В патенті [16] представлено компресорну установку (рис. 1.3), яка щонайменше має:

- гвинтовий компресор (2) з камерою (3) стиснення, утвореною корпусом (4) компресора, в якій змонтовано з можливістю обертання пару зчеплених роторів (5, 6) компресора у формі гвинтів; двигун (10), який має камеру (12) двигуна, утворену корпусом (11) двигуна, в якій змонтовано з можливістю обертання вал (13) двигуна, який приводить в обертання щонайменше один із зазначених двох роторів (5, 6) компресора;

- вхідний отвір (24) у гвинтовий компресор (2) для подачі повітря;

- вихідний отвір (26) у гвинтовому компресорі (2) для випуску стисненого повітря, та який з'єднано з резервуаром (32) високого тиску вихідною трубою (31);

- вихідний отвір (34) для повітря на резервуарі (32) високого тиску для подачі стисненого повітря від резервуара (32) високого тиску користувачу;

- регулюючу систему (30) для регулювання одного або більше рідинних або газових потоків в компресорній установці (1); причому зазначена регулююча система (30) має:

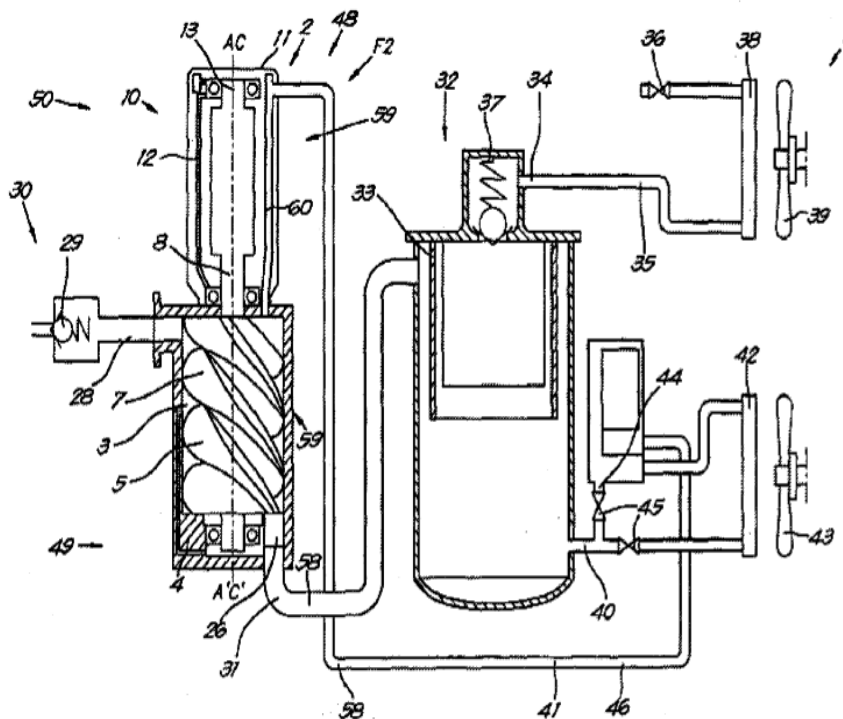


Рис.1.3 Схема компресорної установки

- вхідний клапан (29) на вхідному отворі (24) гвинтового компресора (2);
і кран або клапан (36) для перекриття і відкриття вихідного отвору (34) для повітря резервуара (32) високого тиску, яка відрізняється тим, що корпус (4) компресора і корпус (11) двигуна з'єднано безпосередньо один з одним, утворюючи корпус (48) компресора, причому камера (12) двигуна і камера (3) стиснення не ізольовані одна від одної, і тому вихідна труба (31) між резервуаром (32) високого тиску і гвинтовим компресором (2) не має засобів перекриття для забезпечення течії по вихідній трубі (31) в обох напрямках, і тим, що гвинтовий компресор (2) є вертикальним гвинтовим компресором (2), в якому два ротори (5, 6) компресора мають роторні вали (8, 9), що простягаються в першому аксіальному напрямку

(AA) і другому аксіальному напрямку (BB), а вал (13) двигуна простягається в третьому аксіальному напрямку (CC'), причому зазначені аксіальні напрямки (AA', BB', CC') роторів (5, 6) компресора і вала (13) двигуна є вертикальними під час нормальної роботи гвинтового компресора (2).

В патенті [17] показано систему охолодження (рис. 1.4), що містить:

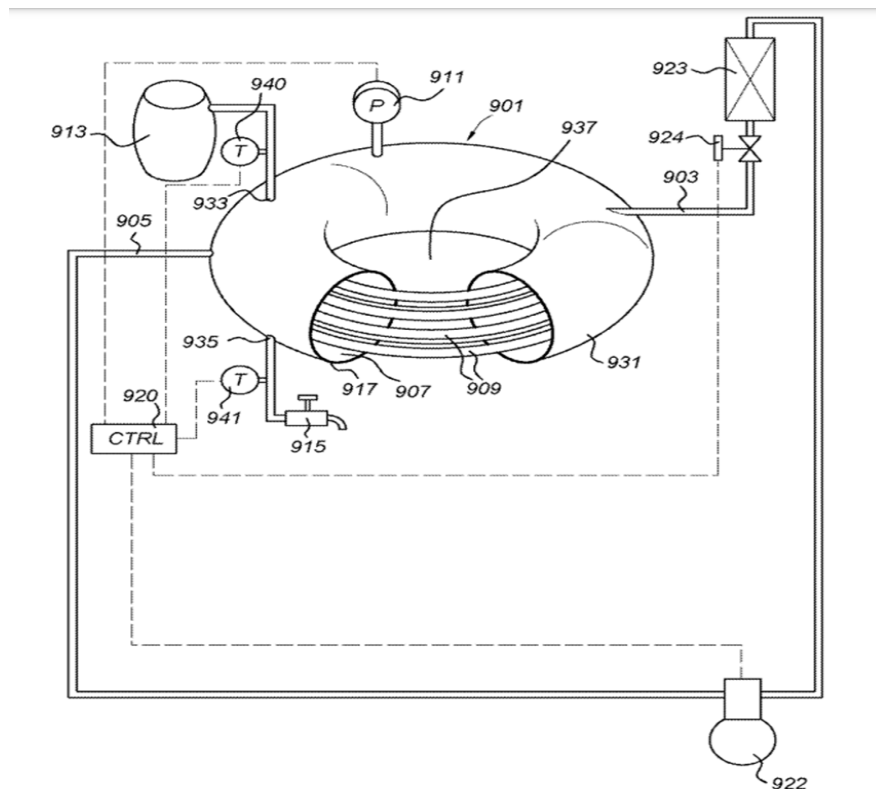


Рис.1.4 Схема системи охолодження, що містить засоби керування тиском

компресор; конденсатор; клапан розширення; та теплообмінник, що містить: камеру для утримання холодоагенту, причому камера має внутрішній простір, обмежений закритою поверхнею стінки камери, також камера містить вхідний отвір та вихідний отвір для транспортування холодоагенту у внутрішній простір та з внутрішнього простору через стінку камери, та трубку, що принаймні частково розташована у внутрішньому просторі, де перший кінець трубки прикріплений до першого отвору стінки камери, а другий кінець трубки прикріплений до другого отвору стінки камери, щоб забезпечувати течію рідини у трубку та/або з трубки через перший отвір та другий отвір; де камера теплообмінника з'єднана з

компресором, конденсатором та клапаном розширення за допомогою вхідного отвору та вихідного отвору, формуючи принаймні один холодильний цикл, в якому теплообмінник є випарником, яка відрізняється тим, що містить засоби керування тиском, сконфігуровані для виявлення необхідності збільшення теплообміну, базуючись на виміряній температурі рідини у трубці на першій стороні трубки й/або базуючись на кількості газоподібного холодоагенту, що переміщується від камери до компресора, та з можливістю керування тиском холодоагенту у внутрішньому просторі у відповідь на виявлену необхідність збільшення теплообміну; причому закрита поверхня стінки камери теплообмінника представляє отвір, що повністю проходить через камеру, де трубка має принаймні один оберт навколо частини стінки зазначеної стінки камери, причому ця частина стінки визначає зазначений отвір.

Висновки до розділу 1

Енергоефективність систем охолодження компресорних установок залежить від багатьох факторів, таких як теплове навантаження, тип компресора, вибір охолоджувальної технології, а також умови експлуатації. Основними шляхами підвищення енергоефективності є рекуперація тепла, оптимізація параметрів системи охолодження, застосування сучасних матеріалів і технологій, використання частотних перетворювачів та впровадження автоматизованих систем моніторингу.

Використання різних методів охолодження, зокрема водяного, повітряного та масляного, має свої переваги та недоліки, що визначають їх застосовність у конкретних умовах. Водяне охолодження є високоефективним, але потребує додаткових витрат на установку та обслуговування. Повітряне охолодження, навпаки, простіше у впровадженні, але менш ефективно при великих теплових навантаженнях. Масляне охолодження поєднує охолодження і змащення, що робить його оптимальним вибором для важких умов експлуатації.

Для покращення енергоефективності роботи компресорних установок доцільне застосування частотних перетворювачів та використання автоматизованих систем моніторингу охолодження, що дозволить знизити енергетичні витрати на виробництво стисненого газу.

РОЗДІЛ 2. Розрахунок та вибір електромеханічного комплексу компресорної установки

2.1 Технологічний процес виробництва стисненого повітря

Охолодження компресорної установки є найважливішим технологічним процесом, який гарантує її ефективність, безперебійну роботу та тривалий термін служби. Під час стиснення газів або повітря виділяється значна кількість тепла, що вимагає швидкого видалення цього тепла, щоб запобігти перегріву, пошкодженню обладнання та потенційним аварійним ситуаціям. Актуальність дослідження систем охолодження в промисловості посилюється необхідністю вирішення цього завдання.

Компресорні установки працюють у різних середовищах, що вимагає адаптації систем охолодження до коливань температури, навантаження та режимів роботи. Основним завданням досліджень є удосконалення технологічних процесів з метою підтримки стабільного температурного режиму при мінімізації енерговитрат.

У реальних сценаріях часто використовуються дві основні системи охолодження: повітряна та водяна. Радіатори використовуються в мобільних і малопотужних компресорах для полегшення теплообміну шляхом охолодження повітря. Водяне охолодження більш ефективно для великих промислових установок, оскільки вода має високу теплоємність. Закриті водяні системи з рециркуляцією дозволяють скоротити споживання води, тоді як прямоочні системи використовуються в ситуаціях, коли є достатній запас теплоносія.

Вивчення процесів охолодження заглиблюється в такі області, як аналіз теплового потоку, оптимізація конструкцій теплообмінника та вдосконалення систем рециркуляції води. Одним із сучасних підходів є використання математичного моделювання, яке дозволяє досліджувати гідродинамічні та термічні процеси без потреби в дорогих експериментах. Зокрема, моделювання допомагає визначити ідеальні параметри для насосів, швидкість циркуляції води та ефективність теплообміну.

Особливу увагу приділено автоматизації процесу охолодження. Використовуючи датчики температури, тиску та потоку води, ви можете динамічно змінювати параметри охолодження в режимі реального часу залежно від робочого навантаження компресора. Це зменшує споживання енергії та ймовірність перегріву, а також підвищує загальну надійність системи.

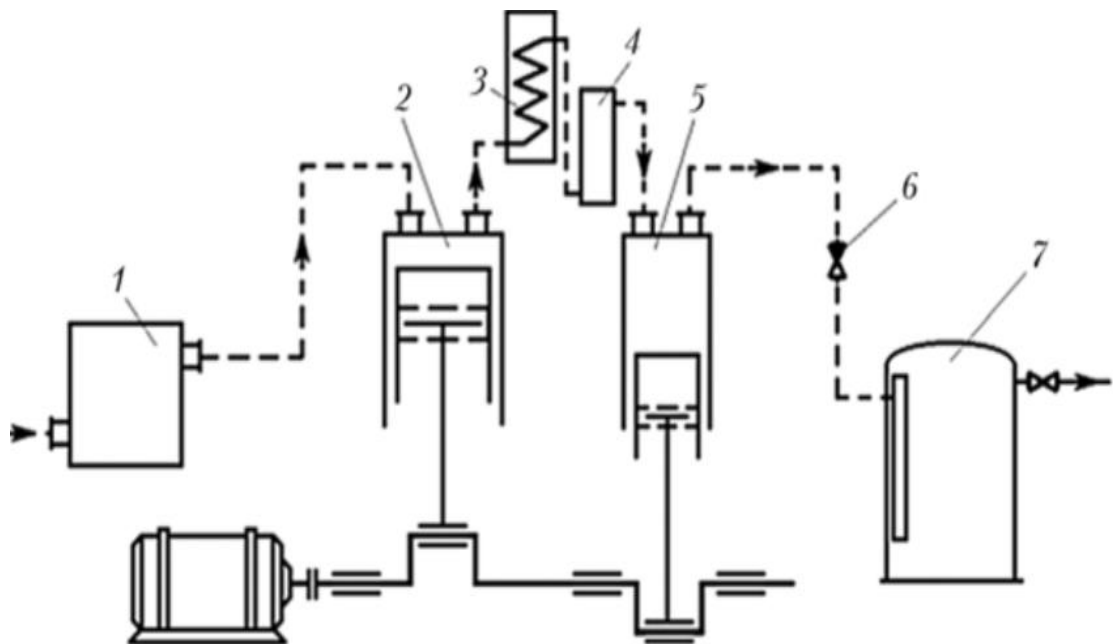


Рис.2.1 Схема компресорної установки з двоступінчастим поршневым компресором: 1-вхідний фільтр, 2-компресор першого ступеня, 3-проміжний охолоджувач, 4-вологовідділювач, 5-компресор другого ступеня, 6-зворотній клапан, 7-резервуар для зберігання стисненого повітря.

На схемі зображено двоступеневий процес стиснення повітря, що включає очищення, двоступеневе стиснення, охолодження, осушення та зберігання стисненого повітря. Спочатку повітря втягується у вхідний фільтр, де воно очищається від пилу та домішок, щоб запобігти забрудненню обладнання. Далі очищене повітря надходить у компресор першого ступеня, де стискається до проміжного тиску. Після цього стиснене повітря проходить через проміжний охолоджувач, який знижує його температуру, підвищуючи ефективність наступного ступеня стиснення та зменшуючи навантаження на компресор другого

ступеня. Під час цієї фази охолодження утворюється конденсат, який витягується за допомогою сепаратора вологи, щоб захистити систему від проблем, пов'язаних з вологою. Нарешті, охолоджене та осушене повітря направляється в компресор другого ступеня, де воно досягає кінцевого тиску.

Для підтримки стабільності тиску встановлюється зворотний клапан, який зупиняє повернення стисненого повітря в систему, коли компресор припиняє роботу. Останній етап передбачає подачу стисненого повітря в резервуар, який служить для накопичення повітря, стабілізації тиску та забезпечення постійної подачі стисненого повітря для користувачів. Вся ця установка забезпечує ефективний двоступеневий процес стиснення, що включає регулювання температури, відведення вологи та надійну роботу для подальшого використання стисненого повітря в різноманітних технологічних застосуваннях.

2.2. Розрахунок та вибір обладнання компресорної установки

2.2.1 Розрахунок витрат стисненого повітря компресора

Для розрахунку компресора використовуємо схему цеху наведену на рис.2.2

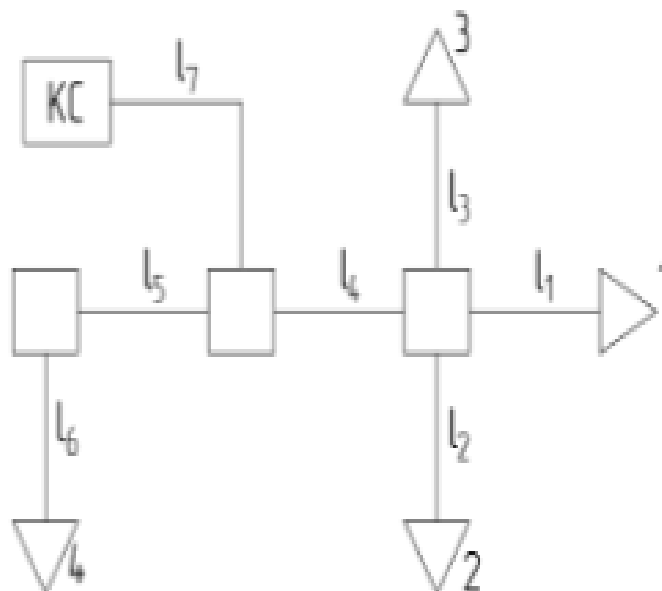


Рис.2.2 Схема пневматичної мережі цеху

Параметри системи для навантаження на пневматичну мережу наведено у таблиці 2.1.

Табл. 2.1 Обладнання яке живиться від пневматичної установки

	Тип споживача	Номинальні параметри		Коефіцієнт		
		Робочий тиск, МПа	Витрата повітря, м ³ /с	використання	спрацювання	завантаження
1	2	3	4	5	6	7
1	Розчинонагнітач РН-1, С0-12Б	0,6...0,8	0,04	0,8	1,0	0,7
2	Породонавантажувальна машина ППН-1с	0,5	0,2	0,9	1,1	0,9
3	Бурова установка: НКР-100М	0,6	0,02	0,5	1,15	0,7
4	УБШ-57/Д-1	0,5	0,17	0,5	1,15	0,5
5	УБШ-53/Д-3	0,5	0,5	0,7	1,0	0,8
6	Відбійний молоток МО-5П, МО-6П, МО-7П	0,3...0,5	0,025	0,75	1,15	1,1
7	Молоток рубильний Р-1	0,5	0,01	0,8	1,2	0,9
8	Пневмозбовтувачі ПГС-1	0,5	0,02	0,3	1,6	0,4
9	Перворатори ПР-20, ПР-27	0,4	0,03	0,5	1,15	0,8

Розміри ділянок пневматичної мережі у відповідності до рисунку 2.2 складають: L1=200м; L2=360м; L3=350м; L4=270м; L5=480м; L6=840м; L7=540м.

Продуктивність компресорної станції

$$V_k = V_{\text{пр}} + \Delta V_{\text{втр}} = 2,847 + 0,253 = 3,1185 \frac{\text{М}^3}{\text{С}}$$

Об'єм стисненого повітря, що споживається споживачами пневматичної енергії

$$V_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot n_i \cdot \psi_i \cdot k_i = 1 * 0,13 * 0,9 * 1,2 + 3 * 0,2 * 0,7 * 1,15 + 4 * 0,5 * 0,8 * 1 + 4 * 0,025 * 1,1 * 1,15 + 28 * 0,01 * 0,9 * 1,2 + 4 * 0,04 * 0,9 * 1,2 + 1 * 0,02 * 0,4 * 1,6 + 1 * 0,03 * 0,8 * 1,15 = 2,8655 \frac{\text{М}^3}{\text{С}}$$

Втрати системного повітря в пневматичній мережі через її нещільність

$$\Delta V_{\text{втр}} = \frac{a}{60} \sum_{i=1}^n l = \frac{300}{3600} (200 + 360 + 350 + 270 + 480 + 840 + 540) * 10^{-3}$$

$$= 0,253 \frac{\text{М}^3}{\text{С}}$$

2.2.2 Розрахунок тиску стисненого повітря

Тиск, необхідний для першого пункту споживання

$$P_1 = (P_{\text{пр1}} + \Delta P_1) = (0,6 + 0,101) = 0,701 \text{ МПа}$$

$$\Delta P_1 = \Delta p \cdot L_1 = 0,1 \cdot 1,010 = 0,101 \text{ МПа}$$

$$L_1 = l_7 + l_4 + l_1 = 1,010 \text{ км}$$

де Δp - питомі втрати тиску на 1 км трубопроводу;

$P_{\text{пр}}$ - робочий тиск;

ΔP - допустимі втрати тиску мережі.

Тиск, необхідний для другого пункту споживання

$$P_2 = (P_{\text{пр2}} + \Delta P_2) = (0,5 + 0,234) = 0,734 \text{ МПа}$$

$$\Delta P_2 = \Delta p \cdot L_2 = 0,2 \cdot 1,170 = 0,234 \text{ Мпа}$$

$$L_2 = l_7 + l_4 + l_2 = 1,170 \text{ км}$$

де Δp - питомі втрати тиску на 1 км трубопроводу;

$P_{\text{пр}}$ - робочий тиск;

ΔP - допустимі втрати тиску мережі.

Тиск, необхідний для третього пункту споживання

$$P_3 = (P_{\text{пр3}} + \Delta P_3) = (0,6 + 0,29) = 0,89 \text{ МПа}$$

$$\Delta P_3 = \Delta p \cdot L_3 = 0,25 \cdot 1,160 = 0,29 \text{ МПа}$$

$$L_3 = l_7 + l_4 + l_3 = 1,160 \text{ км}$$

де Δp - питомі втрати тиску на 1 км трубопроводу;

$P_{пр}$ - робочий тиск;

ΔP - допустимі втрати тиску мережі.

Тиск, необхідний для четвертого пункту споживання

$$P_4 = (P_{пр4} + \Delta P_4) = (0,6 + 0,186) = 0,786 \text{ МПа}$$

$$\Delta P_4 = \Delta p \cdot L_4 = 0,1 \cdot 1,86 = 0,186 \text{ МПа}$$

$$L_4 = l_7 + l_5 + l_6 = 1,86 \text{ км}$$

де Δp - питомі втрати тиску на 1 км трубопроводу;

$P_{пр}$ - робочий тиск;

ΔP - допустимі втрати тиску мережі.

Максимально необхідна величина тиску стисненого повітря

$$P_{\max} = 0,89 \text{ МПа}$$

2.2.3 Вибір компресора та розрахунок потужності

За тиском $P=0,89$ МПа і подачею $V = 3,1185 \text{ м}^3/\text{с} = 187 \text{ м}^3/\text{хв}$ вибираємо компресор К-250-61-2 характеристики якого наведені в табл. 2.1.

Табл. 2.2 Характеристики компресора

Тип компресора	Марка	Продуктивність $\text{м}^3/\text{хв}$, $\text{м}^3/\text{год}$	Кінцевий тиск, МПа	Потужність КВт	Параметри характеристики
					С, МПа
Відцентровий	К-250-61-2	4,167/250	0,9	1500	3,40

Компресор К-250-61-2 – це відцентровий компресор високого тиску, який широко використовується у промисловості для стиснення повітря та інших газів.

Основні параметри компресора:

- **Продуктивність:** 250 $\text{м}^3/\text{год}$.
- **Робочий тиск:** 0,9 МПа.

- **Частота обертання валу:** 500 об/хв.
- **Споживана потужність:** 1500 кВт
- **Кількість ступенів стиснення:** 2 ступені.
- **Тип охолодження:** водяне.
- **Вибрано двигун** СТД-1600-23УХЛ4 n= 3000 об/хв

2.3. Розрахунок та вибір параметрів системи охолодження

2.3.1 Розрахунок та вибір обладнання системи охолодження

Для компресорів типу К-250-61-2, де висока продуктивність поєднується з роботою при значному тиску, система охолодження відіграє важливу роль у підтримці оптимальних робочих умов та захисту обладнання від перегріву. Під час роботи компресора значна частина енергії перетворюється на тепло, що підвищує температуру газу та самого обладнання. Якщо охолодження буде недостатнім, це може призвести до:

- Зменшення ефективності компресора.
- Збільшення зносу та пошкоджень деталей.
- Виникнення аварійних ситуацій, таких як заклинювання поршнів або перевантаження системи стиснення.

Водяне охолодження. Цей тип охолодження є основним для великих компресорів, зокрема К-250-61-2. Вода циркулює через спеціальні теплообмінники та охолоджувальні сорочки, розташовані навколо компресорних циліндрів. Водяне охолодження має кілька переваг:

Висока ефективність: вода має високу теплоємність, що дозволяє ефективно поглинати тепло і підтримувати стабільну температуру компресора.

Можливість регулювання температури: за допомогою спеціальних клапанів і систем контролю можна змінювати інтенсивність охолодження в залежності від робочого навантаження компресора.

Стійкість до тривалих навантажень: водяне охолодження дозволяє компресору працювати безперервно протягом тривалого часу без перегріву.

Для вибору обладнання системи охолодження визначаємо необхідні параметри: роботу на стискання, кількість тепла яку необхідно відводити та об'єм охолоджуючої рідини.

Робота стискання: Робота стискання L обчислюється за формулою:

$$L = \frac{k}{k-1} \cdot P_{\text{вх}} \cdot V \cdot \left[\left(\frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right],$$

$$L = \frac{1.3}{1.3-1} \cdot 0.1 \cdot 4.167 \cdot \left[\left(\frac{0.9}{0.1} \right)^{\frac{1.3-1}{1.3}} - 1 \right] = 1.192 \text{ кДж}$$

де k - показник політропи;

$P_{\text{вх}}$ - початковий тиск;

$P_{\text{вих}}$ - кінцевий тиск;

V - об'ємна продуктивність компресора.

Кількість тепла: Тепловиділення $Q_{\text{тепло}}$ розраховується через потужність роботи стискання:

$$Q_{\text{тепло}} = L \cdot n,$$

$$Q_{\text{тепло}} = 1,192 \cdot 8,33 = 9,936 \text{ кВт}$$

де n - частота обертання валу ($n=500/60=8.33$ об/с).

Витрата води: Витрата охолоджувальної води $G_{\text{вода}}$ визначається як:

$$G_{\text{вода}} = \frac{Q_{\text{тепло}}}{c_{\text{вода}} \cdot \Delta T_{\text{вода}} \cdot 1000}$$

$$G_{\text{вода}} = \left(\frac{9,936 \cdot 10^6}{4,18 \cdot 15 \cdot 1000} \right) \cdot 3,6 = 570,51 \text{ м}^3/\text{хв}$$

де $c_{\text{вода}}$ - враховує, скільки тепла здатна поглинути вода при нагріванні;

$\Delta T_{\text{вода}}$ - визначає, наскільки нагрівається вода.

Площа теплообмінника: Для визначення площі теплообмінника $A_{\text{теплообм}}$:

$$A_{\text{теплообм}} = \frac{Q_{\text{тепло}}}{k_{\text{тепл}} \cdot \Delta T_{\text{серед}}}$$

$$A_{\text{теплообм}} = \frac{9,936 \cdot 10^6}{500 \cdot 15} = 1324,85 \text{ м}^2$$

де $k_{\text{тепл}}$ - коефіцієнт теплопередачі;

$\Delta T_{\text{серед}}$ - середня різниця температур між газом і охолоджувальною рідиною.

За розрахованими параметрами обираємо насос **Grundfos CR 90-2** (рис. 2.3)

Технічні характеристики насоса наведені в таблиці 2.2.

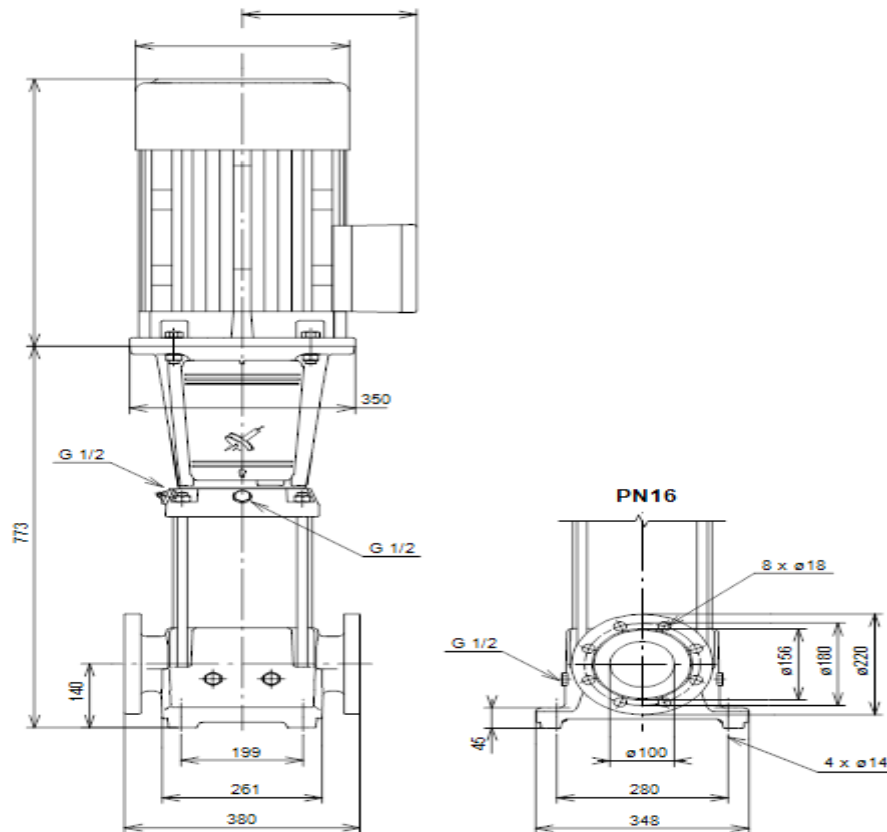


Рис.2.3 Насос Grundfos CR 90-2

Таблиця 2.3 Характеристики насоса Grundfos CR 90-2

Максимальна подача	до 120 м ³ /год
Номінальна подача	90 м ³ /год
Максимальний напір	до 68 м
Номінальний напір	41 м
Електродвигун	MG160MD
Номінальна потужність	15 кВт
Напруга живлення	3 х 400 В або 3 х 690 В
Частота обертання	2950 об/хв

Висновки до розділу 2

Для забезпечення потреб цеху в пневматичній енергії було виконано комплексний аналіз вимог і обрано компресор К-250-61-2, що відповідає необхідним параметрам, зокрема продуктивності 250 м³/год і кінцевому тиску 0,9 МПа. Обраний компресор забезпечує двоступеневий процес стиснення повітря, що включає попереднє очищення, проміжне охолодження, відведення вологи та стабілізацію тиску в пневматичній системі.

Для підтримки стабільної роботи компресора і забезпечення необхідного температурного режиму було розроблено систему водяного охолодження. В рамках дослідження визначено наступні параметри:

- Робота на стискання, яка становить 1,192 кДж.
- Кількість тепла, що підлягає відведенню, яка склала 9,936 кВт.
- Витрата охолоджувальної води в обсязі 570,51 м³/год.
- Необхідна площа теплообмінника, що становить 1324,85 м².

Для реалізації системи охолодження вибрано насос Grundfos CR 90-2 із характеристиками продуктивності 90 м³/год, напором 68 м і електродвигуном потужністю 15 кВт, що забезпечує ефективне циркулювання води в системі охолодження компресорної установки.

Таким чином, проведені розрахунки та обрані компоненти компресорної установки й системи охолодження дозволяють ефективно забезпечувати потреби цеху в пневматичній енергії.

Розділ 3 Розробка системи автоматичного керування компресорною установкою

3.1 Режими роботи компресорної установки

Режими роботи компресора мають велике значення для ефективного використання енергії та збереження терміну служби обладнання. Компресор К-250-61-2 може працювати в наступних режимах, що дозволяє оптимізувати його роботу залежно від потреб виробництва.

Постійний режим роботи. Цей режим передбачає безперервну роботу компресора на повну потужність. Постійний режим використовується тоді, коли необхідний безперервний потік стисненого повітря або газу. Основними перевагами цього режиму є стабільне забезпечення газом та відсутність частих включень/вимкнень, що зменшує знос деталей. Однак цей режим має недолік у вигляді підвищеного енергоспоживання, оскільки компресор працює на повну потужність навіть тоді, коли це не потрібно.

Режим "вмикання-вимикання" (On-Off). У цьому режимі компресор працює тільки тоді, коли тиск у системі падає нижче встановленого рівня. Після досягнення потрібного рівня тиску компресор вимикається. Цей режим дозволяє знизити споживання енергії, але має кілька недоліків:

Часті пуски та зупинки компресора можуть призводити до зносу механічних частин.

Витрати на обслуговування зростають через необхідність регулярної заміни деталей, схильних до зносу.

Режим із регульованою частотою обертання (VSD - Variable Speed Drive). Найсучасніший і найбільш енергоефективний режим роботи компресора. В цьому випадку компресор обладнаний системою з регульованою частотою обертання, яка дозволяє змінювати швидкість роботи компресора залежно від поточних потреб. Основні переваги цього режиму:

Економія енергії: компресор працює лише тоді і з тією потужністю, яка необхідна для підтримання тиску в системі, що значно зменшує витрати електроенергії.

Подовження терміну служби: менша кількість пусків і зупинок зменшує зношування обладнання.

Гнучкість: система може швидко адаптуватися до зміни навантаження, що робить цей режим особливо корисним для установок зі змінними потребами в стисненому повітрі.

Резервний режим. Встановлення резервного компресора часто необхідне на великих виробництвах. Резервний компресор перебуває у стані готовності і автоматично запускається у випадку виходу з ладу основного компресора або при підвищенні потреби в повітрі. Такий підхід дозволяє зберегти безперервність технологічного процесу, уникнути зупинки виробництва і забезпечити додаткову надійність системи.

Режим часткового навантаження. У цьому режимі компресор працює не на повну потужність, а лише на певний відсоток від максимальних можливостей. Це особливо актуально в умовах, коли потреба в стисненому повітрі коливається. У таких випадках компресор може працювати в режимі зниженої продуктивності, щоб уникнути перевантаження і зайвого споживання енергії.

Електроспоживання компресорної установки в наведених режимах залежить від кількох основних факторів:

- **Продуктивність.** Чим більша кількість повітря стиснена за одиницю часу, тим більше енергії споживає компресор. Налаштування продуктивності на оптимальний рівень дозволяє зменшити енергоспоживання.
- **Тиск.** Підвищення тиску повітря потребує збільшених енерговитрат. Оптимальний вибір тиску відповідно до потреб виробництва дозволяє зменшити витрати електроенергії.
- **Температура.** Зміна температури навколишнього середовища або робочого середовища компресора може підвищити потребу в охолодженні і, як наслідок, збільшити енергоспоживання.

Для зниження електроспоживання важливо контролювати всі ці фактори і використовувати системи автоматичного регулювання, що дозволяють адаптувати роботу компресора до зміни умов роботи.

3.2 Вибір обладнання для автоматизованої системи управління

Сучасні компресорні установки обладнані системами автоматичного керування двигунами, що дозволяє оптимізувати їх роботу. Основними елементами системи керування двигуном компресора є:

Приводи з регульованою частотою (VFD – Variable Frequency Drive) дозволяють плавно змінювати швидкість обертання двигуна залежно від потреб у продуктивності.

Системи автоматичного моніторингу, які дозволяють контролювати стан компресора в реальному часі та адаптувати роботу до поточних умов.

Системи керування насосами використовуються для підтримки оптимальної температури компресора за допомогою регулювання циркуляції охолоджувальної рідини.

В розробленій системі охолодження компресорної установки використовуються наступні типів датчиків, які забезпечують зворотній зв'язок для контролера:

Датчик температури оточуючого середовища, що враховує зовнішні умови і дозволяє адаптувати систему охолодження.

Датчик температури в проміжному охолоджувачі, що відстежує ефективність теплообміну.

Датчик температури охолоджуючої води, який допомагає регулювати циркуляцію в системі охолодження.

Датчик температури на виході, що забезпечує контроль робочої температури стисненого повітря або газу.

Датчики тиску

Призначення: Контроль тиску на вході та виході компресора.

OVEN ПД100: Діапазон вимірювання від -0,1 до 1,0 МПа, точність 0,5%, робоча температура до +125°C.



Рис.3.1 Датчик Oven ПД100

Типи вимірюваного тиску:

Надлишковий тиск (ДІ)

Абсолютний тиск (ДА)

Вакуумметричний тиск (ДВ)

Надлишково-вакуумметричний тиск (ДІВ)

Діапазони вимірювання:

Верхня межа вимірювання (ВМВ) для надлишкового тиску: від 0,1 кПа до 100 МПа

ВМВ для абсолютного тиску: від 1 кПа до 10 МПа

ВМВ для вакуумметричного тиску: від -100 Па до -100 кПа

ВМВ для надлишково-вакуумметричного тиску: від -100 Па до 250 кПа

Робоча температура: від -40 до + 100

Датчики температури

Призначення: Моніторинг температури повітря на вході та виході, а також температури охолоджувальної рідини.

ТСП-2-8а-Pt1000: Висока точність, робочий діапазон $-50\dots+250^{\circ}\text{C}$.



Рис.3.2 Датчик ТСП-2-8а-Pt1000

Тип чутливого елемента (ЧЕ): Платиновий резистор Pt1000

Клас допуску: А або В (залежно від вимог замовника)

Схема з'єднання ЧЕ: 2- або 3-провідна

Матеріал захисної арматури: Алюмінієвий сплав Д16

Тип кабелю: РЕ

Робочий діапазон температури: від -50 до $+250^{\circ}\text{C}$

Показник теплової інерції: 14 секунд

Датчики вібрації

Призначення: Виявлення незбалансованості, неправильного встановлення або зносу деталей.

Vibro-Meter SA202: Для вимірювання рівнів вібрації з високою точністю.



Рис.3.3 Датчик Vibro-Meter CA202

Чутливість: 100 пКл/g

Діапазон вимірювань: від 0,01 до 400 g пікове значення

Робочий температурний діапазон: від -55 до +260 °C

Частотний діапазон: від 0,5 до 6000 Гц ($\pm 5\%$)

Резонансна частота: понад 22 кГц

Лінійність: $\pm 1\%$ між 0,01 g та 20 g пікове значення; $\pm 2\%$ до 400 g пікове значення

Поперечна чутливість: $\leq 3\%$

Датчики рівня мастила

Призначення: Контроль рівня мастила для запобігання роботі без належного змащення.

Endress+Hauser Levelflex FMP50: Застосовується для рідких середовищ.

Точність: ± 2 мм

Температурний діапазон процесу: від -20 до +80 °C

Діапазон тиску процесу: від вакууму до 6 бар

Максимальна довжина вимірювання:

Стержневий зонд: до 4 м

Тросовий зонд: до 12 м



Рис.3.4 Датчик Endress+Hauser Levelflex FMP50

Датчики потоку охолоджувальної рідини

Призначення: Виявлення недостатнього потоку рідини, що може призвести до перегріву.

IFM SI5000: Для моніторингу потоку в системах охолодження.



Рис.3.5 Датчик IFM SI5000

Діапазон вимірювання:

Рідини: 3...300 см/с

Газу: 200...3000 см/с

Температура середовища: від -25 до +80 °С

Робочий тиск: до 30 бар

Вихідний сигнал: цифровий PNP, нормально відкритий або нормально закритий (програмований)

Живлення: 19...36 В постійного струму

Ступінь захисту: IP67

Матеріал корпусу: нержавіюча сталь (316L/1.4404)

Електричне підключення: роз'єм M12

Датчики для системи автоматизації

Призначення: Інтеграція в систему автоматичного керування (PLC).

Honeywell TBS Series: Для моніторингу основних параметрів.



Рис.3.6 Датчик Honeywell TBS Series

Виходи:

3 релейні виходи для керування вентилятором

ТВ3140: 2 релейні виходи для керування клапанами

ТВ3240: 2 аналогові виходи (0-10 В) для керування клапанами

Універсальний вхід: 1 вхід для зовнішнього датчика (NTC10k) або контактному входу

Комунікація: EIA-485 (BACnet MS/TP)

Дисплей: LCD 62 x 44 мм з білим підсвічуванням

Керування: 5 інтегрованих сенсорних кнопок

Матеріал корпусу: загартоване скло

Розміри: 86 x 86 x 52 мм

Сумісність: відповідає стандартам CE, RoHS, BTL (B-ASC)

Датчики аварійного відключення

Призначення: Захист компресора від критичних умов (перевищення тиску, перегріву, нестачі мастила).

SCHNEIDER XS8: Для аварійного зупинення системи.



Рис.3.7 Датчик SCHNEIDER XS8

Конструкція: Корпус розміром 40 x 40 x 117 мм, виготовлений з пластику PBT.

Номінальна відстань спрацьовування ([Sn]): 20 мм.

Вихідний сигнал: Дискретний, з можливістю програмування як нормально відкритий (NO) або нормально закритий (NC).

Тип вихідного кола: AC/DC.

Електричне підключення: Гвинтові клеми, 4 x 1,5 мм².

Номінальна напруга живлення ([Us]): 24...240 В змінного струму (50/60 Гц) або постійного струму.

Ступінь захисту: IP65, IP67 відповідно до IEC 60529; IP69K відповідно до DIN 40050.

ABB AC500: Система аварійного моніторингу.

Масштабованість: AC500 пропонує широкий вибір центральних процесорних модулів (CPU), модулів вводу/виводу та комунікаційних модулів, що дозволяє створювати конфігурації від простих до складних автоматизаційних рішень.

Гнучкість: Завдяки єдиному інтегрованому програмному забезпеченню Automation Builder, AC500 дозволяє легко адаптувати систему автоматизації до нових вимог та забезпечує сумісність між різними модулями.



Рис.3.8 Датчик АВВ АС500

Комунікаційні можливості: Контролери AC500 підтримують різноманітні протоколи зв'язку, включаючи PROFINET, Ethernet/IP, Modbus TCP та інші, що забезпечує інтеграцію з різними системами та пристроями.

Надійність: Серія AC500-ХС розроблена для роботи в екстремальних умовах, таких як висока вологість, соляний туман, вібрації, велика висота та агресивні гази, що робить її придатною для використання в суворих середовищах.

Насос низького тиску: Pedrollo PKm 60.



Рис.3.9 Насос Pedrollo PKm 60

Основні характеристики Pedrollo PKm 60

Тип насоса:

Поверхневий відцентровий насос для чистої води.

Продуктивність:

Максимальна подача: 40 л/хв.

Максимальний натиск: 35 м.

Робочий тиск:

Максимальний робочий тиск: 6 бар.

Робоча температура:

Температура рідини: від +5°C до +90°C.

Електродвигун:

Потужність: 0,37 кВт (0,5 HP).

Напруга живлення: 220 В, 50 Гц.

Частота обертання: 2900 об/хв.

Сигнальні лампи: червоні світлодіоди з IP67.

Контролер: PLC Siemens S7-1200 з підтримкою Modbus.



Рис.3.10 PLC Siemens S7-1200

Основні характеристики S7-1200 для використання в цій системі

Підтримка Modbus RTU/TCP:

Забезпечує прямий обмін даними між PLC і периферійним обладнанням, таким як датчики тиску, температури або насоси.

Підтримує комунікацію з SCADA-системами для візуалізації процесу.

Цифрові та аналогові входи/виходи:

Входи для підключення датчиків температури, тиску, кнопок Push, Stop, Avar.

Виходи для керування насосами Н1, Н2, системою охолодження та аварійними сигналами.

3.3 Визначення витрат електричної енергії при роботі компресорної установки

Охолодження компресорних установок є важливою складовою їх ефективної роботи, оскільки цей процес дозволяє уникнути перегрівання обладнання, підвищити його надійність і продовжити термін служби. Дослідження сучасних технологічних процесів охолодження, їх автоматизація та інтеграція нових датчиків і алгоритмів керування дозволяють оптимізувати роботу таких систем.

Надходження холодного повітря в компресор має багатогранний вплив, який може бути як корисним, так і шкідливим, залежно від умов експлуатації та конкретного типу компресора. Однією з ключових переваг є покращена ефективність компресора, оскільки холодне повітря має вищу щільність, що дозволяє йому втягувати більше молекул повітря в тому самому об'ємі. Ця техніка допомагає посилити потік повітря, підвищити ефективність (ККД) і знизити споживання енергії на одиницю стисненого повітря. Крім того, робоча температура компресора знижується, оскільки більш холодне повітря потребує меншого відведення тепла під час стиснення, що призводить до зменшення навантаження на систему охолодження та зменшення ймовірності перегріву. Завдяки підвищеній щільності повітря компресор може подавати більший об'єм стисненого повітря, використовуючи ту саму кількість енергії

Тим, не менш, існують потенційні небезпеки. Коли повітря холодне, особливо якщо воно близько до точки роси, це може призвести до конденсації вологи в системі, що може порушити нормальну роботу компресора. У регіонах із низькими температурами лід може накопичуватися на входному фільтрі, трубопроводі чи інших компонентах системи, потенційно перешкоджаючи потоку повітря або спричиняючи припинення роботи компресора. Надзвичайно низькі температури можуть негативно вплинути на властивості таких матеріалів, як еластомери, ущільнювачі та мастильні матеріали, збільшуючи ймовірність зносу або виходу з ладу компонентів. Крім того, холодне повітря має здатність знижувати

в'язкість мастильних матеріалів, зменшуючи їхню ефективність у забезпеченні належного змащування.

Для підтримки стабільної роботи компресора при низьких температурах необхідно вжити певних заходів. Повітрянагрівачі використовуються для підтримки температури, яка дозволяє уникнути конденсації та замерзання. Завдяки введенню осушувачів ризик утворення конденсату мінімізується, а використання спеціальних матеріалів і мастильних матеріалів, призначених для низьких температур, гарантує стабільність і надійність компресора. Отже, використання холодного повітря може значно підвищити ефективність і продуктивність компресора за умови врахування потенційних ризиків і підтримки належних умов експлуатації.

Втрати електроенергії при перевищенні температури повітря

$$\Delta W = \frac{[N_{\phi} \cdot (t - 60) \cdot 0.01] \cdot \tau}{6}, \text{ кВт} \cdot \text{ год}$$

Де:

N_{ϕ} – потужність електродвигуна

t - температура повітря на виході з проміжного холодильника

τ – кількість годин роботи компресора

Втрати електроенергії при збільшенні перепаду температури води

$$\Delta W_{\text{вод}} = 0,007 \cdot [(t_{\text{пов}} - t_{\text{H}_2\text{O}}) - 10] \cdot \tau \cdot N_{\phi}, \text{ кВт} \cdot \text{ год}$$

Де:

N_{ϕ} – потужність електродвигуна

$t_{\text{пов}}$ - температура повітря після проміжного холодильника

$t_{\text{H}_2\text{O}}$ - температура охолоджуючої води на виході

τ – кількість годин роботи компресора

Табл. 3.1 Розрахунок перевитрат електроенергії

Температура, С°	Втрати електроенергії при перевищенні температури повітря, ΔW , кВт*год	Втрати електроенергії при збільшенні перепаду температури води, $\Delta W_{\text{вод}}$, кВт*год
115	1760	12096
105	1440	10752
95	1120	9408
85	800	8064
75	480	6720
65	160	5376

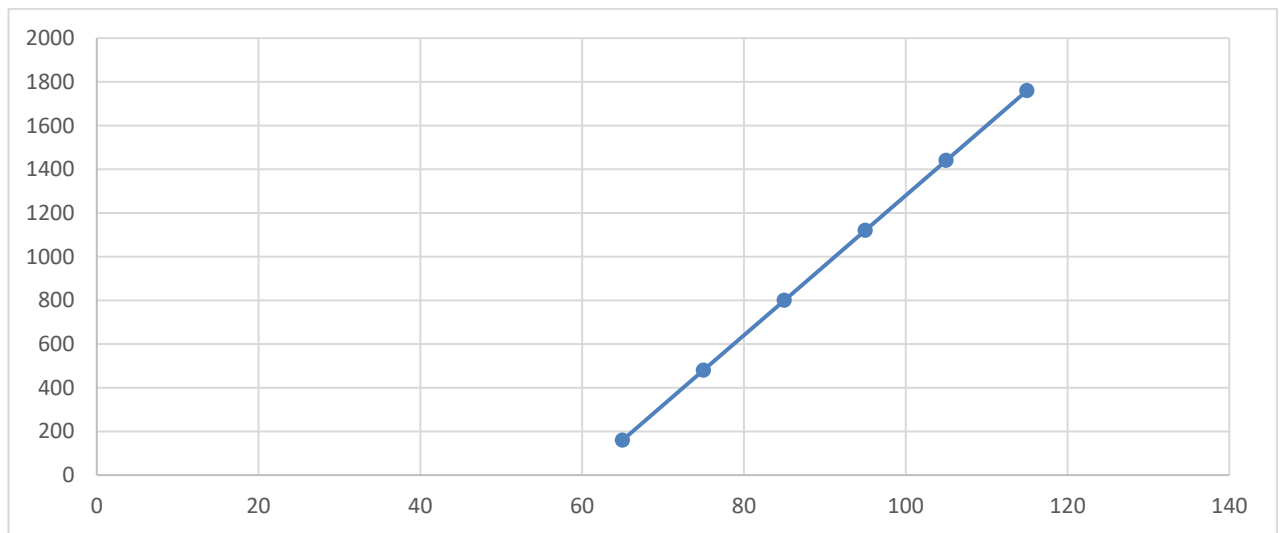


Рис.3.11 Втрати електроенергії при перевищенні температури повітря

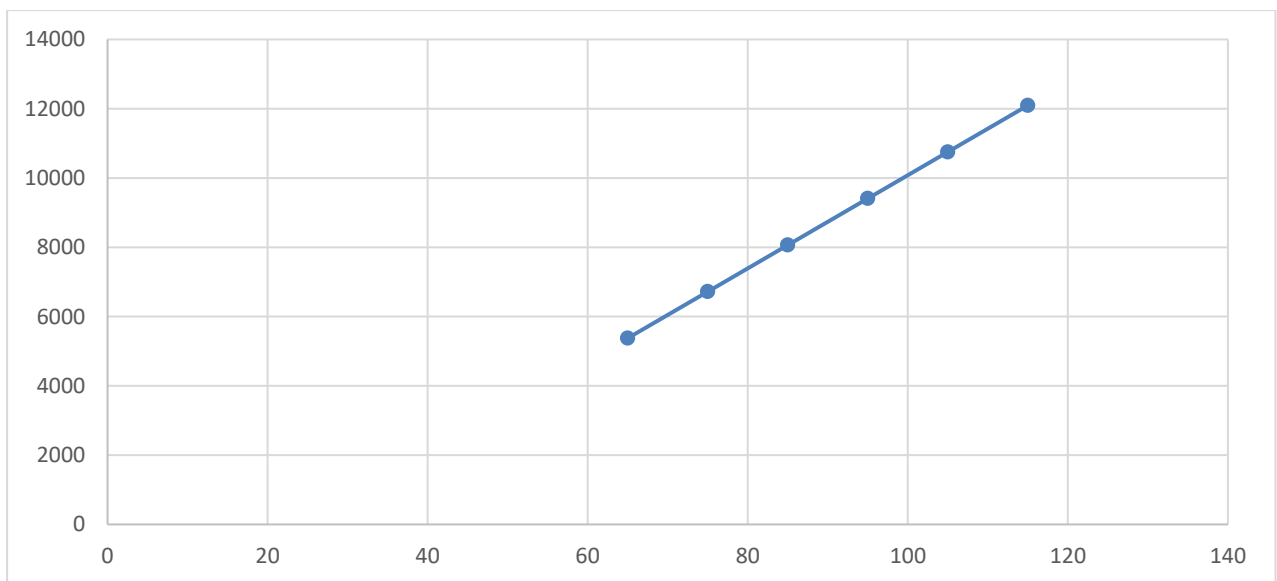


Рис.3.12 Втрати електроенергії при збільшенні перепаду температури води

Розрахунок витрат енергії на роботу КУ

Вхідні параметри К-250-61-2:

Продуктивність компресора: $Q=250$ м³

Початковий тиск $P_{вх}=0,1$ МПа

Кінцевий тиск: $P_{вих}=0,9$ МПа

Розрахунок масової витрати повітря (**m**)

Масова витрата повітря визначається за рівнянням:

$$m = \rho_{вх} \cdot Q$$

$$m = 1,2 \cdot 4,167 = 5$$

де:

$\rho_{вх}$ — густина повітря на вході, для стандартних умов $\rho_{вх}=1,2$ кг

Q — об'ємна продуктивність, переведена у м³/с

Розрахунок роботи стиснення (**W**):

Робота стиснення визначається за рівнянням для багатоступеневого компресора:

$$W = \frac{n}{n-1} \cdot R \cdot T_{вх} \cdot \left(\ln \frac{P_{вих}}{P_{вх}} \right)$$

де:

$n=1,3$ — показник політропи для повітря,

$R=287$ Дж/(кгК)— газова стала,

$T_{вх}=293$ К,

$P_{вх}=0,1$ МПа

$P_{вих}=0,9$ МПа

Обчислюємо W :

$$W = \frac{1,3}{1,3-1} \cdot 287 \cdot 293 \cdot \left(\ln \frac{0,9}{0,1} \right) = 800,65 \text{ кДж/кг}$$

Розрахунок потужності компресора (N):

Залежність потужності:

$$N=m \cdot W$$

$$N=5 \cdot 800,65=4003,25 \text{ кВт},$$

Розрахунок параметрів охолодження:

Теплова потужність, що виділяється при стисненні:

$$Q_{\text{тепл}}=m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

де:

$$c_p=1000 \text{ Дж/(кгК)}$$

ΔT — приріст температури повітря.

Приріст температури ΔT наближено обчислюємо:

$$\Delta T = T_{\text{вх}} \cdot \left[\frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}}^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$\Delta T = 293 \cdot \left[\frac{0,9^{\frac{1,3-1}{1,3}}}{0,1} - 1 \right] = 193,5 \text{ К}$$

Остаточний тепловий потік:

$$Q_{\text{тепл}} = 5 \cdot 1000 \cdot 193,5=967,5 \text{ кВт}$$

3.4 Задача оптимізації електроспоживання компресорною установкою

Зменшення витрат на охолодження може призвести до підвищення температури газу, що збільшить витрати на стиснення, і навпаки. Але при охолодженні буде зменшуватись об'єм газу, який стискається, що призведе до зменшення питомих витрат на стискання. Загальні витрати електроенергії для компресорної установки складаються з витрат на стиснення газу та витрат на охолодження.

Складова витрат на охолодження залежить від продуктивності компресорної установки та ступеня стиснення газу [2]

$$N_e = Q_M + G_B(i_2 - i_1) + Q_p$$

де N_e – ефективна потужність компресора; Q_M – тепло, що відводиться охолоджувачем; G_B – вагова витрата повітря; i_1 та i_2 , – ентальпія повітря до і після стиснення; Q_p – тепло, що розсіюється у довкілля через корпус компресора, дорівнює 6–8 % від Q_M .

Складова витрат на охолодження залежить від властивостей охолоджуючої рідини, її температури та витрат рідини на охолодження [2]

$$N_{ох} = \frac{m_{рідини} * \rho_{рідини}}{r_{рідини} * \eta_{дв} * \eta_{пер} * \eta_{нас}}; m_{рідини} = \frac{q_e}{C_p * \Delta t_{рідини}}$$

де $\eta_{дв}$ - ККД двигуна, $\eta_{пер}$ - ККД механічної передачі, $\eta_{нас}$ - ККД насоса,
 $\rho_{рідини} = 0.15...0.25$ Мпа, $\Delta t_{рідини}$ – температура рідини, $\rho_{рідини}$ – густина рідини,
 q_e - повний тепловідвід в процесі стиснення повітря.

Отже, задача оптимізації полягає у мінімізації питомого електроспоживання компресорної установки $W_{компр}$ за рахунок знаходження балансу між витратами на стискання і охолодження та сформулюється наступним чином

$$W_{\text{компр}}(N_e, N_{ox}, V) \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} Q = \text{var} \in [Q_{\min}, Q_{\max}] \\ i_1 = \text{const} \\ i_2 = \text{const} \end{cases}$$

де N_e – ефективна потужність компресора; Q – продуктивність компресора; N_{ox} – ефективна потужність компресора; V_x – об’єм газу, що стискається; i_1 та i_2 , – ентальпія повітря до і після стиснення;

Щоб мінімізувати загальні енергетичні витрати, потрібно визначити оптимальну кількість енергії, що витрачається на охолодження газу. Ця величина буде залежати від різниці температур газу на вході компресора та самій установці. Підвищення температури на вході компресора на $5\text{ }^\circ\text{C}$ вимагає збільшення потужності установки на 4% [14].

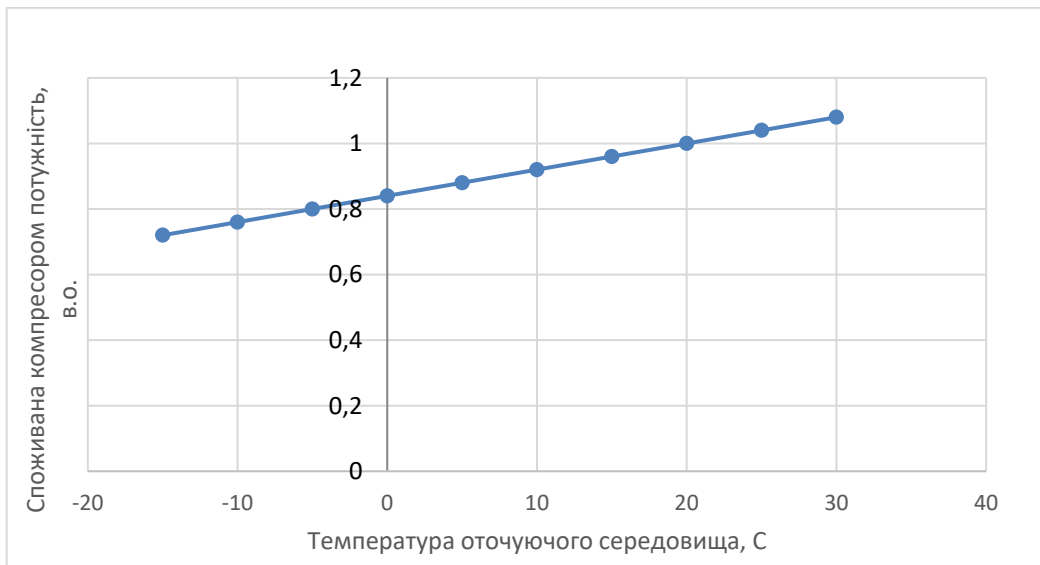


Рис.3.13 Залежність споживаної компресором потужності від температури на вході.

При встановленні умов роботи КУ слід враховувати наступні температурні обмеження, які встановлюються технологією: температура стисненого на виході з проміжного ступеня повинна бути не вище $60\text{ }^\circ\text{C}$, Температура на вході в цехову мережу не повинна перевищувати $40\text{ }^\circ\text{C}$.

3.5 Розробка системи керування охолодженням компресорної установки

Система автоматизації компресорної установки складається з кількох основних частин. Джерелом живлення є трифазний вимикач QF1, який забезпечує подачу електроенергії. Для захисту від перевантажень у схемі передбачені запобіжники FU1 і FU2, а трансформатор TV використовується для формування напруги керування. Виконавчим механізмом є асинхронний двигун M1, який виконує механічну роботу, приводячи компресор у дію. Силова частина системи включає контактори K1 і K2, які здійснюють вмикання та вимикання двигуна, а теплові реле RT1 і RT2 забезпечують захист двигуна від перегріву.

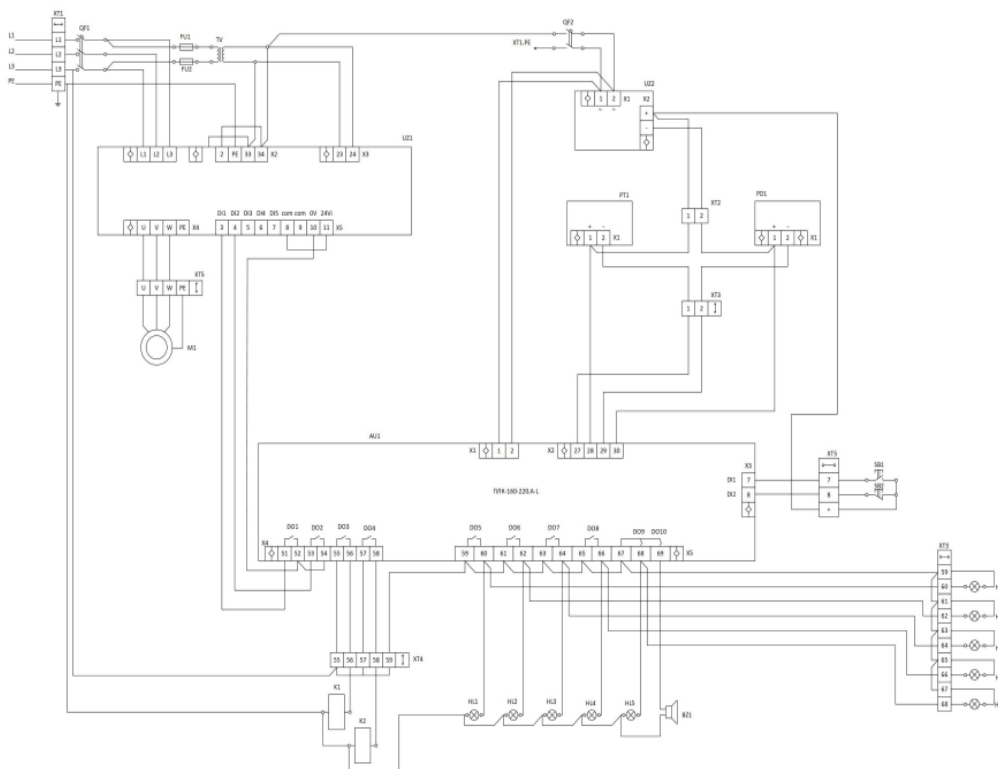


Рис.3.14 Схема автоматизації компресорної установки

Контроль і автоматизація роботи реалізовані через систему датчиків і контролер. У схемі передбачені датчики RT1, RT2 і RT3 для моніторингу тиску, а також диференційний датчик PD1 для виявлення перепадів тиску. Контролер AU1 (типу TRM-500) обробляє сигнали з датчиків через цифрові входи DI1 і DI2, а також

керує виконавчими механізмами через виходи DO1–DO10. Він виконує обробку даних і автоматичне керування компресором за заданим алгоритмом.

Система індикації та сигналізації включає лампи HL1–HL10, які відображають стан системи, та звуковий сигналізатор BZ1, що попереджає про аварійні ситуації. Ланцюг управління дозволяє керувати компресором вручну за допомогою кнопок SB1 і SB2 або вибирати автоматичний режим роботи через перемикач XT5.

Захист і резервування забезпечуються за рахунок використання запобіжників, теплових реле та аварійних режимів роботи. Алгоритм функціонування системи передбачає перевірку сигналів з датчиків і готовності обладнання до запуску, автоматичний або ручний запуск компресора, моніторинг параметрів тиску і температури, а також вимкнення компресора при досягненні заданих значень. У разі аварії система активує сигналізацію і припиняє роботу для запобігання пошкодженню обладнання. Додатково система може бути підключена до зовнішніх керуючих або моніторингових систем через інтерфейси контролера, а параметри її роботи можуть бути налаштовані через панель управління.

3.6 Розробка алгоритму керування насосною компресорною установкою

Для керування компресорною установкою використовується логічна схема, заснована на RS-тригерах, які відповідають за різні стани системи. Кількість необхідних тригерів розраховується за формулою $N = \lceil \log_2(M) \rceil$, де M — кількість станів системи, а N — потрібна кількість тригерів. У цій системі логіка керування розбита на три основні частини. Перша частина відповідає за керування пуском і зупинкою компресора, для чого використовується два тригери. Друга частина — це керування системою охолодження компресора, яке реалізується за допомогою одного тригера. Третя частина забезпечує перемикання між автоматичним і ручним режимами роботи через дискретні входи.

Тригери розподілені наступним чином: тригер P1P відповідає за нормальний режим роботи компресора, а тригер P2 активується в умовах підвищеного навантаження. Алгоритм роботи системи автоматизації починається зі збору даних від датчиків. Система отримує сигнали від температурних датчиків (оточуючого середовища, проміжного охолоджувача, охолоджуючої води та виходу компресора), а також від датчика тиску. Також враховуються дискретні сигнали, такі як запуск компресора (Pusk), аварійне вимкнення (Stop), сигнал аварії (Avar) і вибір режиму роботи (RegManual або RegAuto).

Вихідні сигнали системи включають активацію насосів високого (H1) і низького (H2) тиску, запуск системи охолодження (CoolingSystem) та аварійну індикацію (Blinker). Перед запуском компресора оператор вибирає режим роботи — автоматичний або ручний. При натисканні кнопки Pusk активується тригер P1P1P1, що відповідає за запуск компресора за умови виконання всіх початкових умов, таких як готовність системи охолодження і нормальний рівень тиску. У нормальному режимі система охолодження вмикається при досягненні заданої температури компресора, при цьому таймер Tcool забезпечує циркуляцію охолоджуючої рідини до стабілізації температури. Контроль тиску в системі здійснюється через датчик, який активує насоси високого (H1) або низького (H2) тиску залежно від поточних параметрів.

В автоматичному режимі система адаптується до зміни температури і тиску, виконуючи відповідні цикли роботи (Рис. 3.15). У разі аварійної ситуації, наприклад при спрацьовуванні кнопки Stop або сигналу Avar, компресор негайно зупиняється, а аварійна лампа починає миготіти. Програма керування складається з кількох функціональних блоків. Блок вибору режиму роботи визначає, який режим (ручний чи автоматичний) є активним, та забезпечує відповідне налаштування системи. Блок запуску компресора активує його за умовою натискання кнопки Pusk та виконання всіх початкових умов. Блок контролю температури працює з датчиками для забезпечення безпечного режиму роботи і активації системи охолодження. Блок контролю тиску регулює роботу насосів

залежно від рівня тиску в системі. Блок аварійного відключення реалізує логіку миттєвого вимкнення компресора та насосів у разі аварії.



Рис.3.15 Блок схема алгоритму

Програмна логіка передбачає перевірку вхідних сигналів, таких як стан температури і тиску, та відповідну активацію вихідних сигналів. Наприклад, якщо

активується тригер P1, запускається насос високого тиску H1, якщо тиск є низьким, або насос низького тиску H2, якщо тиск є критично низьким. Система охолодження активується, якщо температура перевищує порогове значення, і таймер Tcool забезпечує циркуляцію охолоджувальної рідини протягом заданого часу. У разі аварії всі виконавчі механізми вимикаються, а аварійна індикація активується для швидкого реагування оператора. Логічні схеми включають реалізацію пуску компресора через тригери P1 і P2, активацію системи охолодження через таймер Tcool, а також аварійне відключення через сигнал Stop для безпечного завершення роботи системи.

Код програми

PROGRAM Main

VAR

(* Локальні змінні *)

CoolingCondition : BOOL; (* Умова активації охолодження *)

HighPressure : BOOL; (* Умова високого тиску *)

LowPressure : BOOL; (* Умова низького тиску *)

END_VAR

(* Вибір режиму роботи *)

IF RegAuto THEN

TriggerP1 := Pusk AND NOT Stop AND NOT Avar;

TriggerP2 := (Pressure > 8.0) AND (TempOut > 90.0);

ELSIF RegManual THEN

TriggerP1 := Pusk;

TriggerP2 := FALSE;

END_IF

(* Логіка запуску насосів *)

IF TriggerP1 THEN

H1 := (Pressure < 0,9); (* Насос високого тиску активний при низькому тиску *)

H2 := (Pressure < 0,1); (* Насос низького тиску активний при критично низькому тиску *)

ELSE

H1 := FALSE;

H2 := FALSE;

END_IF

(* Логіка системи охолодження *)

CoolingCondition := (TempOut > 85.0) OR (TempInterCooler > 70.0);

IF CoolingCondition THEN

CoolingSystem := TRUE;

TimerTcool(IN := TRUE, PT := T#30s);

TcoolActive := TimerTcool.Q;

ELSE

CoolingSystem := FALSE;

TimerTcool(IN := FALSE);

END_IF

IF Stop OR Avar THEN

H1 := FALSE;

H2 := FALSE;

CoolingSystem := FALSE;

Blinker := TRUE;

ELSE

Blinker := FALSE;

END_IF

Висновки до розділу 3

У ході роботи проведено аналіз режимів роботи компресорної установки, що дозволило встановити залежність енергоспоживання компресора в різних режимах. Зокрема, визначено, що найбільш енергоефективним є режим із регульованою частотою обертання (VSD), який мінімізує втрати енергії та зменшує зношення обладнання.

Вибрано обладнання для автоматизованої системи управління охолодженням компресорної установки. Система включає датчики температури, тиску, потоку рідини, рівня мастила та вібрації, а також виконавчі механізми, такі як насоси та система аварійного відключення. Основним елементом управління є контролер PLC Siemens S7-1200, який забезпечує інтеграцію всіх компонентів і реалізацію алгоритму автоматизації.

Показано, що оптимальний баланс між витратами на стискання та охолодження досягається за рахунок регулювання температури охолоджуючої рідини та стисненого повітря. Для оптимального за критерієм мінімуму питомого електроспоживання температура стисненого повітря на виході з проміжного ступеня повинна бути не вище 60 °C.

Запропонована схема системи автоматизованого управління охолодженням компресорної установки, яка забезпечує регулювання режиму роботи системи охолодження у реальному часі, моніторинг стану системи та аварійне відключення у разі критичних ситуацій. Це дозволяє підвищити енергоефективність установки та забезпечити стабільну роботу компресора протягом тривалого часу.

РОЗДІЛ 4 . СТАРТАП

4.1 Опис ідеї проекту

Багато галузей промисловості використовують компресорні установки для забезпечення стиснення повітря. На витрати підприємств впливає високий рівень енергоємності компресорів. Система охолодження є одним з ключових елементів енергоефективної роботи компресорів.

В рамках даного дослідження було запропоновано впровадження автоматизованої системи охолодження компресорної установки, яка б максимізувала її режими роботи за критерієм мінімального споживання електроенергії. Пропонована система заснована на використанні датчиків температури і тиску, а також адаптивних алгоритмів управління, які дозволяють регулювати продуктивність охолодження відповідно до навантаження компресора.

Для пошуку енергоефективного рішення використовуються сучасні технології.

За допомогою встановлення датчиків можна контролювати стан компресора в реальному часі.

Машинне навчання використовується для прогнозування потужності охолодження.

Регулювання швидкості вентиляторів і насосів зменшує споживання електроенергії.

За даними термічних досліджень, перегрів компресорів може призвести до зниження продуктивності, збільшення енерговитрат і скорочення терміну їх служби. Впровадження автоматизованої системи охолодження дозволяє досягти балансу між ефективністю установки та енергоспоживанням.

Табл. 4.1 Основні аспекти ідеї проекту:

Зміст	Результат	Вигоди
Впровадження автоматизованої системи охолодження	Зниження енергоспоживання компресора	Економія енергоресурсів
Забезпечення ефективного тепловідведення	Підвищення надійності компресора	Тривалий термін експлуатації
Оптимізація режиму роботи компресорної установки	Зменшення навантаження на систему охолодження	Зниження експлуатаційних витрат

З урахуванням тенденцій підвищення енергоефективності у виробничих процесах, запропонована модернізація відповідає сучасним потребам промисловості. Система дозволяє оптимізувати споживання енергії, що сприяє сталому розвитку підприємств та зменшенню їхнього впливу на навколишнє середовище.

4.2 Аналіз конкурентного середовища

Готових систем охолодження компресорних установок на ринку представлено досить багато. Більшість із цих систем не відповідають сучасним вимогам енергоефективності, мають низьку адаптивність до змін умов експлуатації та не забезпечують ефективного енергоспоживання. Є кілька основних недоліків.

Не вистачає автоматизованих систем моніторингу та контролю.

Сучасні алгоритми керування не інтегровані в існуючі компресорні установки.

За умов змінного навантаження неефективне використання енергії є проблемою.

Класичні системи охолодження можна виділити за принципом постійної циркуляції охолоджувального середовища. Вони забезпечують базовий рівень охолодження, але їх ефективність знижується під час пікових теплових навантажень, що призводить до надмірного споживання енергії та зносу обладнання.

Табл. 4.2 Порівняльний аналіз існуючих рішень

Тип системи охолодження	Переваги	Недоліки
Природне охолодження	Простота конструкції, низька вартість	Неефективне в умовах підвищених теплових навантажень
Примусове повітряне охолодження	Вища ефективність, легкість в обслуговуванні	Низька адаптивність до змінного навантаження компресорів
Водяне охолодження	Висока ефективність тепловіддачі	Висока вартість впровадження, складність у обслуговуванні

На ринку також представлені рішення з інтегрованими системами автоматичного керування, які використовують датчики температури та інші показники для керування потоком охолоджуючого середовища. Однак такі системи є дорогими та часто потребують суттєвих змін у конструкції компресорних установок для інтеграції. В Україні серійне виробництво подібних систем майже відсутнє, а окремі компанії пропонують кастомізовані рішення, які не завжди відповідають критеріям енергоефективності.

Переваги запропонованої системи

Запропонована система охолодження компресорної установки, яка базується на адаптивних алгоритмах оптимізації роботи охолоджувального обладнання, має кілька ключових переваг у порівнянні з існуючими рішеннями:

- Енергоефективність: значне зменшення енергоспоживання завдяки оптимізації режиму роботи насосів та вентиляторів.
- Автоматизація: інтеграція датчиків температури, тиску та програмного забезпечення для динамічного моніторингу та адаптації до змінних умов.
- Гнучкість: адаптація системи до змін температури навколишнього середовища та теплових навантажень компресора, що дозволяє ефективно працювати навіть у нестабільних умовах.
- Тривалість роботи: зниження зносу елементів компресора завдяки підтриманню оптимальних температурних режимів.

- Економічність: зменшення витрат на обслуговування та енергію, що сприяє підвищенню рентабельності підприємства.

Таким чином, запропонована система охолодження має значний ринковий потенціал, особливо в умовах українського енергетичного ринку, де існує дефіцит автоматизованих, енергоефективних рішень. Вона не тільки забезпечує стабільність роботи компресорної установки, а й сприяє зменшенню загального впливу виробничих процесів на довкілля, що відповідає сучасним європейським стандартам.

4.3 Аналіз цільової аудиторії

Системи охолодження компресорних установок із оптимізацією режимів роботи за критерієм мінімуму електроспоживання є затребуваними серед широкого спектра споживачів. Основними цільовими групами для впровадження такого рішення є:

- Промислові підприємства – потребують зниження енергоспоживання, стабільності роботи компресорів і мінімізації витрат на обслуговування.
- Енергетичні компанії – зацікавлені у підвищенні ефективності виробничих процесів та зменшенні витрат на електроенергію.
- Інфраструктурні об'єкти – потребують забезпечення безперебійної роботи компресорних установок у складних умовах експлуатації.
- Державні організації – прагнуть підтримувати програми енергоефективності та скорочення викидів вуглецю.
- Науково-дослідні та навчальні установи – залучені до розробки і впровадження інноваційних рішень у галузі енергозбереження.

Табл.4.3 Географічний розподіл та характеристика цільової аудиторії

Регіон	Характеристика
Україна	Необхідність модернізації компресорного обладнання у зв'язку з переходом на європейські стандарти енергоефективності.
Країни, що розвиваються	Зростаючий попит на сучасні енергоощадні рішення через збільшення виробничих навантажень.
ЄС та США	Активна підтримка енергозберігаючих технологій через державні та екологічні ініціативи.

Табл.4.4 Мотиви та бар'єри впровадження системи

Мотиви впровадження	Бар'єри впровадження
Зниження витрат на енергоспоживання	Висока початкова вартість впровадження.
Підвищення надійності роботи компресорів	Недостатній рівень підготовки обслуговуючого персоналу до роботи з новими системами.
Мінімізація ризиків аварійних простоїв	Консервативність підприємств у впровадженні новітніх технологій.
Підтримка екологічних стандартів	Недостатнє державне фінансування та підтримка інноваційних рішень.

Запропонована система орієнтована на аудиторію, яка прагне підвищити енергоефективність, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити безперебійну роботу компресорного обладнання. Враховуючи актуальність таких рішень, вона має значний потенціал для впровадження як в Україні, так і на міжнародному ринку.

4.4 Аналіз ринкових можливостей

Оптимізація режиму роботи систем охолодження компресорних агрегатів за мінімальними стандартами споживання електроенергії відкриває величезні ринкові можливості. Зростаючі вимоги до енергоефективності та зниження витрат на виробництво створюють потребу в інноваційних рішеннях у сфері промислової автоматизації.

Основні ринкові можливості

- Зростання інвестицій у модернізацію промислових підприємств Багато підприємств прагнуть зменшити витрати на електроенергію, що спонукає до

впровадження автоматичних систем охолодження для зменшення споживання електроенергії.

- Впровадження програм енергоефективності в Україні Підтримка урядових ініціатив щодо зниження витрат на енергію в промисловості надає більше можливостей для інноваційних рішень, таких як запропонована система.
- Розвивати «зелену» енергію та промислові екопарки. Зростаюча кількість екологічних ініціатив та інвестицій у відновлювальні джерела енергії вимагають впровадження рішень, що зменшують вуглецевий слід, зокрема енергоощадних систем охолодження.

Табл.4.5 Ринкові тренди

Ринковий тренд	Вплив на можливості
Підвищення вартості енергоносіїв	Стимулює впровадження технологій, що знижують споживання енергії.
Активна цифровізація промислових процесів	Сприяє інтеграції інтелектуальних систем моніторингу та управління.
Зростання інтересу до екологічних рішень	Створює попит на системи, що мінімізують вплив на навколишнє середовище.

Табл.4.6 Сегмент ринку та можливості

Сегмент ринку	Потреби	Можливості
Промислові підприємства	Скорочення енерговитрат, стабільна робота обладнання	Впровадження автоматизованих систем, які оптимізують споживання енергії.
Енергетичні компанії	Забезпечення безперебійного постачання та зниження втрат енергії	Модернізація компресорних установок для критичних інфраструктур.
Інфраструктурні об'єкти	Стабільність роботи в умовах високого навантаження	Використання адаптивних охолоджувальних систем, що регулюють температуру.

Запропонована система охолодження має широкий ринковий потенціал, враховуючи зростання попиту на енергоощадні рішення в умовах підвищення вартості енергоносіїв та розвитку "зеленої" економіки. Її впровадження сприятиме

скороченню витрат, підвищенню продуктивності та екологічної відповідальності підприємств.

4.5 Фінансове обґрунтування проєкту

Оптимізація режиму роботи системи охолодження компресорної установки за критерієм мінімуму електроспоживання дозволяє значно зменшити енергетичні витрати, забезпечуючи швидку окупність інвестицій. Нижче наведено детальний аналіз витрат і економії.

Табл.4.7 Вартість впровадження складається з таких компонентів:

Компонент	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
Насос із змінною швидкістю	1	45,000	45,000
Датчики температури та тиску	4	3,500	14,000
Програмне забезпечення для управління	1	40,000	40,000
Монтажні роботи	1	20,000	20,000
Загальні витрати			119,000

Річні втрати енергії до модернізації :

$$W_{\text{втрат}} = P_{\text{втрат}} \cdot T_{\text{роботи}} = 250 \cdot 4380 = 1095000 \text{ кВт}$$

де $W_{\text{втрат}}$ – річні втрати енергії, кВт·год;

$P_{\text{втрат}}$ – потужність втрат, кВт;

$T_{\text{роботи}}$ – річний час роботи, год.

Річна вартість втрат:

$$C_{\text{втрат}} = W_{\text{втрат}} \cdot t = 1095000 \cdot 5.6 = 6132000 \text{ грн/рік}$$

де $C_{\text{втрат}}$ - річна вартість втрат, грн/рік;

t - вартість 1 кВт·год електроенергії, грн/кВт·год.

Річна економія після модернізації :

$$\Delta W = W_{\text{втрат}} \cdot 0.04 = 1095000 \cdot 0.04 = 43800 \text{ кВт/год}$$

Річна вартість економії :

$$C_{\text{економія}} = \Delta W \cdot t = 43800 \cdot 5.6 = 245280 \text{ грн/рік}$$

де $C_{\text{економія}}$ – річна вартість економії;

ΔW – річна економія енергії.

Термін окупності :

$$T_{\text{окуп}} = \frac{C_{\text{загальні витрати}}}{C_{\text{економія}}} = \frac{119000}{245280} = 0.49 \text{ року}$$

де $T_{\text{окуп}}$ – термін окупності;

$C_{\text{загальні витрати}}$ – загальні витрати на модернізацію.

Висновок фінансової ефективності:

1. Річна економія енергії становить 43800 кВт·год, що еквівалентно 245280 грн.
2. Термін окупності проекту становить приблизно 6 місяці.
3. Після завершення терміну окупності проект починає приносити значну економію.

Проект є економічно вигідним, особливо в умовах зростаючої вартості енергоносіїв. Він має високий потенціал для впровадження на промислових підприємствах, що прагнуть знизити експлуатаційні витрати та покращити екологічні показники.

4.6 Розроблення бізнес-моделі та маркетингового плану стартап-проекту

Бізнес-модель і маркетинговий план стартап-проекту базуються на створенні інноваційної автоматизованої системи охолодження компресорних установок. Ця система оптимізує їх роботу за критерієм мінімального енергоспоживання.

Основною метою проекту є зниження енерговитрат, продовження терміну служби компресорного обладнання та гарантування стабільної роботи навіть у змінних умовах. Цільовими реципієнтами проекту є промислові підприємства, енергетичні компанії, державні установи та об'єкти інфраструктури, які спрямовані на зниження експлуатаційних витрат, підвищення ефективності обладнання та забезпечення його безперебійної роботи.

Передова система стартапу автоматизує керування режимами охолодження в режимі реального часу, пристосовується до мінливих умов, зменшує споживання електроенергії та підтримує постійну температуру, тим самим мінімізуючи ймовірність аварій. Основні канали збуту – це прямі продажі великим промисловим та енергетичним компаніям, участь у тендерах на модернізацію компресорних установок на державних об'єктах, а також співпраця з виробниками компресорів для впровадження системи охолодження в нові моделі. Окрім підтримки системи для довгострокового партнерства з клієнтами та ліцензування технологій сторонніми компаніями, додатковими джерелами доходу є консалтингові послуги та навчальні програми.

Для отримання конкурентної переваги на ринку планується активна участь у виставках і конференціях, присвячених промисловій автоматизації та енергоефективності, що дозволить компанії налагодити контакти з потенційними клієнтами та партнерами. Цифровий маркетинг відіграватиме важливу роль у просуванні заходу, включаючи рекламу на спеціалізованих платформах та розсилку цільових електронних розсилок потенційним відвідувачам. Крім того, демонстрація технології за допомогою пілотних проектів допоможе зміцнити довіру серед клієнтів.

Основні конкурентні переваги системи полягають в її унікальній технології, яка використовує адаптивні алгоритми керування, високій ефективності, що забезпечує суттєву економію коштів, і легкості інтеграції в існуюче обладнання. Потенціал ринку надзвичайно високий, оскільки попит на такі рішення стрімко зростає через подорожчання енергоносіїв, необхідність модернізації компресорного обладнання та впровадження стандартів енергоефективності.

Таким чином, стартап покликаний вирішити існуючі проблеми, з якими стикаються промислові підприємства та енергетична галузь, надаючи клієнтам першокласний, економічно життєздатний та екологічно свідомий продукт. Проект має значний ринковий потенціал і викликав значний інтерес з боку клієнтів як в Україні, так і на світовій арені.

4.7 Бізнес-модель

Розробка стартап-проєкту базується на створенні ефективної бізнес-моделі, спрямованої на комерціалізацію інноваційної автоматизованої системи охолодження компресорних установок. Мета проєкту полягає в забезпеченні зниження енергоспоживання, підвищенні продуктивності та надійності компресорного обладнання. Бізнес-модель будується на інтеграції інноваційних рішень з економічними вигодами, орієнтуючись на сучасні потреби ринку промислової автоматизації.

Табл.4.8 Структура бізнес-моделі автоматизованої системи охолодження компресорів

Ключові партнери	Постачальники обладнання (насоси, датчики, програмне забезпечення); енергетичні компанії; виробники компресорних установок; науково-дослідні центри.
Ключові види діяльності	Розробка, виготовлення, встановлення систем охолодження; технічне обслуговування; адаптація системи під специфічні потреби клієнтів.
Цінність пропозиції	Енергоефективне рішення для оптимізації роботи компресорів, що дозволяє зменшити енергоспоживання на 4% та продовжити термін служби обладнання.
Взаємовідносини з клієнтами	Довгострокове партнерство, забезпечення післяпродажного сервісу; технічна підтримка; індивідуальний підхід до кожного замовника.
Споживчі сегменти	Промислові підприємства; енергетичні компанії; державні організації; виробники компресорного обладнання.
Ключові ресурси	Інноваційна технологія охолодження; кваліфікований персонал; партнерські зв'язки з виробниками обладнання.
Канали збуту	Прямі продажі; тендери; співпраця з виробниками компресорів для інтеграції систем у нові моделі; сервісне обслуговування.

Структура собівартості:

1. Витрати разові (капітальні): розробка та впровадження системи, придбання обладнання, ліцензування.
2. Витрати постійні: обслуговування, технічна підтримка, зарплата персоналу.
3. Витрати змінні: витрати на матеріали, енергію для тестування, логістика.

Потоки надходження доходу: Надходження від продажів автоматизованих систем охолодження; дохід від сервісного обслуговування; ліцензування технології стороннім компаніям.

Запропонована бізнес-модель забезпечує конкурентоспроможність на ринку завдяки інноваційності, ефективності та швидкій окупності рішень, а також гнучкому підходу до потреб клієнтів.

Висновки по розділу 4

У результаті проведеного аналізу було встановлено, що запропонований проект автоматизованої системи охолодження компресорних установок має високий потенціал для ринкової комерціалізації. Аналіз динаміки ринку показує, що попит на енергоефективні рішення у промисловій автоматизації та енергетиці стабільно зростає, зумовлений підвищенням вартості енергоносіїв і потребою підприємств у скороченні експлуатаційних витрат. Проект є рентабельним завдяки швидкій окупності (близько 6 місяців) і значній економії енергоресурсів, що досягається завдяки впровадженню інноваційних технологій.

Перспективи впровадження проекту підтверджуються зацікавленістю потенційних груп клієнтів, до яких належать промислові підприємства, енергетичні компанії, державні організації та інфраструктурні об'єкти. Попередній аналіз конкуренції показує, що бар'єри входження на ринок є помірними, а унікальність і конкурентоспроможність проекту забезпечуються адаптивними алгоритмами управління охолодженням, які інтегруються в існуючі компресорні системи. Найбільш доцільною є стратегія впровадження через співпрацю з великими клієнтами, участь у тендерах і ліцензування технології для сторонніх компаній.

Табл.4.9 Узагальнюючі техніко-економічні показники

Показники	Значення
Річний випуск продукції, од.	50
Капіталовкладення, тис. грн.	119
Собівартість продукції, тис. грн	90
Ціна продукції, тис. грн	150
Прибуток, тис. грн	60
Рентабельність, %	66.7
Коефіцієнт економічної ефективності	0.25
Період повернення капіталовкладень, років	0.49

З огляду на наведені фактори, подальша імплементація проекту є доцільною, оскільки запропоноване рішення відповідає сучасним потребам ринку та забезпечує високу економічну ефективність.

Підсумовуючи, проект є економічно доцільним, конкурентоспроможним та перспективним для впровадження в енергетичній і промисловій галузях, як в Україні, так і за її межами.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз, який встановив основні фактори, що впливають на енергоспоживання компресорних установок. До них відносяться тип компресора, робоче середовище, теплове навантаження, та умови охолодження.

Виконано розрахунки споживання стисненого повітря цехом, за результатами яких обрано компресор з параметрами продуктивності 250 м³/год і кінцевим тиском 0,9 МПа, що відповідає потребам виробництва.

Розраховано витрати електроенергії компресорної установки при змінних умовах охолодження. Визначено, що режим з температурою стисненого газу на проміжній стадії на рівні 60 °С є оптимальним за критерієм мінімуму електроспоживання.

Розроблена автоматизована система управління компресорною установкою, яка забезпечує регулювання роботи компресора в реальному часі для підтримання оптимального за електроспоживанням режиму.

Розроблено стартап-проект автоматизованої системи охолодження компресорних установок. Проект має високу економічну доцільність, швидкий термін окупності (6 місяців) та значний потенціал для комерціалізації. Впровадження цієї системи дозволяє знизити енерговитрати підприємства та підвищити енергоефективність компресорного обладнання.

Перелік джерел

1. Енерго та ресурсоощадні установки. Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С. П. Шевчук, О. М. Попович, О. В. Мейта.– 183 с.
2. Г.Г. Леонт'єв, В.І.Дешко, В.В.Дубровська, О.В. Ленькин, Розрахунок системи постачання стисненого повітря промислової ділянки: Метод. вказівки до виконання розрахункової роботи з курсу „Системи виробництва та розподілу енергії” – К.: ІВЦ, Видавництво ”Політехніка”, 2004.- 33 с.
3. Савін, О. В. "Енергоефективність промислових компресорних установок". – Київ: Техніка, 2019. – 256 с.
4. Петренко, М. В. "Методи оптимізації систем охолодження компресорів". – Харків: НТУ "ХПІ", 2021. – 312 с.
5. Коваленко О. В. Рекуперація тепла в компресорних установках: перспективи та методи впровадження // Енергоефективність та ресурсозаощадження. – 2020. – №3. – С. 45-52.
6. Бокуть І.Я., Жильцов А.М. Термодинаміка компресорних установок. Харків: НТУ "ХПІ", 2010.
7. Костенко В.П. Енергетика процесів стиснення газів. Київ: Наукова думка, 2005.
8. Сидоренко В. М. Оптимізація параметрів системи охолодження промислових компресорів // Промислова теплотехніка. – 2019. – Т. 41. – №5. – С. 20-28.
9. Петренко А. І. Енергоефективність та частотні перетворювачі: підвищення ефективності електродвигунів // Енергетика і електрифікація. – 2018. – №6. – С. 33-38.

10. Гончарук І. О. Автоматизація та моніторинг промислових установок: вплив на енергоефективність // Інженерія та автоматизація процесів. – 2021. – №4. – С. 15-22.

11. Компресорні станції : підручник / Г. А. Бондаренко, Г. В. Кирик. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – 385 с.

12. Конспект лекцій по дисципліні «Компресори та компресорні станції» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 144 – Теплоенергетика / Укладач Р.О. Клімов. – Кам'янське: ДДТУ, 2016. – 96с.

13. Енергозбереження при виробництві стисненого повітря., [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://um.co.ua/8/8-2/8-216648.html>

14. Копытов Ю.В. Экономия электроэнергии в промышленности. Справочник. –М.: Энергия, 1978. – 120 с.

15. Шевчук, Н. А. Впровадження та реалізація стартап проекту геомехатронного комплексу / Шевчук Н. А., Зайченко С. В., Кривда О. В. // Сучасні проблеми економіки і підприємництво : збірник наукових праць. – 2018. – Вип. 21. – С. 94–101. – Бібліогр.: 11 назв.

16. Пат. 113299 МПК (2016.01) F04C 18/16 F04C 23/00 F04C 28/06 (2006.01) Компресорна установка та її застосування, Дезірон Андрієс Ян Ф., Атлас копко ерпавер, Намлозе веннотсхап, - № а201408559, опубл. 10.01.2017 бюл. 1.

17. Пат.121475 МПК F28D 7/00 F28D 7/02 (2006.01) F28D 7/14 (2006.01) B67D 1/08 (2006.01) F25B 5/02 (2006.01) F25D 5/04 (2006.01) F28D 21/00 Система охолодження із керуванням тиском, Схонен Вільхельмус Франсікус, Франке технолоджи енд трейдмарк елтіді, - № а201611907, опубл. 10.06.2020 бюл. 11.