

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри КСУ
_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ
_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійної програми
«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»
на тему: «СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КОМПРЕСОРНОЮ
УСТАНОВКОЮ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ ПІДСТАНЦІ 330кВ»

Здобувача групи СУ.м-22

Зимовця Андрія Сергійовича

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

(підпис)

Андрій Зимовець

Керівник _____ к.ф.-м.н., доцент С.В.Соколов _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

РЕФЕРАТ

Зимовець Андрій Сергійович. Система автоматичного керування компресорною установкою високовольтної підстанції 330кВ. Кваліфікаційна робота магістра. Сумський Державний Університет, Суми, 2023 р.

Робота містить 95 сторінок основного тексту, 41 рисунки, 5 таблиці; список використаних джерел з 25 найменувань та 3 додатки.

Робота присвячена дослідженню системи керування компресорною установкою високовольтної підстанції. Запропоновані рішення дають можливість зменшити витрати електроенергії, збільшити ресурс обладнання та уникнути можливих хибних дій захистів.

Ключові слова: компресорна установка, математична модель, стиснене повітря, високовольтна підстанція, повітряні вимикачі, Matlab, SCADA.

ABSTRACT

Zymovets Andrii Sergiyovich. The automatic control system for a 330kV high-voltage substation compressor plant. Qualification work of the master. Sumy State University, Sumy, 2023.

The work contains 95 pages of the main text, 41 figures, 5 tables; list of used sources from 25 names; 3 additions.

The work is dedicated to studying the control system of a high-voltage substation compressor unit. The proposed solutions offer the possibility to reduce electricity consumption, increase equipment lifespan, and avoid potential erroneous protection actions.

Key words: compressor unit, mathematical model, compressed air, high-voltage substation, air circuit breakers, Matlab, SCADA.

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

_____ П. В. Леонтєв

« ___ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

Тема роботи: Система автоматичного керування компресорною установкою високовольтної підстанції 330кВ. Затверджено наказом ректора університету №1097-VI

Термін подання закінченої роботи 14.12.2023 р.

Вихідні дані до роботи: завдання кафедри, технічна документація, джерела інформації відкритого доступу.

Зміст роботи: контури системи керування компресорною установкою високовольтної підстанції, обладнання для генерування стисненого повітря, математична модель об'єкту керування, імітаційна модель системи керування компресорною установкою, SCADA, Дослідження роботи: системи генерації та регулювання стисненого повітря в пневмережі високовольтної підстанції.

Календарний план

Номер етапу	Зміст етапу проектування	Терміни виконання
1	Аналіз завдання кафедри. Підбір та аналіз літератури	01.09.2023 10.09.2023
2	Аналіз параметрів пневмомережі та систем керування компресорною установкою	11.09.2023 – 25.09.2023
3	Аналіз математичних моделей компресорних установок	26.09.2023 – 20.10.2023
4	Імітаційне моделювання системи керування параметрами компресорної установки. Дослідження роботи системи генерації та регулювання стисненого повітря в пневмомережі високовольтної підстанції	21.10.2022 – 10.11.2023
5	Створення SCADA системи керування компресорною установкою високовольтної підстанції	11.11.2023 – 09.12.2023
6	Технічне оформлення кваліфікаційної роботи та її презентації. Перевірка на відсутність плагіату. Подання роботи до захисту	10.12.2023– 18.12.2023

Дата видачі завдання «01» 09 2023 р.

Здобувач ступеня магістра

студент гр. СУ.м-22

А.С. Зимовець

Керівник проекту

к.ф.-м.н., доцент

С.В. Соколов

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ПАРАМЕТРИ ТА ТИПИ КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВОКЮ.....	11
1.1 Класифікація компресорних установок.....	11
1.2 Загальний опис поршневих компресорів.....	12
1.3 Принцип дії компресора поршневого типу.....	13
1.4 Основні деталі і конструктивні особливості поршневих компресорів.....	15
1.5 Типи, види і конструктивні особливості поршневих компресорів.....	17
1.6 Переваги і недоліки поршневих компресорів.....	18
1.7 Області застосування поршневих компресорів.....	18
1.8 Принципова схема влаштування компресорної установки.....	19
РОЗДІЛ 2 ВИХІДНІ ПОЛОЖЕННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	21
2.1 Регулювання подачі компресорів.....	21
2.2 Вибір прийнятних показників якості.....	27
2.3 Обґрунтування вибору системи регулювання приводу.....	28
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ.....	35
3.1 Розробка структурної схеми.....	35
3.2 Розрахунок параметрів передаточної функції об'єкта управління.....	38
3.3 Синтез контуру регулювання тиску.....	45
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ САУ КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ.....	48
4.1 Аналіз динамічних режимів без врахування обмежень.....	49
4.2 Аналіз динамічних режимів з урахуванням обмежень.....	55
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ та SCADA.....	59
5.1 Загальні положення з технічної реалізації.....	59
5.2 Визначення основних елементів електропривода.....	71
5.3 Визначення апаратів захисту.....	81

5.4 Розробка SCADA системи.....	84
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.....	94
ДОДАТКИ.....	96

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КУ – компресорна установка

АСУ – автоматизована система управління

ОР – об'єкт регулювання

САР – система автоматичного регулювання

ЕОМ – електронна обчислювальна машина

ТП – технологічний процес

АКР – аналітичне конструювання регуляторів

ЕД – електродвигун

ТГ – тахогенератор

ДТ – датчик тиску

ПФ – передаточна функція

ПЧ – перетворювач частоти

АД – асинхронний двигун

ВСТУП

Актуальність теми. Тема є актуальною з кількох причин:

- **Ефективність і автоматизація:** Високовольтні підстанції відіграють важливу роль у подачі та розподілі електроенергії. Використання автоматичних систем керування може покращити ефективність їх функціонування, зменшити витрати на обслуговування та підвищити надійність.
- **Безпека:** Високовольтні підстанції потребують високого рівня безпеки та надійності в управлінні. Автоматичні системи можуть допомогти у виявленні та реагуванні на аварійні ситуації, що забезпечить захист персоналу та майна.
- **Енергоефективність:** Завдяки автоматичному керуванню можна забезпечити оптимальне використання електроенергії та зменшити втрати в мережах, що сприяє підвищенню енергоефективності.
- **Інтеграція зі смарт-технологіями:** У сучасних системах електророзподілу важливо мати можливість інтегрувати високовольтні підстанції в загальну мережу керування, що дозволяє віддалено контролювати та оптимізувати їх роботу.

Проблема. Є декілька важливих проблем:

- **Зменшення впливу на навколишнє середовище:** Вдосконалення системи керування може допомогти зменшити викиди парникових газів та інший негативний вплив на навколишнє середовище.
- **Зростання обсягів виробництва та споживання електроенергії:** З плином часу збільшуються обсяги виробництва та споживання електроенергії, що ставить підвищені вимоги до керування високовольтними підстанціями.
- **Інтелектуалізація мережі:** В контексті розвитку "розумних мереж" (Smart Grids), автоматичне керування підстанціями стає ще важливішим для забезпечення динамічної реакції на змінні умови та попит на електроенергію.

Загалом, ця тема є актуальною через поєднання росту енергетичних потреб і нарощування технологічних можливостей для оптимізації управління

високовольтними підстанціями, що впливає на безпеку, надійність та ефективність енергосистеми загалом.

Мета. Аналіз і синтез оптимальної структури та параметрів системи автоматичного регулювання компресорної установки.

Об'єкт дослідження. Компресорна установка.

Предмет дослідження. Оптимізація процесу автоматичного керування компресорної установки.

Задачі дослідження:

- 1) Розробку функціональних схем системи автоматичного керування.
- 2) Вибір компонентів та параметрів системи.
- 3) Математичний опис об'єкта керування і системи автоматичного регулювання в цілому.
- 4) Моделювання та дослідження статички та динаміки системи автоматичного управління компресорною установкою за допомогою ЕОМ.

Наукова новизна одержаних результатів. Синтезована оптимальна система управління компресорної установки за критерієм зменшення витрат електроенергії за допомогою ПД регулювання тиску.

Теоретична значущість дослідження. Використовуючи цифрове моделювання у програмному пакеті MatLab Simulink, було проведено аналіз динамічних режимів системи автоматичного керування. Отримані результати моделювання демонструють, що розроблена система забезпечує необхідні характеристики стабілізації тиску.

Практична цінність. Розроблена САУ компресорної установки забезпечує заявлені технічні характеристики при максимальному економічному ефекті, відповідає вимогам безпеки при монтажі, експлуатації, обслуговуванні і ремонту, задовольняє вимоги компресорних установок щодо якості перехідних процесів та швидкодії.

Публікації. За темою роботи опубліковано тези доповідей на науково-технічній конференції:

А.С. Зимовець, С.В. Соколов «Система автоматичного керування компресорною установкою високовольтної підстанції 330 кВ», Суми: СумДУ, 2023.

Структура та обсяг магістерської роботи. Робота містить вступ, 5 розділів, загальні висновки, список використаних джерел та додатків. Обсяг роботи складає 95 сторінок, 41 рисунки, 5 таблиць, 3 додатки, 25 використаних джерела, 3 додатки.

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО КОМПРЕСОРНУ УСТАНОВКУ

1.1 Класифікація компресорних установок

Компресор - це електричний пристрій або машина, яка використовується для підвищення тиску та переміщення газоподібних речовин шляхом стиснення.

Компресори мають широкий спектр конструкцій та типів і можуть відрізнятися за рівнем тиску та продуктивністю.

- Вакуум-компресори та газодувки: це машини, що відсмоктують газ з простору з тиском нижче або вище атмосферного. Повітродувки та газодувки створюють потік газу, дозволяючи досягти надлишкового тиску від 10 до 100 кПа (0,1 ... 1 атм), а в спеціальних випадках до 200 кПа (2 атм). При відсмоктуванні повітродувки можуть створювати розрідження зазвичай в межах 10-50 кПа, у деяких випадках до 90 кПа і діяти як вакуумний насос "низького вакууму".
- Компресори низького тиску: призначені для нагнітання газу при тиску від 0,15 до 1,2 МПа.
- Компресори середнього тиску: від 1,2 до 10 МПа.
- Компресори високого тиску: від 10 до 100 МПа.
- Компресори надвисокого тиску: призначені для стиснення газу з тиском вище 100 МПа.

Щодо принципу роботи, компресори мають широкий спектр у різних варіаціях. Найбільш використовувані типи компресорів включають:

- поршневі;
- гвинтові;
- спіральні;
- кулачкові;
- шибєрні;
- лопатеві;

Оскільки на високовольтних підстанціях використовуються лише поршневі, детально розглянемо саме їх.

1.2 Загальний опис поршневих компресорів

Поршнева компресорна установка — це тип компресора, що використовує поршкову систему для стиснення газу чи рідини. Цей вид компресорів є одним з перших, що з'явився на виробництві. Вони активно застосовуються як у промисловості, так і для напівпромислових та побутових цілей.

Основні компоненти поршневого компресора включають робочий циліндр, поршень та клапани (всмоктування та нагнітання), що розташовані в кришці циліндра. Тиск у просторі компресора цього типу створюється завдяки поступальним рухам поршня. Рухи здійснюються за допомогою колінчастого вала та кривошипно-шатунного механізму.

Такі компресори можуть мати один або кілька циліндрів, які можуть бути розташовані горизонтально, вертикально, або у формі V- чи W-подібної конфігурації. Вони можуть бути одно- або двоступеневими (якщо поршень працює з обох сторін), а також можуть мати багатоступінчасте або одноступінчасте стиснення.

Зазвичай в комплектацію такого обладнання входить автоматичне регулювання продуктивності для підтримки сталого тиску в трубопроводі. Найпростіший спосіб регулювання - зміна частоти обертання валу компресора.

Поршневі компресорні установки представлені у багатьох варіантах і призначені для різноманітних промислових потреб. Є безліч ситуацій, коли поршневі компресори є оптимальним вибором:

Великі перепади об'ємів стисненого повітря, для чого поршневі компресори ідеально підходять.

Використання в умовах, де є забруднення, підвищена вологість або різкі зміни температури (такі, як при розфасовці цементу, на млинах чи у складах вугілля).

Стиснення агресивних газів.

Високий рівень тиску, де поршневі агрегати забезпечують роботу в конструкціях з одним, двома і навіть більше циліндрами (до 40 атмосфер).

Плюси використання:

- відносно низька вартість.
- просте технічне обслуговування (зрозумілість внутрішніх механізмів роботи).
- підходять для високого тиску.

Недоліки:

- існують більш економні варіанти;
- відносно часті поломки;
- гучність.

1.3 Принцип дії компресора поршневого типу

Компресорна установка, заснована на принципі роботи поршневого компресора, працює досить просто. Звичайна модель такого агрегату включає корпус (зазвичай зроблений з чавуну), циліндр (розташований горизонтально, вертикально або під нахилом), поршень чи поршні, клапани для всмоктування та нагнітання повітря.

Основні складові поршневих компресорів включають робочий циліндр, поршень та клапани (для всмоктування та нагнітання), які розміщені в кришці циліндра. Щоб забезпечити рух поршня зворотно-поступальним, використовується механізм з кривошипом та шатуном, який підключається до колінчастого вала.

Під час роботи поршень проводить прямий рух, передаючи його через кривошипно-шатунний механізм. Під час зворотно-поступальних рухів поршень стискає атмосферне повітря, а потім випихає його у систему приєднаної трубопроводної мережі. Нижче наведена схема роботи поршневого компресора:

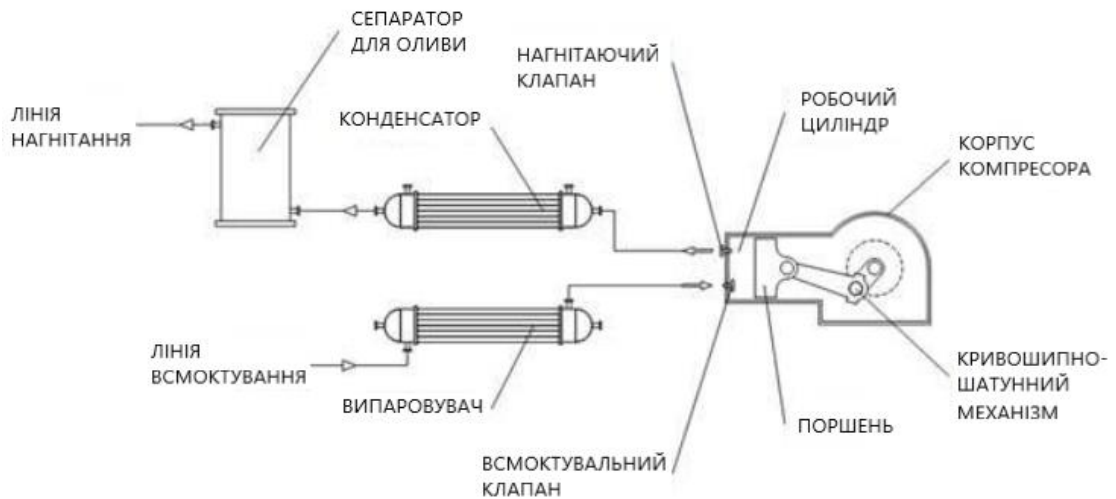


Рисунок 1.1 - Типова конструкція поршневого компресора

Поршнева компресорна установка виконує своє завдання на основі простого принципу. В одному оберті валу відбувається два ходи поршня. У кожному циліндрі за цей час відбувається повний цикл роботи компресора.

Під час руху поршня вниз у випаровувачі створюється розрідження, яке дозволяє повітрю потрапляти через всмоктувальний клапан у циліндр. При піднятті поршня повітря стискається, збільшується тиск, та виштовхується через нагнітальний клапан до конденсатора. Потім поршень змінює напрямок, нагнітальний клапан закривається, і процес знову починається. Цей робочий цикл повторюється безперервно.

Рух поршня вниз створює розрідження, що відкриває всмоктувальний клапан і впускає повітря у камеру для стиснення. При досягненні максимального об'єму стиснення клапан закривається, що призводить до зростання тиску повітря.

Об'єм камери напряму впливає на тиск: менший об'єм – більший тиск. Коли досягається необхідний тиск, відкривається нагнітальний клапан, випускаючи повітря з камери.

Олія, яка змашує циліндр та поршень, може змішуватися з подаваним повітрям, що погіршує його якість. Сепаратор оливи в лінії подачі допомагає видалити частинки оливи з потоку повітря.

Часто на заводах компресори купуються по два, один працює, а інший є в резерві або на обслуговуванні. Це забезпечує неперервну роботу обладнання навіть під час ремонту чи обслуговування.

1.4 Основні деталі і конструктивні особливості поршневих компресорів

На сьогоднішній день поршневі компресорні установки є одними з найпоширеніших устаткувань для стиснення повітря. Вони використовують двосторонній поршневий принцип, стискаючи повітря. Цей тип компресора може використовувати обидві сторони поршня для стискання повітря.

Двоступеневі поршневі компресорні установки, що використовують принцип подвійної дії, виробляють високоякісне повітря і широко застосовуються в виробничих процесах, де вимагається високий стандарт технологій. Однак такі компресори мають значні розміри та потребують складних ремонтних рішень.

Основні компоненти конструкції поршневого компресора включають поршень, циліндр, камеру, колінчастий вал, кривошипно-шатунний механізм та клапани (впускний і випускний), а також різні види приводу (електричний, бензиновий, дизельний).

Ця конструкція компресорів має просту будову, а заміна запасних частин і ремонт є доступними. Проте обладнання вимагає регулярного технічного обслуговування.

На ринку представлено безліч модифікацій поршневих компресорів з різними характеристиками. Існують одноступеневі, багатоступеневі компресори, а також відмінності за методом всмоктування, наявністю ущільнювальних кілець та інші. Це різноманіття включає компресори, які потребують мінеральних олів для змащення, а також ті, що працюють без цієї потреби.

Багато моделей поршневих компресорних установок класифікуються за типом приводу, рівнем кінцевого тиску, кількістю ступенів стиснення та специфічними властивостями.

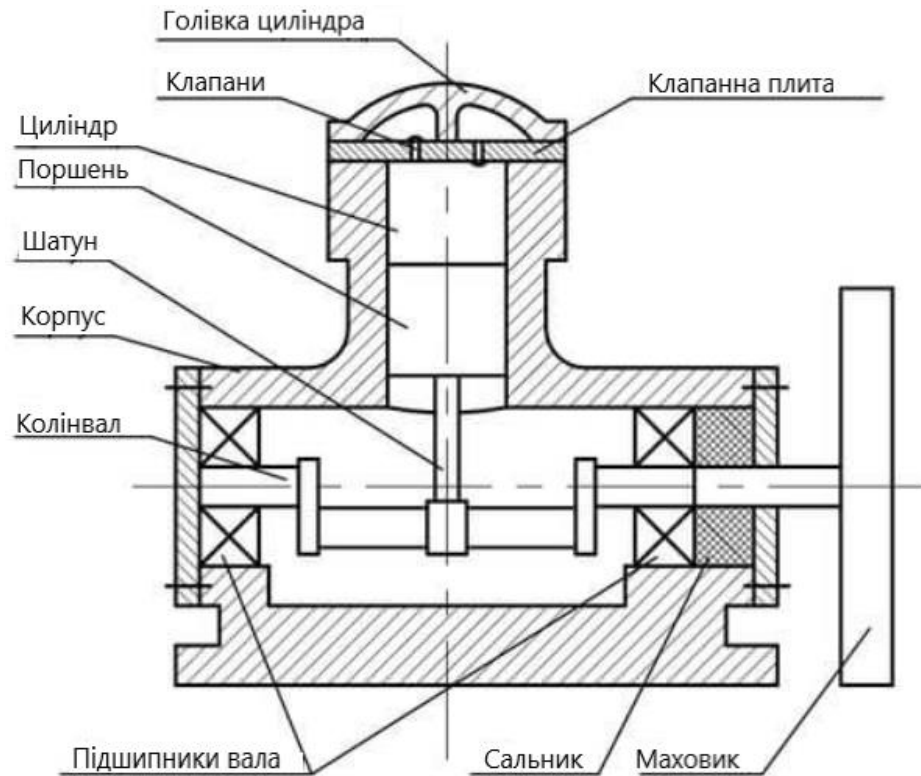


Рисунок 1.2 - Принципова схема поршневого компресора

Шатун і поршень з'єднані поршневим пальцем. Поршень рухається до крайнього положення циліндрів на відстань, рівну 2-му радіусу кривошипа. Ущільнення поршня забезпечують кільця, що запобігають потраплянню повітря в картер.

Камери на головці циліндра мають всмоктувальний і напірний клапани. Вони призначені для перекриття отворів між камерою і циліндром.

Підключення випаровувача або паперових фільтрів знаходиться на всмоктувальному трубопроводі, а конденсатор під'єднаний до нагнітального трубопроводу.

Залежно від розташування циліндрів установки, поршневі компресори можуть бути вертикальними, горизонтальними або кутовими.

1.5 Типи, види і конструктивні особливості поршневих компресорів

Усі компресори та компресорні установки призначені для здійснення стискання та подачі повітря або газу під тиском. Поршневий компресор - це той, де поршень виконує рухи вгору та вниз всередині циліндра. Існують різні відомі типи поршневих компресорів:

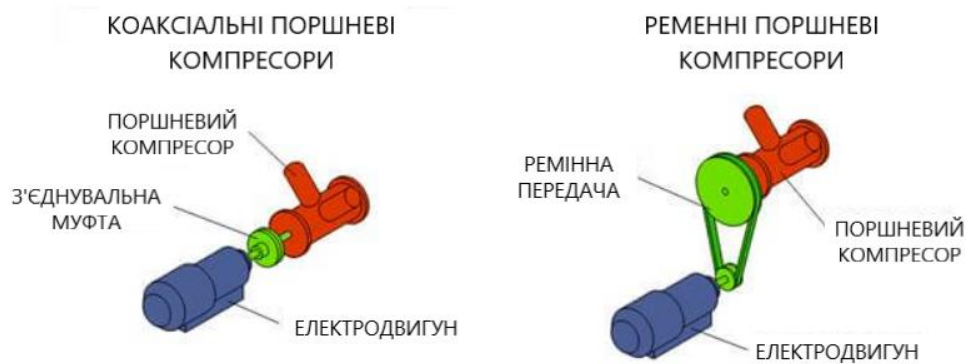


Рисунок 1.3 - Типова конструкція коаксіального та ремінного компресорів

У коаксіальних поршневих компресорах колінвал безпосередньо з'єднується з електричним приводом через муфту, що запобігає втраті потужності через тертя. Ця конструкція відрізняється компактністю та різними методами змащування. Наприклад, у безмасляних моделях циліндро-поршнева група не потребує змащення, що гарантує вихідне стиснене повітря без олизових домішок. Такі апарати особливо популярні в харчовій та медичній галузях.

Масляні компресори з ремінним приводом характеризуються високою продуктивністю та тривалим функціонуванням. Вони можуть працювати протягом тривалого часу з невеликими перервами. Можливо вмістити значну кількість стисненого повітря у ресивері (від 25 до 500 л) з потужністю двигуна від 1,5 до 15 кВт. Завдяки ременевій передачі, частоту обертання можна регулювати, забезпечуючи високу продуктивність. Такі компресори часто використовуються у будівництві, шиномонтажних майстернях та інших галузях, де необхідна велика кількість повітря та високий тиск. Вони мають надійну систему охолодження, яка запобігає перегріву та зносу.

1.6 Переваги і недоліки поршневого компресора

Переваги:

- Економічність у вартості;
- Проста конструкція, яка полегшує обслуговування та ремонт;
- Довговічність та продуктивність після ремонту;
- Покращення працездатності завдяки обслуговуванню кожні 500 годин;
- Ефективність в експлуатації;
- Висока продуктивність та можливість підтримувати стабільні показники;
- Зручне функціонування в періодичному режимі при частому включенні та відключенні.

Недоліки:

- Висока шумність та вібрація, що вимагає окремого приміщення з міцним фундаментом;
- Обмежена продуктивність (до 3,5 куб. метрів повітря в хвилину);
- Особливості використання через якість стисненого повітря або обмежену продуктивність;
- Висока споживана енергія;
- Регулярне технічне обслуговування: максимальний інтервал - 500 годин;
- Необхідність кількох фахівців для обслуговування та ремонту.

1.7 Області застосування поршневого компресора

Поршкові компресори мають широке застосування у різноманітних галузях промисловості та в побуті. Їх використовують:

На електростанціях;

В сталеливарній та машинобудівній сфері;

У текстильному виробництві;

На військових об'єктах;

У системах гідравліки, пневматики, холодильників та криогеніки;

Для заправки балонів;

Для живлення верстатів з ЧПУ, включаючи лазерне різання;
На автосервісах, шиномонтажних та інших сервісних станціях;
У будівельній та малярній сферах для пневмоінструменту.

Такі компресори для особистого використання майже рівнозначні їхнім промисловим аналогам за надійністю. Вони застосовуються для фарбування автомобілів, стін, обробки деталей тощо. Безмасляні моделі використовуються у медицині для заповнення балонів дихальних апаратів, де необхідне чисте повітря без додаткових домішок (вологи, вуглеводнів, оливи і т.д.).

1.8 Принципова схема влаштування компресорної установки

Будь-яка компресорна установка поршневого типу складається з таких частин:



Рисунок 1.4 - Принципова схема поршневого компресорної установки

Головні складові на цій схемі:

- 1) Резервуар для зберігання стиснутого повітря;

- 2) Механізм з поршнями;
- 3) Електричний двигун;
- 4) Пристрій для автоматичного контролю тиску;
- 5) Передавальний пристрій з показником тиску;
- 6) Клапан, що регулює напрямок потоку;
- 7) Колесо, ротор чи вентилятор;
- 8) Гнучка опора або амортизатор.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ КОМПРЕСОРНИМИ УСТАНОВКАМИ

2.1 Регулювання подачі компресорів

Регулювання подачі компресорів в компресорних установках може здійснюватися різними способами залежно від типу компресора та вимог процесу:

- 1) Регулювання швидкості обертання: у компресорах із двигунами, які підтримують змінну швидкість обертання, регулювання подачі може здійснюватися шляхом зміни обертової швидкості компресора. Зменшення обертової швидкості знижує подачу, а підвищення - збільшує її;
- 2) Регулювання випускного тиску: встановлення заданого тиску на виході компресора може вплинути на подачу газу. При досягненні заданого тиску компресор може зупинитися або перейти в режим утримання тиску;
- 3) Регулювання клапанів на вході або виході: зміну подачі можна досягнути шляхом регулювання спеціальних клапанів на вході або виході компресора. Відкриті клапани дозволяють більше газу пройти, а закриті обмежують подачу;
- 4) Мультиступеневе регулювання: в деяких випадках, компресори можуть мати кілька ступенів стиснення, і регулювання може відбуватися шляхом включення або вимикання окремих ступенів, відповідно до поточних вимог до подачі;
- 5) Регулювання робочого часу: компресор може бути програмованим на роботу з певним графіком або на певний час. Це може забезпечити регульовану подачу, коли потрібно в певні періоди часу;
- 6) Регулювання за допомогою датчиків: системи керування компресорами можуть використовувати датчики тиску, температури та інші параметри для автоматичного регулювання подачі, щоб підтримувати заданий стан процесу;

Регулювання подачі важливе для забезпечення оптимального функціонування компресорів та відповідності вимогам процесу. Різні методи можуть бути використані для досягнення цієї мети, і вибір конкретного методу залежить від потреб та конкретної системи.

На промислових підприємствах найпоширенішим методом регулювання є використання дроселів або заслінок. Цей метод полягає в тому, що заслонки встановлюються в нагнітаючому трубопроводі для контролю кількості газу або рідини, яка подається компресором. Проте, ККД (коефіцієнт корисної дії) регулювання через дроселі значно нижчий, ніж при регулюванні швидкості обертання, де економія енергії часто перевищує 50%. Цей метод застосовується переважно в малопотужних установках і має обмежений діапазон регулювання. Головною перевагою цього методу є його простота в реалізації.

Регулювання компресорів на високовольтних підстанціях найчастіше здійснюється методом переривчастого регулювання. Метод має свої недоліки, включаючи низький коефіцієнт корисної дії, часті включення та вимикання компресорів, які можуть впливати негативно на обладнання та трубопроводи, та обмежену можливість здійснення плавного регулювання. При використанні цього методу регулювання необхідно враховувати резерв потужності двигунів. Однак перевагою цього методу є висока економічність, оскільки він не призводить до додаткових втрат при регулюванні подачі.

Регулювання швидкості обертання дозволяє досягати точного та безперервного керування. Застосування цього методу регулювання призводить до зменшення навантаження на трубопроводи і клапани, що подовжує їх термін служби та зменшує необхідність в обслуговуванні.

На відміну від прямого пуску, компресорний електродвигун, який регулюється за допомогою перетворювача частоти, споживає лише частину пускового струму з мережі. Це дозволяє зменшити розміри електроустаткування та витрати на його придбання. Використання приводу із перетворювачем частоти може зменшити габарити двигуна на 10-20%.

Статичне навантаження на магістраль зменшується, оскільки система не функціонує постійно при високому тиску, але підтримує тиск на встановленому рівні.

Динамічні навантаження помітно зменшуються при "плавному" регулюванні порівняно з переривчастим регулюванням. Це дозволяє уникнути гідравлічних ударів, які зношують трубопроводи та обладнання, і може подвоїти термін служби обладнання.

Регулювання шляхом зміни швидкості обертання також призводить до економії енергії.

З урахуванням вищесказаного, обираємо регулювання швидкості обертання компресора як метод керування.

Механізми відцентрового типу, завдяки особливостям їх конструкції та технологічного процесу, не потребують зміни напрямку обертання. Їх швидкість синхронізується зі швидкістю двигуна, і тому електропривід для цих установок зазвичай виконується без редуктора та зазвичай постачається разом з механізмом.

Ця група механізмів відзначається полегшеними умовами для їх запуску. Як у нормальних умовах, так і при аварійному вмиканні, ці механізми, зазвичай, запускаються без навантаження, і момент пуску не перевищує 30-35% від номінального моменту. Для вентиляторних установок, які запускаються під навантаженням, момент опору зростає поступово зі збільшенням швидкості, що сприяє зручній взаємодії з механічними характеристиками асинхронних двигунів. Внаслідок цього, прямий пуск розглянутих механізмів із асинхронним короткозамкненим ротором або синхронним двигуном із асинхронною пусковою обмоткою відбувається практично при сталому динамічному моменті. Ці особливості дозволяють у більшості випадків використовувати для їх приводу нерегульовані асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. У великопотужних установках, де сумарний момент інерції електроприводу значно перевищує момент інерції двигуна, прямий пуск може бути зтяжним та супроводжуватися значним нагріванням обмоток асинхронного

короткозамкненого ротора або синхронного двигуна. Тому для електроприводу цих установок застосовують асинхронні двигуни з фазним ротором, особливо там, де регулювання швидкості не є обов'язковим. Використання методу реостатного пуску для цих двигунів сприяє полегшенню процесу розгону установки, зменшує пусковий струм та обмежує нагрівання обмоток двигуна.

Багато компресорних установок працюють в умовах агресивного та вибухонебезпечного середовища, високих температур та вологості. У таких установках переважно використовують асинхронні двигуни в закритому корпусі, і для особливо важких умов застосовують спеціально сконструйовані двигуни.

У випадках, коли потрібне плавне та автоматичне регулювання подачі, використовують регульований електропривід. Характеристики механізмів відцентрового типу сприяють ефективній роботі регульованих електроприводів як стосовно статичних навантажень, так і стосовно необхідного діапазону регулювання швидкості. З механічних характеристик видно, що при зниженні швидкості, принаймні квадратично, зменшується момент опору на валу двигуна. Це сприяє покращенню теплового режиму двигуна при роботі на зниженій швидкості. Діапазон регулювання швидкості, за відсутності статичного напору $N_{ст} = 0$, зазвичай не перевищує заданий діапазон зміни подачі.

В середньому, для регульованих механізмів відцентрового типу потрібний діапазон регулювання швидкості, який, як правило, не перевищує 2:1. Ці характеристики механізмів, а також відносно низькі вимоги до жорсткості механічних характеристик, дозволяють успішно застосовувати прості варіанти регулювання асинхронного електроприводу.

Проаналізуємо основні варіанти регульованих електроприводів, які застосовуються.

У випадку установок з невеликою потужністю (7-10 кВт), завдання регулювання успішно вирішується за допомогою системи регулювання напруги, яка використовує асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Також може бути застосований тиристорний комутатор як регулятор напруги. Механічна

характеристика вентилятора навантаження дозволяє забезпечити стабільну роботу електроприводу в широкому діапазоні швидкостей без необхідності зворотного зв'язку.

Зміна технологічного режиму у таких системах протікає повільно і не вимагає високої швидкості реакції. Тому для регулювання напруги може бути використаний трифазний магнітний підсилювач, який підключається до статора. Ще одним варіантом є імпульсний метод регулювання швидкості асинхронного двигуна. Тиристорний ключ, відкриваючись і закриваючись, змінює середнє значення додаткового опору протягом циклу комутації. Цей опір пропорційний широтно-імпульсній модуляції. Змінюючи широту імпульсів, можна отримати різні механічні характеристики електроприводу. Широта імпульсів залежить від напруги, що подається в систему керування тиристорним ключем. Зауважте, що критичний режим двигуна зменшується при збільшенні додаткового опору, що обмежує діапазон швидкостей стійкої роботи приводу навіть при "вентиляторній" характеристиці механізму. Зворотний зв'язок за швидкістю гарантує жорсткість механічних характеристик і стабільну роботу закритої системи електроприводу в потрібному діапазоні швидкостей.

Один із загальних недоліків у варіантах регульованого електроприводу полягає у тому, що при зниженні швидкості самого двигуна виникають втрати ковзання. Ці втрати призводять до додаткового нагрівання двигуна і вимагають підвищення встановленої потужності двигуна.

У випадках, коли можна використовувати асинхронний двигун з фазним ротором, можливості регульованого електроприводу розширюються. Додавання додаткового опору в роторний ланцюг дозволяє зменшити частину втрат ковзання в обмотках двигуна. Це допомагає зменшити необхідне підвищення потужності двигуна та розширити діапазон потужностей приводу при використанні розглянутих раніше методів регулювання швидкості. Наприклад, імпульсний метод регулювання виявляється більш придатним для комутації додаткового опору в роторному ланцюзі. У цьому випадку механічні характеристики приводу

забезпечують стабільну роботу в значному діапазоні швидкостей при відкритій системі електроприводу.

У всіх розглянутих варіантах виникають великі втрати ковзання, які перетворюються на втрати тепла в обмотках двигуна, в регулювальних опорах або в муфті ковзання, і як результат, ККД електроприводу виявляється низьким. Тому для електроприводів механізмів з великою потужністю від сотень до тисяч кіловатт застосовують каскадні методи регулювання швидкості, в яких втрати ковзання повертаються до мережі або на вал двигуна.

У великих діапазонах регулювання ($D > 2$) і при високих вимогах до жорсткості механічних характеристик електроприводу може бути обрана перспективна схема, яка включає транзисторний перетворювач частоти та асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Це розв'язання не вимагає використання електричного гальмування та можливо для приводів механізмів відцентрового типу, що спрощує структуру транзисторного перетворювача частоти та дозволяє його реалізувати на базі автономного інвертора напруги та керованого випрямляча.

Раніше, через відсутність надійних та доступних перетворювачів частоти для довготривалого регулювання швидкості компресорів, була спроба використовувати перетворювачі напруги для здійснення параметричного регулювання.

Цей метод виглядає привабливим через свою простоту та низьку вартість. Проте існує основний недолік параметричного регулювання в довготривалому режимі - великі енергетичні втрати в електродвигуні. Щоб спробувати використовувати цей метод, люди були змушені збільшувати встановлену потужність електродвигуна в 2-2,5 рази та використовувати спеціально погіршені ротори з підвищеним ковзанням.

Зрозуміло, що в таких умовах система з дешевим перетворювачем напруги стає надто витратною та неефективною для практичного використання. Система із перетворювачем частоти та автоматичним регулюванням швидкості, в якій

швидкість двигуна регулюється шляхом зміни частоти живлення, повністю усуває недоліки, що були описані раніше. У цій системі можна зекономити електроенергію приблизно в 2 рази, оскільки у системах із перетворювачами напруги половина заощадженої енергії розсіюється в самому електродвигуні, що негативно впливає на термін служби його підшипників та інших деталей.

Таким чином, маємо важливий висновок: найбільш ефективний спосіб регулювання швидкості асинхронного двигуна - це зміна частоти в поєднанні із зміною напруги, використовуючи перетворювачі частоти. При цьому термін окупності інвестицій у обладнання коливається від 6 до 18 місяців в залежності від механізму, режимів його роботи та потужності приводного двигуна.

Зміна частоти обертів має сенс лише до певної величини, при якій натиск турбомеханізму вирівнюється зі статичним натиском в мережі. Подальше зниження продуктивності насоса призведе до того, що турбомеханізм не зможе подолати статичний тиск в системі.

2.2 Вибір прийнятих показників якості

Під час розробки систем автоматичного керування і регулювання необхідно враховувати широкий спектр різноманітних вимог, які відрізняються за своєю природою. Ці вимоги можна упорядкувати в декілька основних категорій.

До першої групи критеріїв належать вимоги, пов'язані зі статичними та динамічними характеристиками. Серед них найбільше уваги приділяється точності, оскільки вона визначає можливі помилки в роботі системи керування в різних режимах.

До другої групи належать вимоги, пов'язані з надійністю системи керування та її стійкістю до впливу зовнішніх чинників. Сюди входять такі показники, як ймовірність безвідмовної роботи, діапазон робочих температур, стійкість до вібрацій, ресурс роботи та умови зберігання.

Третя група включає вимоги, що визначають характер експлуатації системи керування, зокрема, умови обслуговування під час роботи, кваліфікацію обслуговуючого персоналу та можливість проведення ремонту.

Четверта група вимог стосується допустимої маси, габаритів та енергоспоживання системи.

П'ята група включає вимоги, пов'язані з технологічністю виготовлення системи.

У нашому випадку, вимоги до системи керування електроприводом компресорної установки можна сформулювати наступним чином:

- 1) Забезпечення максимальної точності системи;
- 2) Досягнення максимального ККД (коефіцієнта корисної дії);
- 3) Мінімізація вартості системи;
- 4) Мінімізація габаритів системи.

2.3 Обґрунтування вибору системи регулювання приводу

На сьогоднішній день найперспективнішим та широко використовуваним методом регулювання швидкості асинхронних двигунів (АД) є частотний спосіб. Цей метод забезпечує плавне регулювання в широкому діапазоні і характеризується високою жорсткістю характеристик. Однак ще однією важливою перевагою частотного методу є те, що при регулюванні швидкості АД не відбувається збільшення ковзання, як у випадку реостатного регулювання.

Розглянемо характеристики основних типів перетворювачів частоти (ПЧ).

Перетворювач частоти з безпосереднім зв'язком призначений для перетворення високої частоти в низьку і складається з 18 тиристорів, які об'єднані у зустрічно-паралельні групи (див. рис.2.1). В основі цього перетворювача лежить трифазна нульова схема випрямлення, кожна фаза перетворювача складається з двох таких зустрічно включених випрямлячів.

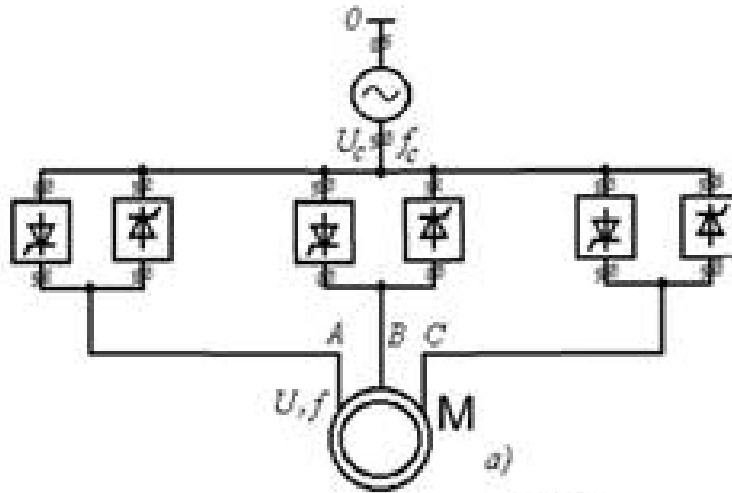


Рисунок 2.1 - ПЧ з безпосереднім зв'язком

Перетворювачі частоти (ПЧ) можуть бути роздільного або спільного управління.

У випадку роздільного управління, керуючі імпульси подаються на тиристири однієї вентиляльної групи відповідно до напрямку струму в навантаженні. Для забезпечення роздільної роботи використовується спеціальний логічний пристрій, який блокує можливість проходження струму в одній групі, коли струм проходить в іншій групі.

У перетворювачах із спільним управлінням роботою вентиляльних груп вимагається додаткове включення реакторів, які обмежують зрівняльний струм між вентилями кожної групи. Кут управління позитивною та негативною групами змінюються за певним законом, що усуває появу постійної складової зрівняльного струму. Перетворювачі із спільним управлінням мають велику встановлену потужність силових елементів.

Для отримання вихідної напруги, яка наближається за формою до синусоїдальної, потрібно змінювати кут включення вентилів так, щоб середнє значення напруги змінювалося протягом напівперіоду вихідної напруги відповідно до синусоїдального закону. Регулювання частоти та напруги на виході ПЧ досягається зміною кута включення вентилів.

До переваг цього типу ПЧ можна віднести:

- 1) Одноразове перетворення енергії та високий коефіцієнт корисної дії (ККД) приблизно від 0,97 до 0,98;
- 2) Можливість незалежного регулювання амплітуди напруги на виході від частоти;
- 3) Вільний обмін реактивною та активною енергією з мережі до двигуна та назад;
- 4) Відсутність комутуючих конденсаторів, оскільки комутація тиристорів відбувається природним чином (за допомогою напруги мережі).

До недоліків цього типу ПЧ можна віднести:

- 1) Обмежене регулювання;
- 2) Порівняно велику кількість силових вентилів та складну схему управління ними;
- 3) Низький коефіцієнт потужності, максимальне значення на вході ПЧ приблизно 0,8.

Перетворювачі з ланкою постійного струму мають широке застосування в сучасних частотно-регульованих приводах. Основна функціональна схема цих перетворювачів зображена на рисунку 2.2. У цього типу перетворювачів відбувається подвійне перетворення електричної енергії: спочатку вхідна синусоїдальна напруга з постійною амплітудою і частотою випрямляється у випрямлячі, після чого фільтрується фільтром, згладжується і потім знову перетворюється інвертором в змінну напругу змінної частоти і амплітуди. Подвійне перетворення енергії призводить до зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) і до певного погіршення масогабаритних показників порівняно з перетворювачами з безпосереднім зв'язком.

Перетворювач з проміжною ланкою постійного струму має декілька переваг:

- 1) Він дозволяє регулювати частоту як вгору, так і вниз від частоти мережі живлення;
- 2) Високий ККД, що становить близько 0,96;
- 3) Значна швидкодія реакції;

- 4) Малий обсяг і невеликі габарити;
- 5) Висока надійність.

Із цими перевагами необхідно враховувати, що подвійне перетворення енергії може призвести до певного зниження ККД та збільшення габаритних параметрів в порівнянні з іншими типами перетворювачів.

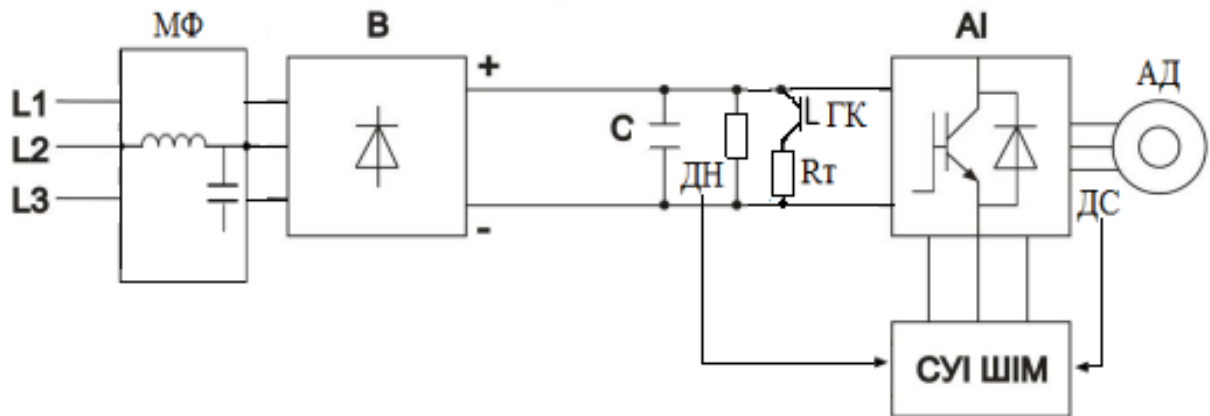


Рисунок 2.2 - Функціональна схема ПЧ з ланкою постійного струму

Описана схема використовується для керування приводом і включає такі компоненти:

- МФ (мережевий фільтр): Це фільтр, призначений для відсікання вищих гармонік з вхідної напруги, щоб забезпечити чисте живлення системи.
- В (випрямляч): Цей компонент використовується для перетворення вхідної змінної напруги в постійний струм в ланці постійного струму. Зазвичай він не регульований (в ПЧ першого покоління).
- ДН і ДС (датчики напруги і струму): Ці датчики вимірюють напругу і струм у системі і передають цю інформацію до системи управління.
- ГК (гальмівний ключ): Гальмівний ключ може використовуватися для швидкого зупинення приводу, забезпечуючи шлях для відведення енергії.
- АІ (автономний інвертор): Це пристрій, який перетворює постійний струм на змінну напругу змінюваної частоти і амплітуди. Він зазвичай використовує модуляцію ширини імпульсу (ШІМ) для керування вихідною напругою.

- МФ (мотор-фільтр): Це фільтр, призначений для зменшення вищих гармонік на двигуні, забезпечуючи чисте живлення для нього.
- СУ (система управління): Ця система відповідає за керування всією схемою і приймає дані від датчиків напруги і струму, встановлюючи вихідні параметри для автономного інвертора та взаємодіючи з іншими компонентами системи.

Щодо використання ключів, тиристори є напівкерованими приладами, і вони використовуються для керування потоком струму в силових ланках. Для їх включення достатньо надіслати короткий керуючий імпульс, але для їх виключення потрібно або прикласти зворотну напругу до них, або знизити комутований струм до нуля.

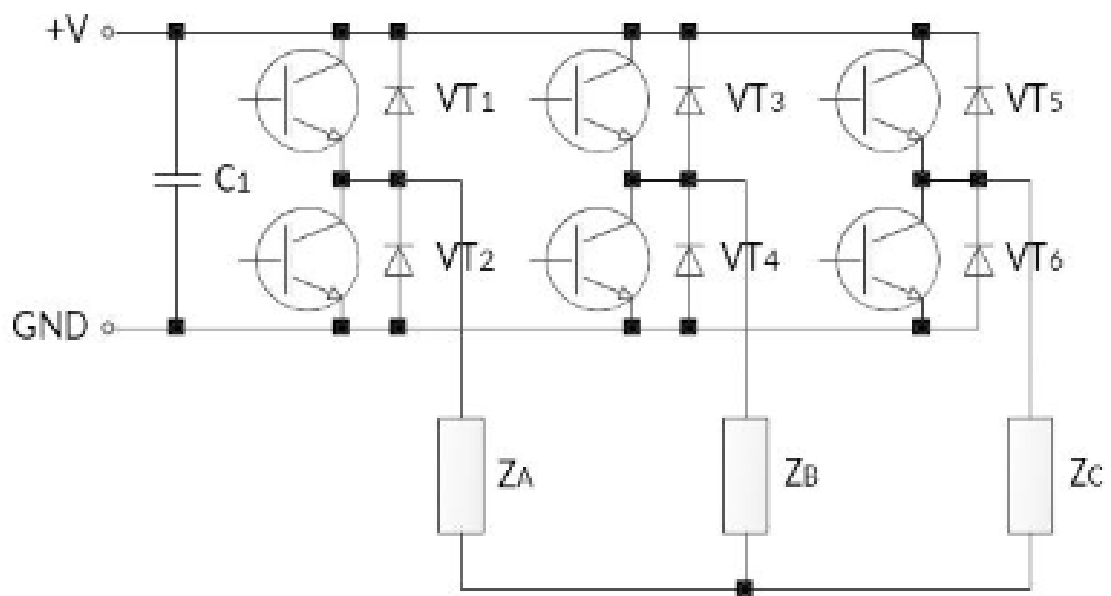


Рисунок 2.3 - Принципова схема AI

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), біполярні транзистори з ізольованим затвором, відрізняються від тиристорів наступними перевагами:

- Повна керованість: IGBT можуть бути повністю керовані імпульсами, вони включаються і вимикаються при потребі, що дає більшу гнучкість в управлінні системами;

- Проста неенергоємна система управління: використання IGBT не потребує великих систем охолодження, так як вони мають меншу втрату енергії при вимиканні, порівняно з тиристорами;
- Висока робоча частота: IGBT можуть працювати на вищих частотах перемикавання, що дає можливість підвищити продуктивність і швидкість реакції систем.

Використання IGBT з високою частотою перемикавання в поєднанні з мікропроцесорною системою управління в перетворювачах частоти має наступні переваги:

- Зниження рівня вищих гармонік: висока частота перемикавання допомагає знизити рівень вищих гармонік у вихідній напрузі, що сприяє зменшенню додаткових втрат і підвищенню продуктивності системи;
- Зменшення нагрівання електричної машини: втрати в обмотках і магнітопроводі електродвигуна зменшуються завдяки меншим вищим гармонікам, що призводить до зниження нагрівання;
- Зменшення пульсацій моменту: висока частота перемикавання дозволяє згладити пульсації моменту у системі, що поліпшує якість роботи приводу;
- Збільшення терміну служби елементів ізоляції: зменшення вищих гармонік допомагає підвищити термін служби ізоляції проводів і інших компонентів;
- Зменшення кількості помилкових спрацьовувань пристроїв захисту: зниження вищих гармонік допомагає уникнути помилкових спрацьовувань систем захисту.

Зміна періоду подачі керуючих імпульсів на силові ключі дозволяє змінювати частоту напруги, яка подається на повзунок, що використовується для регулювання швидкості обертання двигуна.

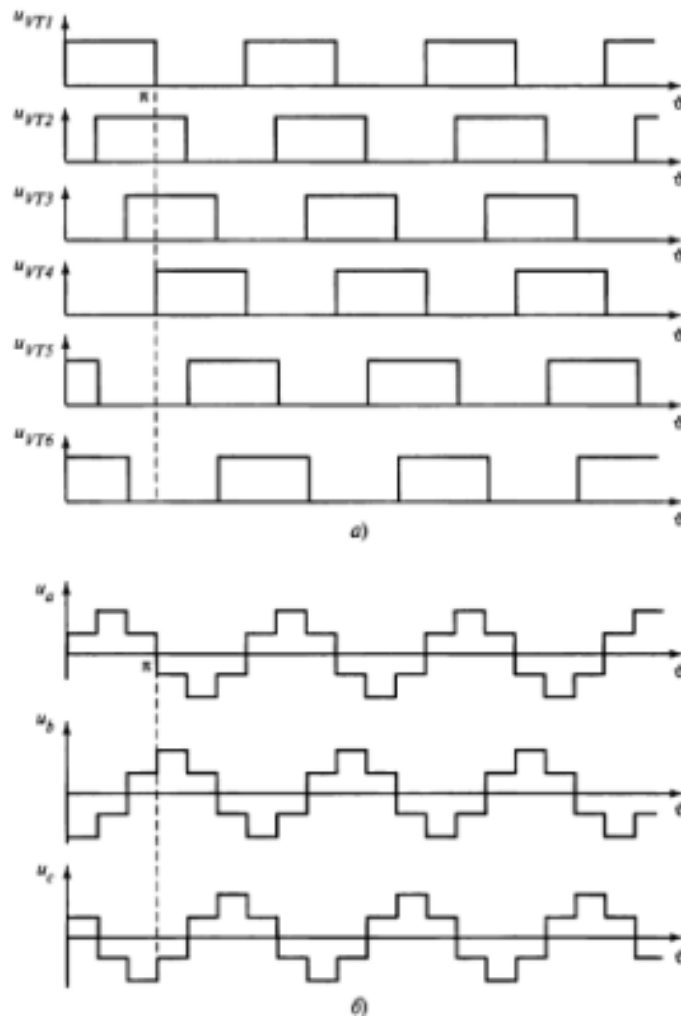


Рисунок 2.4 - Алгоритм подачі імпульсів на транзистори

Для ефективної роботи двигуна потрібно регулювати як частоту, так і напругу. Це досягається шляхом зміни параметрів в ланці постійного струму або застосування модуляції ширини імпульсів (ШІМ). Під час вибору співвідношень між частотою та напругою, найчастіше враховують вимогу щодо збереження перевантажувальної здатності.

Вибір конкретного перетворювача частоти зазвичай здійснюється з урахуванням наступних факторів та вимог:

$$I_{\text{еи.тн}} \geq I_{\text{лн}} ; U_{\text{еи.тн}} \geq U_{\text{лн}} ;$$

Отже, на основі аналітичного огляду приймається рішення про проектування системи регулювання швидкості на основі транзисторного перетворювача частоти, який керує асинхронним двигуном.

РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ

3.1 Розробка структурної схеми

Система, яку ми проектуємо, є одноконтурною системою управління з єдиним зовнішнім контуром, який визначається тиском.

Структурна схема цієї системи наведена на рисунку 3.1.

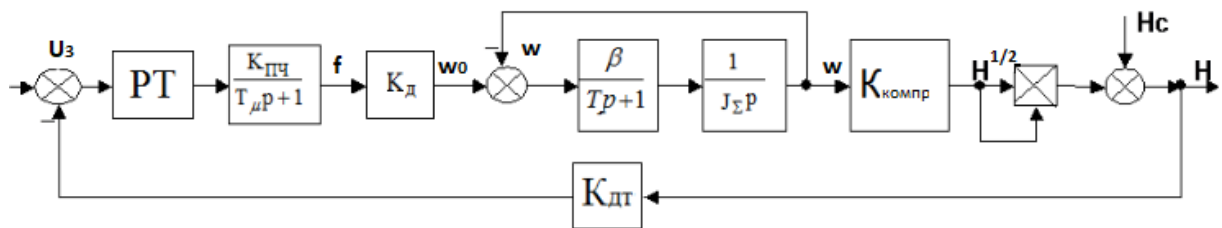


Рисунок 3.1 - Структурна схема САУ компресорної установки

РТ - регулятор тиску;

KПЧ - коефіцієнт перетворювача частоти;

Kд - коефіцієнт передачі двигуна;

$$K_d = \frac{2\pi}{p} \quad (3.1)$$

Kкомпр - коефіцієнт компресора;

H - натиск;

Kдт - коефіцієнт зворотного зв'язку за тиском;

$$K_{дт} = \frac{U_3}{H} \quad (3.2)$$

В загальному випадку, об'єкт управління можна описати наступною функціональною схемою, яка представлена на рисунку 3.2.

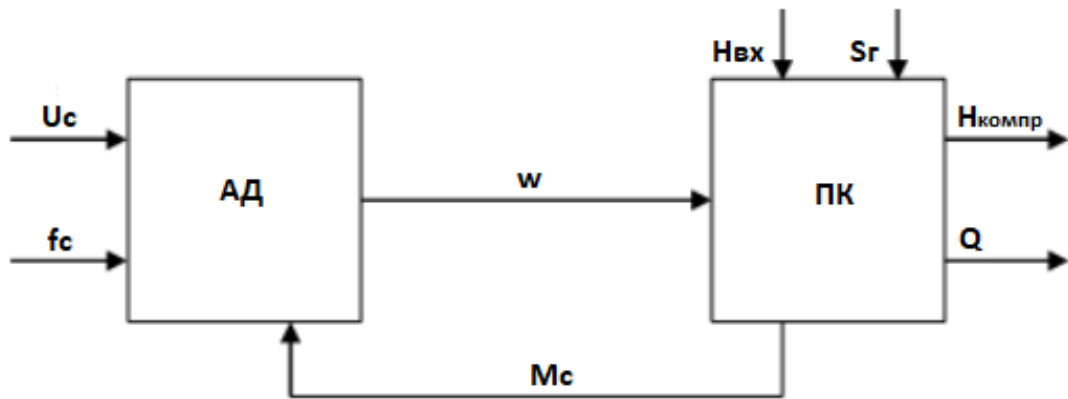


Рисунок 3.2 - Функціональна схема компресорної установки

Позначення:

U_c – напруга статора, В;

f_s – частота напруги статора, Гц;

АД – асинхронний двигун;

w – механічна кутова швидкість обертання ротора і робочого колеса компресора, рад / с;

ПК – поршневий компресор;

$H_{вх}$ – натиск на вході компресора, м;

S_r – гідравлічний опір магістралі, c^2/m^5 .

$H_{компр}$ – натиск на виході компресора, м;

Q – продуктивність компресора, m^3/c ;

M_c – статичний момент навантаження на валу двигуна, Н·м;

Навантаження у поршневих компресорах, як і в інших механізмах подібного типу характеризується як вентиляторне навантаження. Опір у цих системах залежить від швидкості обертання робочого колеса наступного рівня. Для опису цієї залежності моменту опору на валу двигуна необхідно використовувати математичні формули, які описують характеристики як компресора, так і трубопроводу.

Основними характеристиками компресора є обсяговий розхід і тиск.

Обсяговий розхід Q визначає кількість газу, яку компресор подає за одиницю часу.

Тиск H описує різницю енергії у 1 кг газу (питома енергія) між входом і виходом компресора.

Диференціальне рівняння, яке описує компресор, може бути представлене наступним чином:

$$\frac{m}{\rho g} \dot{Q} + s^2(a + a_\phi)Q^2 = s^2 \frac{H_{0H}}{\omega_H^2} \omega^2 + s^2 H_{ст} \quad (3.3)$$

Позначення:

m - маса повітря в компресорі та трубопроводах;

g - прискорення вільного падіння;

ρ - щільність газу.

Використовуючи наведене рівняння для лінеаризації системи, ми перетворюємо структурну схему системи автоматичного управління компресорної установки в форму, яка зображена на рисунку 3.1.

При цьому ми беремо до уваги, що як компресор, так і гідравлічна мережа є інерційними ланками, які можна апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку, отримуючи:

$$W_{\text{компр}}(p) = \frac{K_{\text{компр}}(w)}{T_{\text{компр}} p + 1} \quad (3.4)$$

Позначення:

$K_{\text{компр}}$ - коефіцієнт перетворення компресора,

$T_{\text{компр}}$ - постійна часу насоса.

Оскільки насос представляє собою нелінійну та складну систему, і ми оптимізуємо роботу в малих відхиленнях, ми проводимо лінеаризацію його коефіцієнта передачі.

Значення $T_{\text{компр}} = 0,001\text{с}$ є настільки невеликим, що при синтезі системи малою сталою часу можна ігнорувати його і вважати насос безінерційною ланкою:

$$W_{\text{компр}}(p) = K_{\text{компр}}$$

Модель компресора виглядатиме наступним чином:

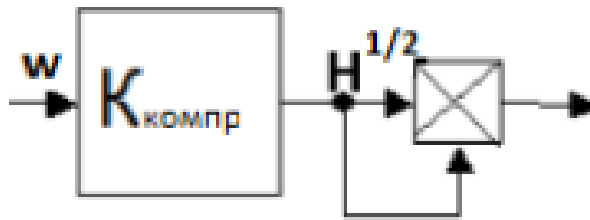


Рисунок 3.3 - Модель компресора

У моделюванні системи враховано вплив постійної часу компресора на параметри перехідних процесів.

3.2 Розрахунок параметрів передаточної функції об'єкта управління

Після встановлення оптимального закону управління наступним етапом є вибір структури та параметрів пристроїв управління, тобто створення автоматичних систем. Під час синтезу визначають параметри та структуру пристроїв управління, можуть бути задані або не задані певні елементи цієї структури.

Оскільки під час стабілізації напору наша система функціонує в межах невеликих відхилень від робочої точки стабілізації, можна використовувати лінійну модель асинхронного двигуна. Для розробки регуляторів управління системою використовується лінеаризована модель асинхронного двигуна.

Структурна схема лінеаризованої моделі асинхронного двигуна представлена на рисунку 3.4.

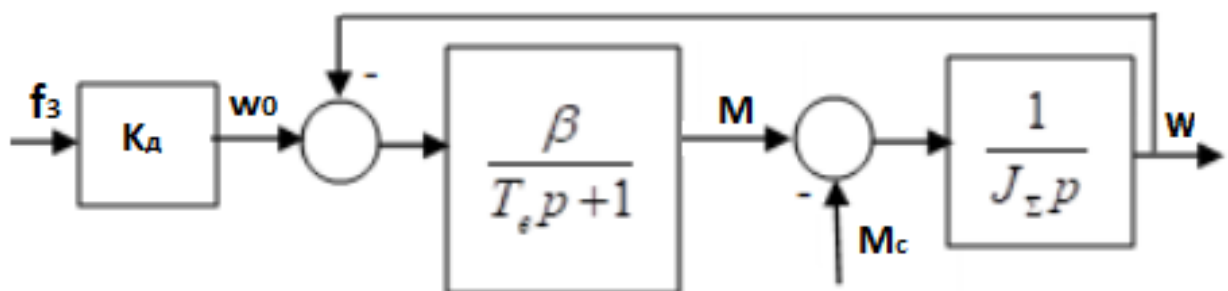


Рисунок 3.4 – Лінеаризована модель АД

Позначення:

M – механічний момент двигуна, Н*м;

β – жорсткість лінійної ділянки механічної характеристики;

T_e – електромагнітна постійна часу, с;

J – сумарний, приведений до валу двигуна момент інерції, кг*м²;

ω_0 – задавальна кругова частота обертання, рад/с;

f_z – частота завдання, Гц;

K_d – коефіцієнт передачі двигуна.

Подивимося на модель пристрою для зміни частоти, яка складається з керованого випрямляча, фільтра та автономного інвертора напруги.

Транзисторний перетворювач - це складний об'єкт з обмеженою маневреністю, який демонструє нелінійну та дискретну динаміку. Однак його особливості, як нелінійного об'єкта, не впливають значно на роботу системи.

Частота регулювання цього контуру значно нижча за частоти, які важливі для динаміки самого транзисторного перетворювача. При цьому часові параметри перехідних процесів в системі помітно перевищують періоди дискретизації цієї системи.

У розробці систем управління електроприводами, зазвичай, випрямник моделюється як аперіодичний вузол із певним коефіцієнтом передачі та постійним часом. З іншого боку, інвертор часто розглядається як безінерційна ланка із своїми власними характеристиками передачі.

Для синтезу регуляторів системи управління використовуватиметься лінеаризована модель перетворювача частоти, що може бути представлена так, як зображено на рисунку 3.5.

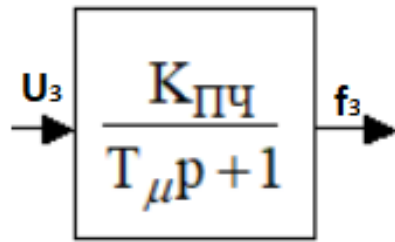


Рисунок 3.5 - Лінеаризована модель перетворювача частоти

Позначення:

$K_{ПЧ}$ – коефіцієнт посилення перетворювача частоти;

T_{μ} - постійна часу ПЧ.

Наступним етапом буде проведено обчислення характеристик схеми заміщення електродвигуна.

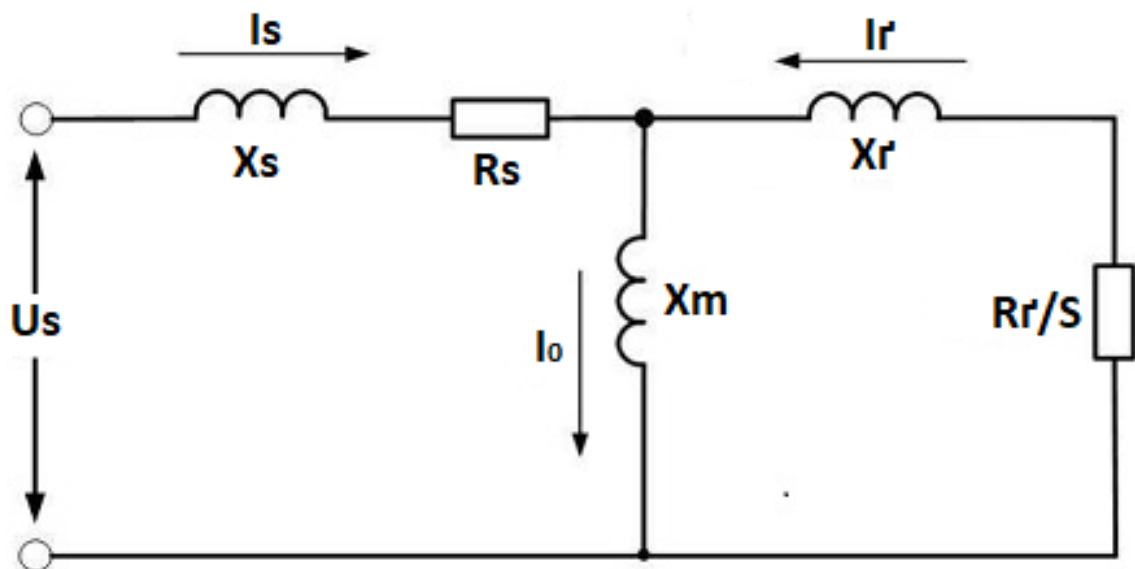


Рисунок 3.6 – Схема заміщення АД

Параметри:

$$X_1 = X'_1 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}}$$

$$X'_2 = X''_2 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}}$$

$$R_1 = R'_1 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}}$$

$$R'_2 = R''_2 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} \quad (3.5)$$

Позначення:

X - головний індуктивний опір;

R'1, X'1 - активний і індуктивний опори обмотки статора;

R'2, X'2 - активний і індуктивний опори обмотки ротора, приведені до обмотки статора;

X1, X"2, R1, R"2 - опір статора і ротора, Ом;

U1фн, I1фн - номінальні значення фазної напруги, В і струму, А.

Використовуючи формули (3.5) здійснюємо розрахунки:

$$I_{1\phi n} = \frac{P_n}{3U_{1\phi n} \cos \phi \eta_n} = \frac{45000}{3 \cdot 220 \cdot 0,85 \cdot 0,925} = 87 \text{ A}$$

$$X_1 = X'_1 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0,154 \frac{220}{87} = 0,389 \text{ Ом}$$

$$X'_2 = X''_2 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0,188 \frac{220}{87} = 0,475 \text{ Ом}$$

$$R_1 = R'_1 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0,086 \frac{220}{87} = 0,217 \text{ Ом}$$

$$R'_2 = R''_2 \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0,077 \frac{220}{87} = 0,194 \text{ Ом}$$

$$X_{12} = X_\mu \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 5,2 \frac{220}{87} = 13,14 \text{ Ом}$$

Взаємна індуктивність статора і ротора:

$$L_{12} = \frac{X_{12}}{2 \cdot \pi \cdot f_n} = \frac{13,14}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,042 \text{ Гн}$$

Індуктивність статора:

$$L_1 = \frac{X_1 + X_{12}}{2 \cdot \pi \cdot f_n} = \frac{0,389 + 13,14}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,043 \text{ Гн}$$

Індуктивність ротора:

$$L_2 = \frac{X_2' + X_{12}}{2 \cdot \pi \cdot f_n} = \frac{0,475 + 13,14}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0433 \text{ Гн}$$

$$\sigma = \frac{L_1 L_2 - L_{12}^2}{L_2} = \frac{0,043 \cdot 0,0433 - 0,042^2}{0,0433} = 0,0009$$

$$\alpha = \frac{R_2'}{L_2} = \frac{0,194}{0,0433} = 4,48 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}$$

Коефіцієнт передачі: $i_n = 1$

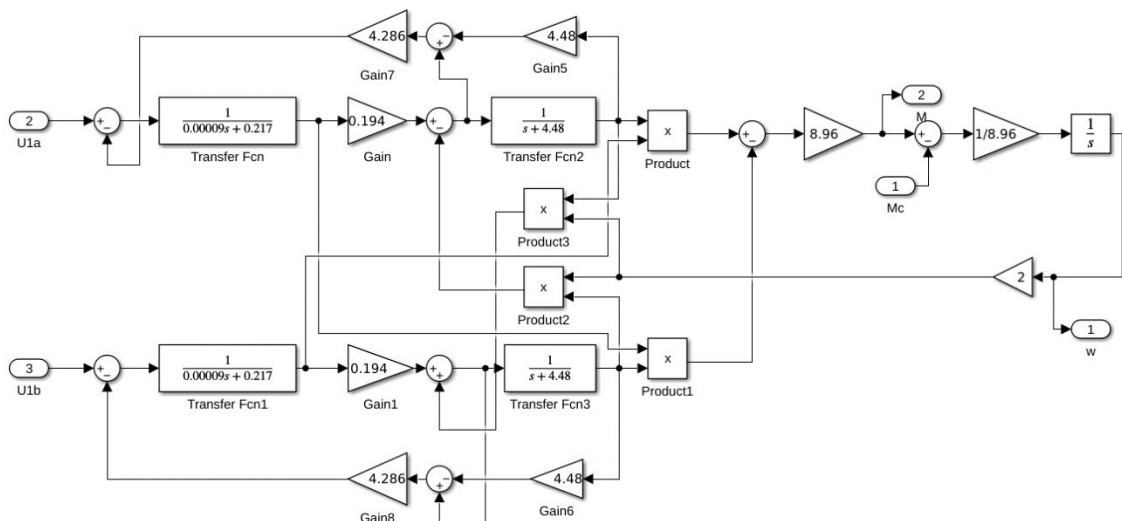


Рисунок 3.7 - Структурна схема асинхронного двигуна з розрахованими параметрами заміщення

Розрахуємо параметри перетворювача частоти:

$$W_{ПЧ}(p) = \frac{K_{ПЧ}}{T_{\mu}p + 1} = \frac{3,125}{0,01p + 1}$$

Позначення:

$K_{ПЧ} = f_{1H}/I_3 = 50/16 = 3,125$ Гц/мА, - коефіцієнт підсилення перетворювача частоти;

$f_{1H} = 50$ Гц - номінальна частота напруги мережі;

$I_3 = 16$ мА – струм завдання, приймається стандартним (20-4)=16мА;

$T = 0,01$ с, постійна часу ПЧ.

Для реальних систем $T = 0,008 \div 0,01$ с, для синтезу приймаємо $T = 0,01$.

Враховуючи характеристики перетворювача частоти та асинхронного двигуна, ми проведемо розрахунок параметрів структурної схеми компресорної установки, зокрема:

$p = 6$, що відповідає числу пар полюсів обмотки статора двигуна;

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_{1H}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{6} = 104,7 \text{ рад/с} \quad \text{- номінальна швидкість холостого ходу;}$$

$$\omega_H = \omega_0(1 - s_H), \text{ рад/с} \quad \text{- номінальна швидкість двигуна;}$$

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{104,7 - 100,4}{104,7} = 0,04 \quad \text{- номінальне ковзання двигуна;}$$

$$s_K = s_H(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,04 \cdot (2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0,15 \quad \text{- критичне ковзання;}$$

$\lambda = 2$ - відношення максимального моменту до номінального моменту;

$$K_D = \frac{2\pi}{p} = \frac{6,28}{6} = 1,04 \quad \text{- коефіцієнт передачі двигуна;}$$

$$T_e = \frac{1}{\omega_{ОЕЛ} s_K} = \frac{1}{209,4 \cdot 0,15} = 0,032 \quad \text{- електромагнітна постійна часу двигуна;}$$

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_{OH} - \omega_H} = \frac{400}{104,7 - 100,4} = 93,02 \quad \text{- модуль статичної жорсткості;}$$

$$J_{\Sigma} = J_{\delta} + J_{\text{компр}} = 1,25 + 1,12 = 2,37 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad \text{- сумарний момент інерції;}$$

$$T_M = \frac{J_{\Sigma}}{\beta} = \frac{2,37}{93,02} = 0,025 \quad \text{- електромеханічна стала часу двигуна.}$$

Враховуючи отримані параметри, передаточна функція двигуна матиме вигляд:

$$W_{\text{дв}}(p) = \frac{\frac{\beta k_{\delta}}{J_{\Sigma} p (T_e p + 1)}}{1 + \frac{\beta}{J_{\Sigma} p (T_e p + 1)}} = \frac{\beta k_{\delta}}{J_{\Sigma} T_e p^2 + J_{\Sigma} p + \beta} = \frac{k_{\delta}}{T_M T_e p^2 + T_M p + 1} = \frac{1,04}{0,0008 p^2 + 0,025 p + 1}$$

Датчик тиску є одним з найважливіших компонентів у системі контролю тиску. Вибір датчика проводимо з урахуванням номінального тиску компресора. Перерахуємо номінальний тиск компресора у відповідність з датчиком.

$$P_k = g \rho_{\text{нов}} H_k = 9,81 \cdot 1,2 \cdot 68000 = 0,8 \text{ МПа}$$

Обираємо датчик тиску Сафір 2 Асс, призначений для максимального тиску 1,5 МПа та має мінімальний тиск 0 МПа. Щоб забезпечити надійний захист від перешкод, Сафір 2 Асс передає інформацію про тиск у вигляді струму. Якщо тиск максимальний, то датчик видає струм 20 мА, мінімальний - 4 мА. Для вимірювання максимального напору треба розрахувати коефіцієнт передачі.

$$H_{\text{д.к. max}} = \frac{1,5 \cdot 10^6}{9,81 \cdot 1,204} = 127 \text{ м}$$

Коефіцієнт передачі:

$$K_{\text{ом}} = \frac{I_{\text{д.к. max}} - I_{\text{д.к. min}}}{H_{\text{д.к. max}} - H_{\text{д.к. min}}} = \frac{(20 - 4)}{127 - 0} = 0,125 \frac{\text{мА}}{\text{м}}$$

Оскільки завдання напору подається у формі струму, з максимальним значенням 20 мА та мінімальним 4 мА, ми отримаємо масштабуючий коефіцієнт у

каналі завдання, який відповідатиме зворотному значенню коефіцієнта передачі датчика напору.

$$K_{зад} = \frac{1}{K_{дм}} = \frac{1}{0,125} = 8 \frac{м}{мА}$$

3.3 Синтез контуру регулювання тиску

Методом послідовної корекції виконаємо синтез регулюючого контуру. Налаштуємо контур регулювання для досягнення модульного оптимуму.

Передаточна функція об'єкта регулювання (без регулятора та датчика тиску) буде виражатися таким чином:

$$W_o(p) = W_{ПЧ}(p) \cdot W_D(p) \cdot W_{КОМПР}(p) \quad (3.6)$$

$$W_o(p) = \frac{k_{ПЧ} \cdot k_D \cdot k_{КОМПР}}{(T_{\mu}p + 1) \cdot (T_M T_e p^2 + T_M p + 1)} \quad (3.7)$$

Для створення регулятора тиску використовується бажана передаточна функція $W_{р.баж}(p)$ розімкнутої системи, в якій враховані всі значущі постійні часи об'єкта, виключаючи їх з контуру регулювання.

Таким чином можна вивести всі коефіцієнти підсилення і, щоб усунути статичну помилку, введемо інтегруючий елемент з малою постійною часу. Отже, розімкнутий контур регулювання може бути замінений результуючим контуром,

який матиме загальний коефіцієнт підсилення $\frac{1}{K_{дм}}$, але буде мати першопорядковий астатизм і високу швидкодію через малі постійні часу, що залишилися некомпенсованими.

Отже, бажана передаточна функція розімкнутої системи, призначена для налаштування на модульний оптимум, має вигляд:

$$W_{p.баж}(p) = W_{pT}(p) \cdot W_o(p) = \frac{1 / K_{\partial m}}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} \quad (3.8)$$

Звідси, передаточна функція регулятора:

$$W_{PC}(p) = \frac{W_{p.баж}(p)}{W_o(p)} = \frac{\frac{1 / K_{\partial m}}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}}{\frac{k_{ПЧ} \cdot k_D \cdot k_{КОМПР}}{(T_{\mu}p + 1) \cdot (T_M T_e p^2 + T_M p + 1)}} =$$

$$= \frac{(T_{\mu}p + 1) \cdot (T_M T_e p^2 + T_M p + 1)}{K_{\partial m} 2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1) \cdot k_{ПЧ} \cdot k_D \cdot k_{КОМПР}} = \frac{(T_M T_e p^2 + T_M p + 1)}{2T_{\mu}p \cdot k_{ПЧ} \cdot k_D \cdot k_{КОМПР} \cdot K_{\partial m}} \quad (3.9)$$

T_{μ} - мала, некомпенсована постійна часу.

Ця передаточна функція насправді є пропорційно-інтегрально-диференціальним регулятором (PID-регулятором) із відповідними коефіцієнтами підсилення для пропорційної (K_P), інтегральної (K_I) та диференціальної (K_D) складових регуляції тиску.

Кожен з цих коефіцієнтів визначається:

$$K_P = \frac{T_M}{2 \times k_{ПЧ} \times k_D \times k_{КОМПР} \times K_{\partial m}} = \frac{0,025}{2 \times 3,125 \times 1,04 \times 1,4 \times 0,125} = 0,022$$

$$k_I = \frac{1}{2T_u \times k_{ПЧ} \times k_D \times k_{КОМПР} \times K_{дт}} = \frac{1}{2 \times 0,01 \times 3,125 \times 1,04 \times 1,4 \times 0,125} = 90,9$$

$$k_D = \frac{T_M T_e}{2T_u \times k_{ПЧ} \times k_D \times k_{КОМПР} \times K_{дт}} = \frac{0,025 \times 0,032}{2 \times 0,01 \times 3,125 \times 1,04 \times 1,4 \times 0,125} = 0,07$$

Підставляємо числові значення:

$$W_{PC}(p) = 0,022 + \frac{90,9}{p} + 0,07p$$

Отже, створена система включає в себе один контур керування із зовнішнім контуром тиску.

Регулювання тиску буде здійснено шляхом програмного ПІД-регулювання, регулятор вбудований у перетворювач частоти. Перевірку ефективності регулятора ми проведемо шляхом моделювання системи у MATLAB.

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ САУ КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ

Ми використовуватимемо додаток SIMULINK у пакеті програм MATLAB для моделювання системи управління компресорною установкою.

Важливо зазначити, що при реальній експлуатації компресорної установки зміни тиску у споживчій мережі відбуваються плавно та поступово, а не раптово. Мета цього розділу - дослідження критичних режимів роботи установки, перевірка правильності регулятора. Ми проведемо аналіз перехідних процесів у системі стабілізації тиску за допомогою спрощеної моделі АД та з урахуванням постійної часу компресора. Для цього ми розробимо модель компресорної установки в додатку Simulink, яка дозволить проводити моделювання з і без обмежень регулятора тиску і подавати на вхід системи завдання різного типу. Модель САУ компресорної установки представлена на рисунку 4.1.

Ми проведемо аналіз системи в різних режимах - з обмеженням та без обмеження регулятора тиску:

- запуск на холостому ході ($M_c = 0$);
- навантаження $M_c = 0,9 \cdot M_n = 0,9 \cdot 400 = 360 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- плавний запуск і подача навантаження з контролем інтенсивності.

Ми припускаємо, що вплив пневмомережі на АД враховується ступінчастою подачею M_c . Оскільки параметри пневмомережі залежать від конкретної конфігурації і зазвичай забезпечують плавне наростання M_c , то цей випадок є найбільш важким.

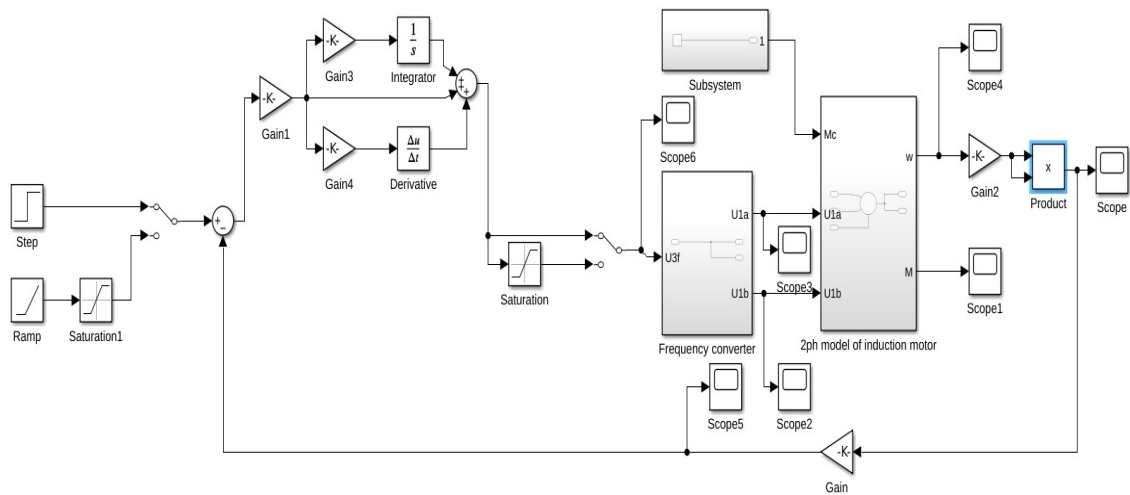


Рисунок 4.1 - Схема моделі САУ компресорної установки

Обмеження враховується за допомогою блоку Saturation, де рівень обмеження встановлюється на 20. Використання перемикачів Manual Switch для комутації режимів.

Модель системи складається з окремих блоків, кожен з яких відповідає за певний елемент структури системи. Вона включає також інші компоненти, які забезпечують працездатність та візуалізацію результатів моделювання.

4.1 Аналіз динамічних режимів без врахування обмежень

Графіки зміни тиску відображають реакцію системи на вхідний стрибок та плавне зростання сигналу завдання без урахування обмежень на виході регулятора тиску. Перший графік, що показаний на рисунку 4.2, відображає динаміку тиску у відповідь на стрибкоподібний вхідний сигнал. Другий графік, розміщений на рисунку 4.9, показує зміну тиску при плавному зростанні сигналу завдання.

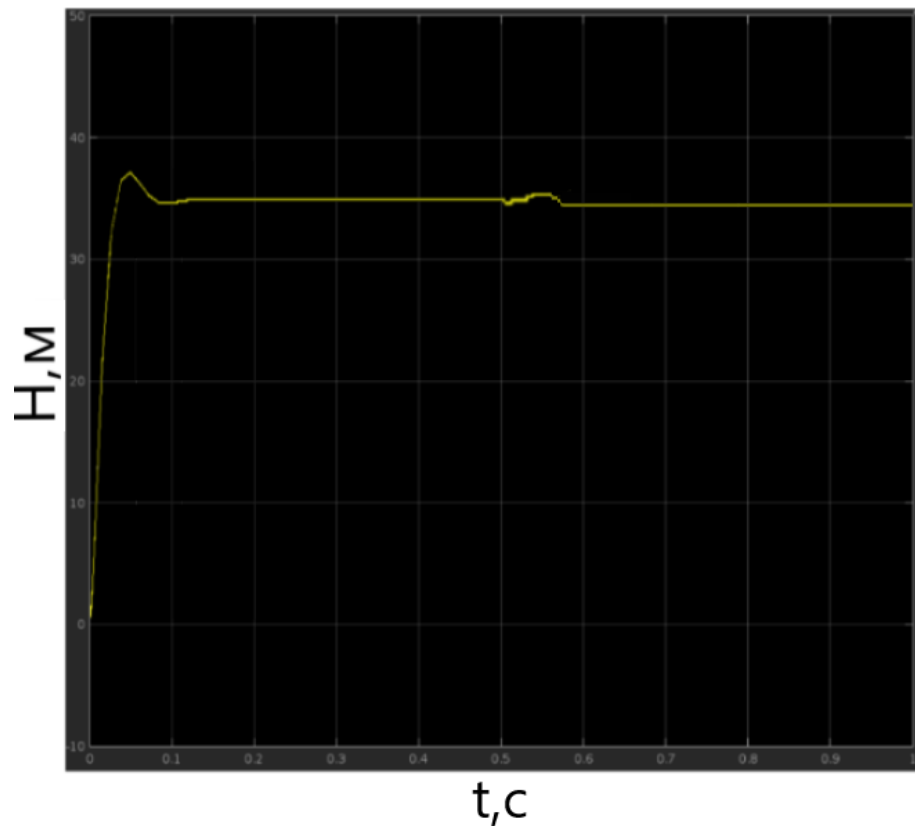


Рисунок 4.2 - Графік перехідного процесу зміни тиску, при реакції на стрибок сигналу завдання без врахування обмежень на виході регулятора тиску і подачу навантаження

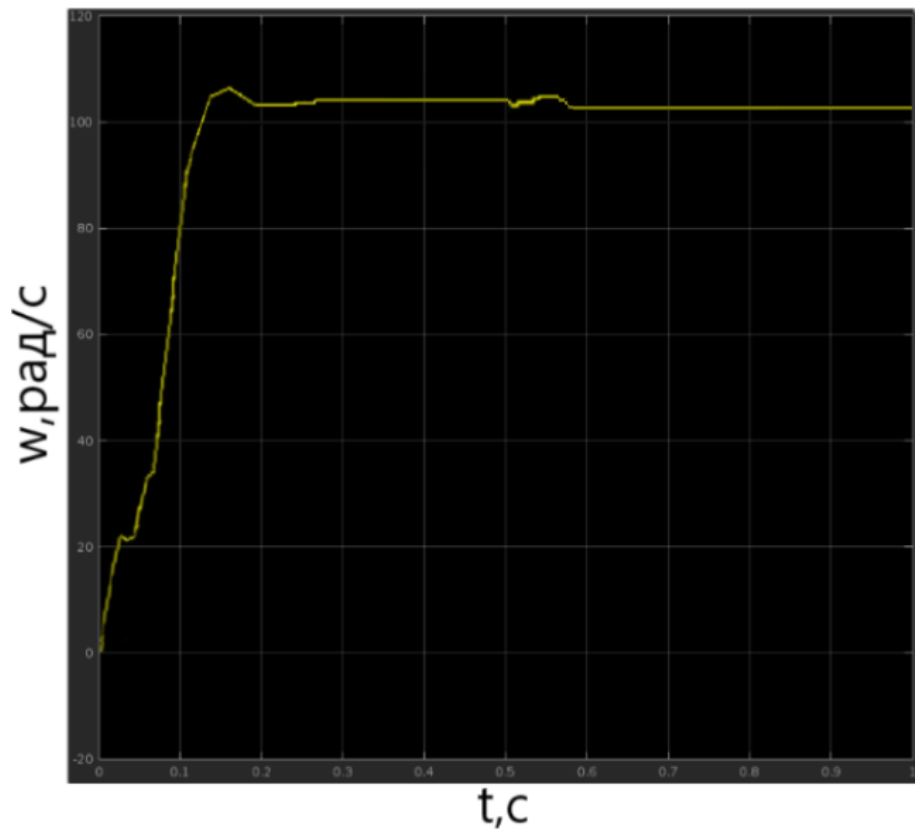


Рисунок 4.3 - Графік перехідного процесу зміни швидкості, при реакції на стрибок сигналу завдання без врахування обмежень на виході регулятора тиску і подачу навантаження

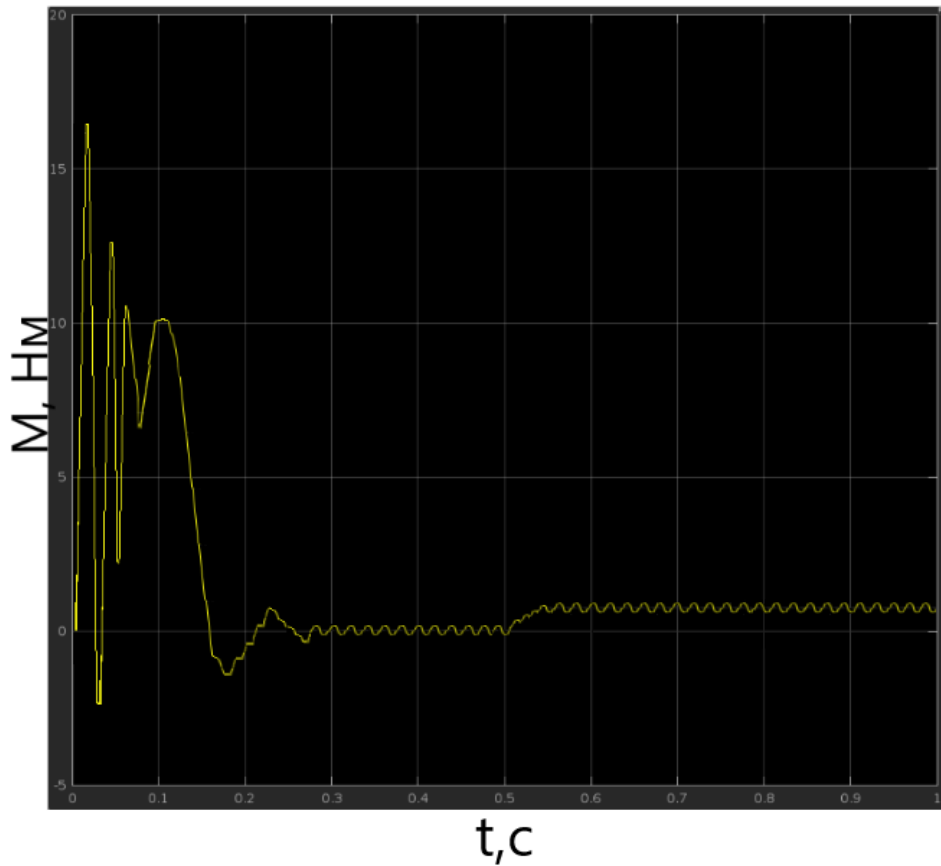


Рисунок 4.4 - Графік перехідного процесу зміни моменту, при реакції на стрибок сигналу завдання без врахування обмежень на виході регулятора тиску і подачу навантаження

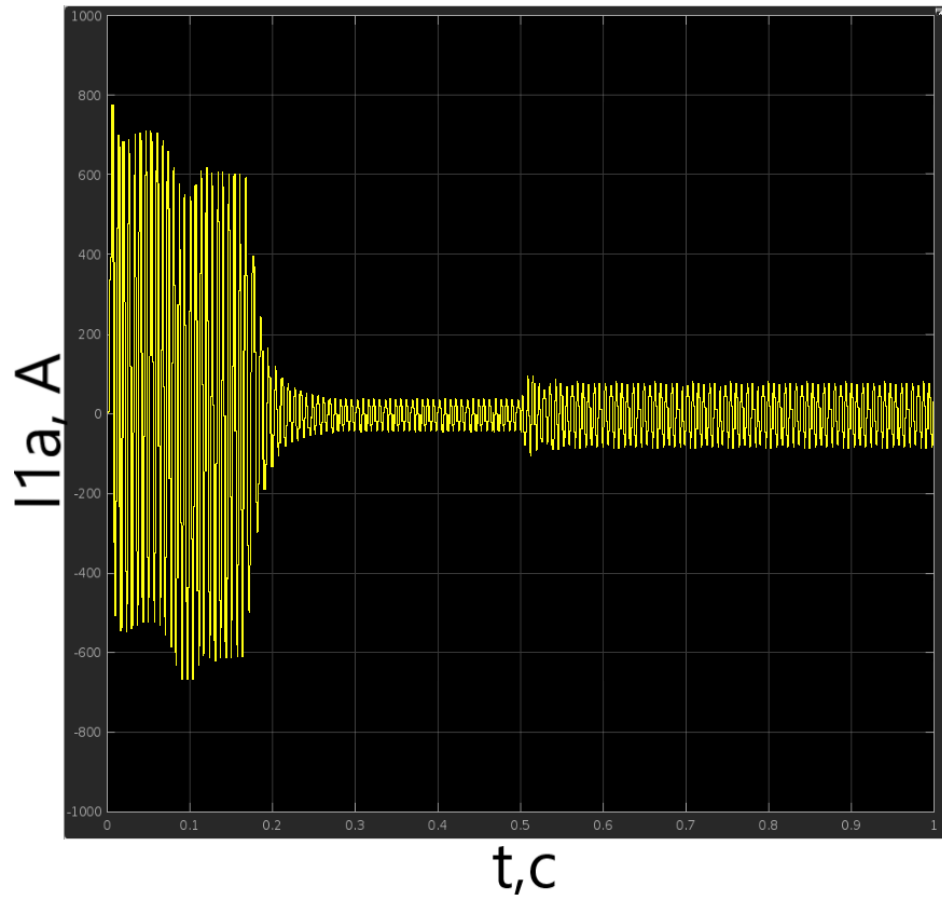


Рисунок 4.5 - Графік зміни струму фази І1а, при реакції на стрибок сигналу завдання без врахування обмежень на виході регулятора тиску і подачу навантаження

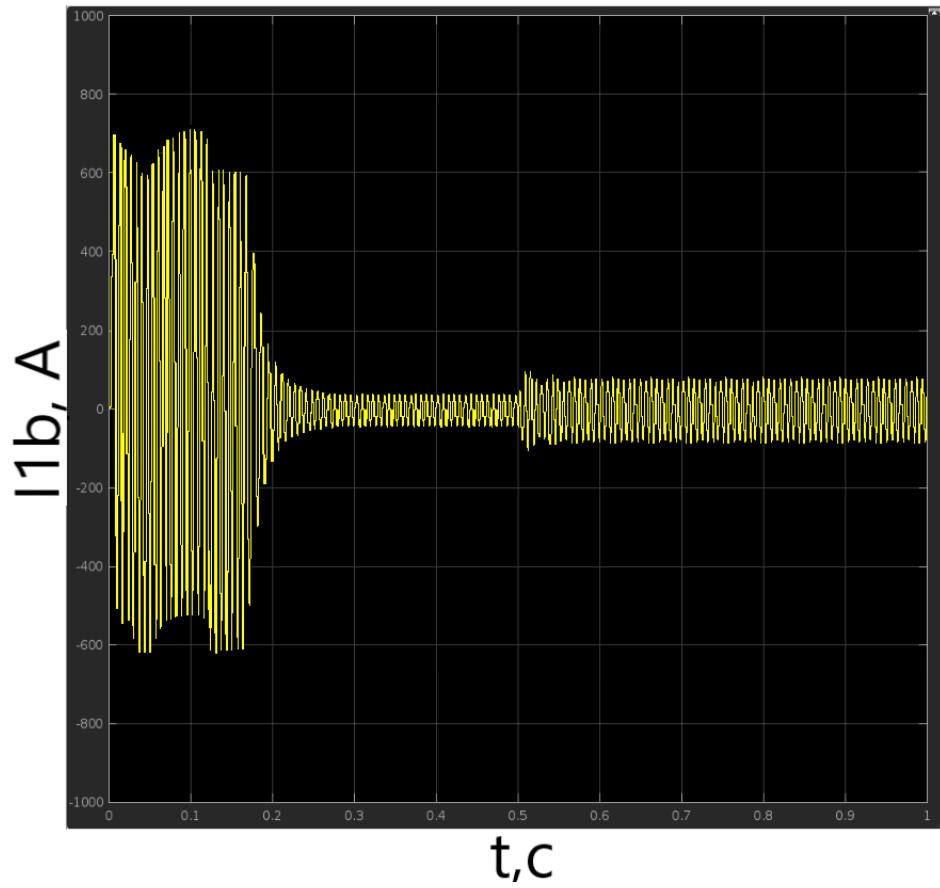


Рисунок 4.6 - Графік зміни струму фази I1b, при реакції на стрибок сигналу завдання без врахування обмежень на виході регулятора тиску і подачу навантаження

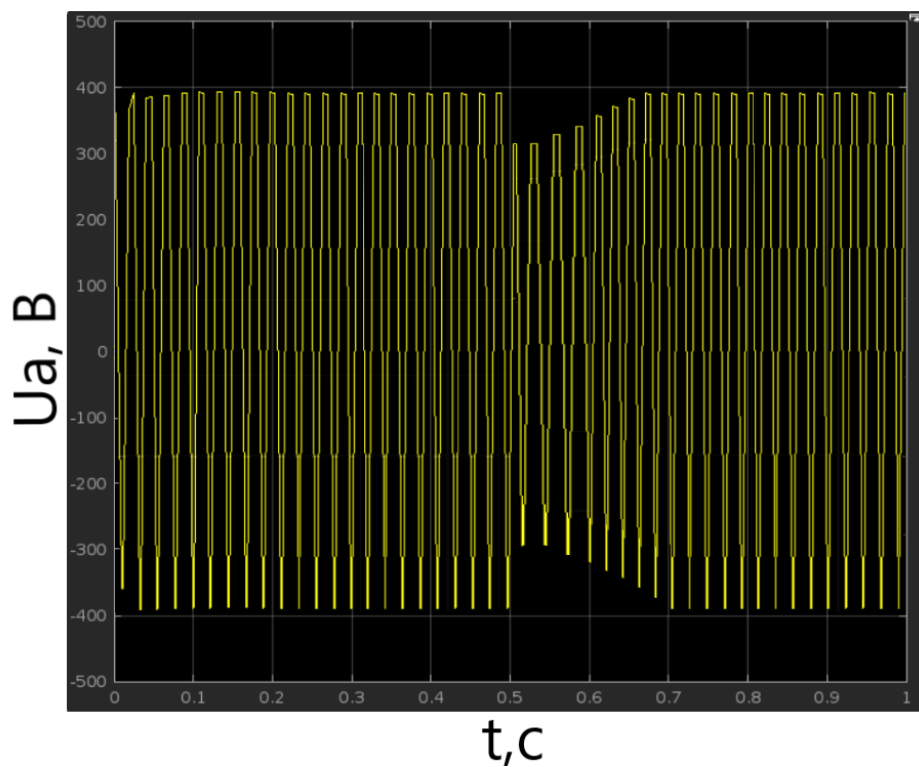


Рисунок 4.7 - Графік зміни напруги фази U1a, при реакції на стрибок сигналу завдання без врахування обмежень на виході регулятора тиску і подачу навантаження

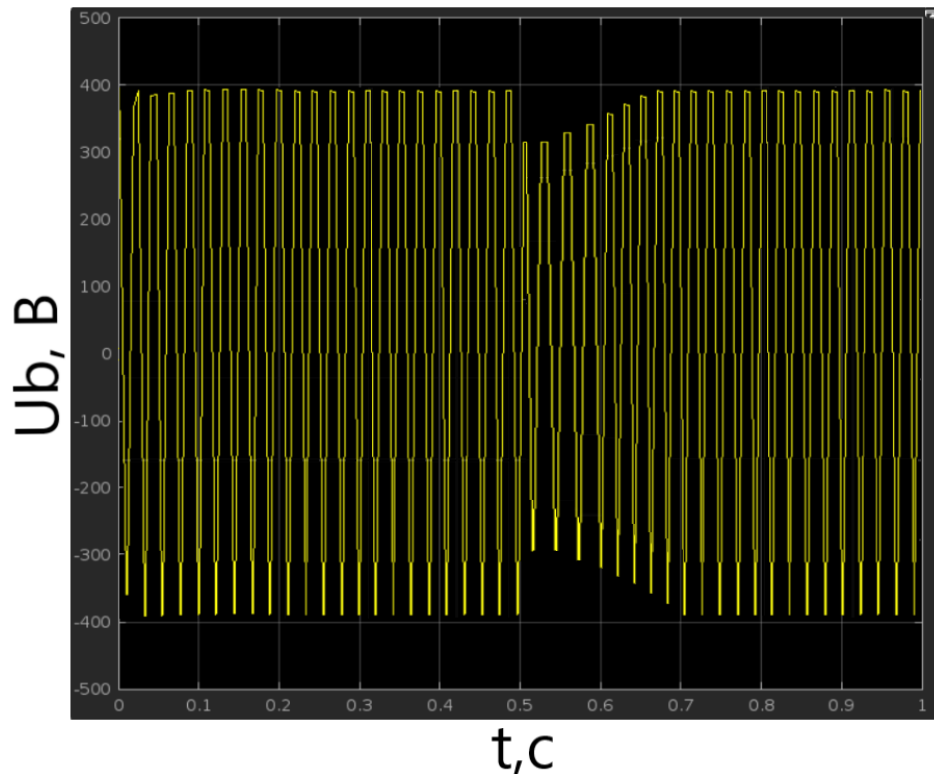


Рисунок 4.8 - Графік зміни напруги фази U1b, при реакції на стрибок сигналу завдання без врахування обмежень на виході регулятора тиску і подачу навантаження

Розглянемо основні показники якості перехідних процесів:

$t = 0$ с – запуск двигуна без навантаження;

$t = 0,5$ с – подача навантаження;

Час перехідного процесу: $t_{п.п.} = 0,08$ с;

Перерегулювання:

$$\sigma = \frac{H_{\max} - H_{\text{вст}}}{H_{\text{вст}}} \cdot 100\% = \frac{37-35}{35} \cdot 100\% = 5,9\%$$

Динамічне падіння тиску при навантаженні:

$$\Delta H_{\text{дин}} \% = \frac{\Delta H}{H_{\text{ест}}} \cdot 100\% = \frac{35 - 34,5}{34,5} \cdot 100\% = 1,45\%$$

Час відновлення тиску (напору): $t_{\text{в.т.}} = 0,08 \text{ с.}$

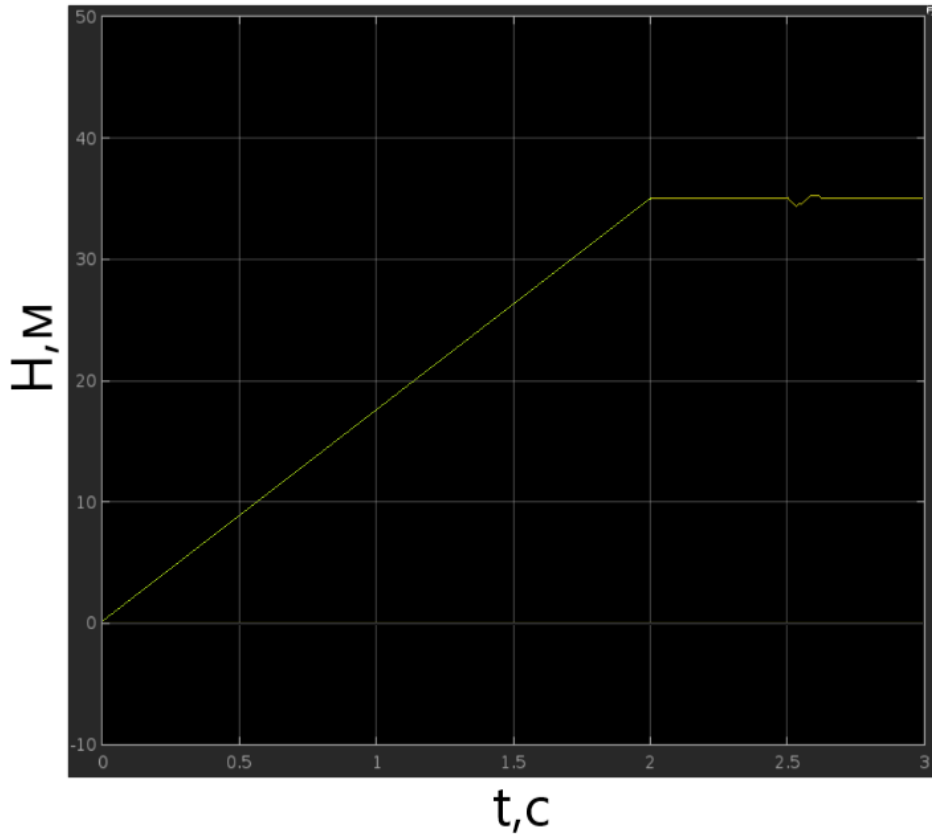


Рисунок 4.9 - Графік перехідного процесу зміни тиску, при реакції на плавне наростання сигналу завдання без врахування обмежень на виході регулятора тиску і подачу навантаження

Моделювання системи управління компресорної установки, здійснене в додатку SIMULINK пакета програмного забезпечення MATLAB, дозволяє вважати, що структурну схему для компресорної установки було обрано правильно. Основні показники якості перехідних процесів підтверджують точність синтезу регулятора тиску.

4.2 Аналіз динамічних режимів з урахуванням обмежень

В реальних умовах експлуатації електропривод важливо моніторити напругу

на виході регулятора. Це можна здійснювати як програмно, так і апаратно, встановлюючи відповідні обмеження.

На рисунку 4.10 наведено графік зміни тиску, реагуючи на вхідний стрибок, і враховано обмеження на виході регулятора тиску. А графік зміни тиску при поступовому збільшенні сигналу задання, з урахуванням обмежень на виході регулятора тиску, показано на рисунку 4.11.

Основні показники якості обмежених перехідних процесів:

- Перерегулювання:

$$\sigma = \frac{H_{\max} - H_{\text{ест}}}{H_{\text{ест}}} \cdot 100\% = \frac{43 - 35}{35} \cdot 100\% = 22\%$$

- Динамічне падіння тиску при подачі навантаження:

$$\Delta H_{\text{дин}} \% = \frac{\Delta H}{H_{\text{ест}}} \cdot 100\% = \frac{35 - 34,5}{34,5} \cdot 100\% = 1,45\%$$

- Час відновлення тиску (напору): $t_{\text{в.т.}} = 0.09 \text{ с.}$

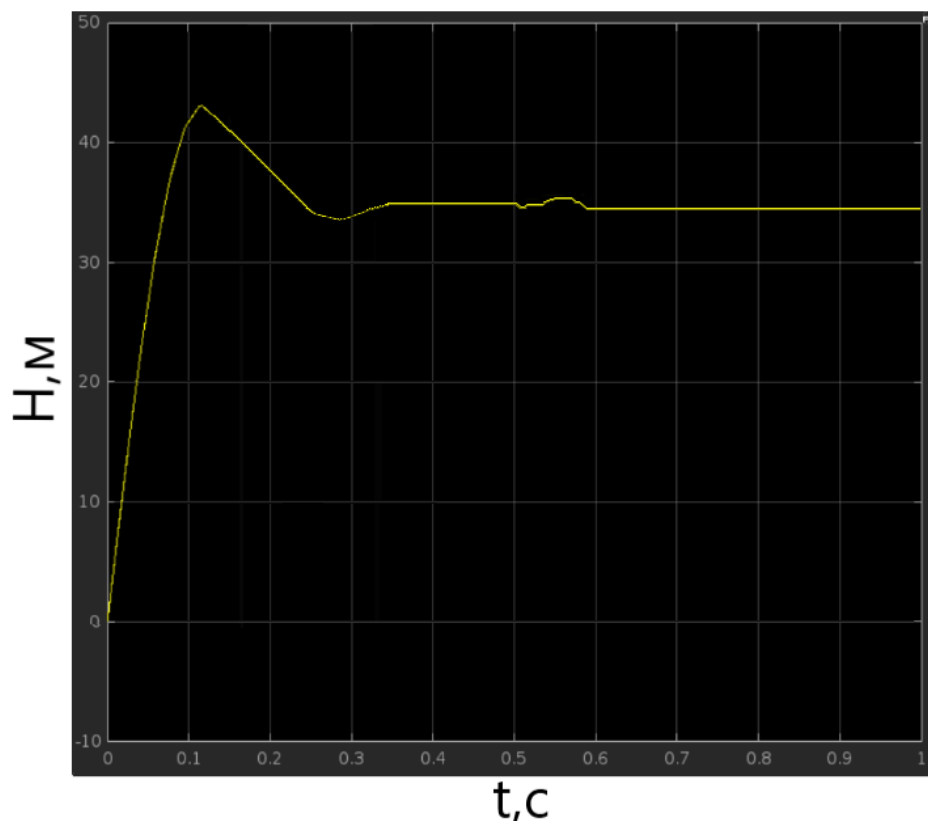


Рисунок 4.10 - Графік перехідного процесу зміни тиску, при реакції на стрибок сигналу завдання з урахуванням обмежень на виході регулятора тиску і подачу навантаження

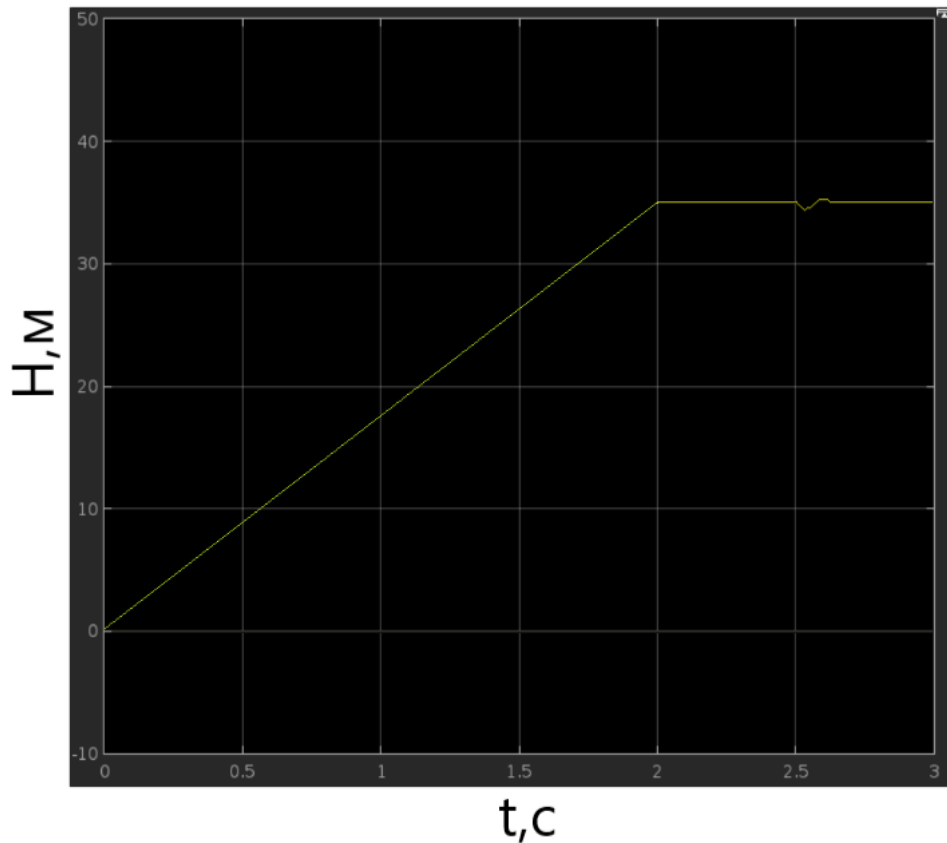


Рисунок 4.11 - Графік перехідного процесу зміни тиску, при реакції на плавне наростання сигналу завдання з урахуванням обмежень на виході регулятора тиску і подачу навантаження

Проаналізувавши отримані результати моделювання можемо дійти таких висновків:

- Режим стрибкоподібної реакції на завдання трохи відрізняється від стандартного налаштування контуру на оптимальні значення. Це пояснюється динамікою компресора, яка не враховувалась у розрахунках регуляторів.

- Подача навантаження контуром працює досить стабільно, що пояснюється наявністю інтегральної складової регулятора тиску.
- Встановлення обмежень на вихідний сигнал регулятора призвело до погіршення показників якості перехідних процесів. Швидкодія системи трохи зменшилася, а перерегулювання зросло. Використання задавача інтенсивності на вході системи дозволяє запустити компресорну установку за заданий час зменшуючи при цьому перерегулювання.

РОЗДІЛ 5 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА SCADA

5.1 Загальні положення з технічної реалізації

Компресорні установки складаються з різних систем, таких як пневматична, система електропостачання, система автоматики і інші. Пневматична система об'єднує ресивери, трубопроводи, компресори, прилади контролю та вимірювання. Система електропостачання забезпечує електричний зв'язок з енергосистемою і неперервне електропостачання всіх споживачів компресорної установки. Система автоматики дозволяє дистанційно керувати насосною установкою та іншими системами.

Розглянемо один із можливих варіантів технічної реалізації системи управління компресорною установкою.

Принципова схема електропостачання приведена в Додатку Б. Електропостачання забезпечується від трансформатора власних потреб підстанції ТВП, який перетворює напругу низької сторони автотрансформатора в напругу 0,4кВ. Від ТВП електроенергія надходить на щит власних потреб ЩВП підстанції. На кожній підстанції 330кВ є мінімум дві секції шин 0,4 кВ, кожна з яких живиться від власного ТВП, вони можуть працювати як незалежно одна від одної, так і з'єднуватися секційним автоматичним вимикачем, таким чином здійснюється резервування обладнання власних потреб. Окрім того, може використовуватися третя секція шин, яка може під'єднуватися до інших двох, до третьої СШ під'єднано дизель-генератор, який в аварійному режимі слугує незалежним джерелом живлення власних потреб підстанції. Таким чином, ми маємо максимально надійне електропостачання компресорної установки, яка підключена до кожної секції шин через автоматичні вимикачі. На головному електричному щиті для керування мережею розміщені пристрої для обліку витрати електроенергії.

Силове електрообладнання знаходиться в електрощитовій КУ, де є силові шафи управління СШУ, перетворювачі частоти ПЧ та при необхідності, компенсатор реактивної потужності КРП. Силові шафи управління включають комутаційні апарати для перемикання живлення електроприводу компресора або до виходу перетворювача частоти, або до реактивної потужності.

Машинний зал КУ містить основне та допоміжне обладнання. Основне обладнання включає компресорні установки та електроприводи, тоді як допоміжне - засувки для пуску компресора, зворотні клапани, вентилятори, обігрівачі тощо. Управління цим обладнанням здійснюється виконавчими механізмами.

Датчик тиску в трубопроводі надає системі управління важливу інформацію, на основі якої приймаються рішення щодо контролю впливу.

Сигнали управління та вимірювальні дані обладнання збираються в шафі управління, де їх об'єднують в єдину інформаційну лінію зв'язку для подальшої передачі до технологічного контролера. Технологічний контролер відтворює алгоритм керування КУ та обмін інформацією з автоматизованою системою управління технологічним процесом.

Система телеметрії використовується для передачі стану станції на черговий щит, виявлення аварійних ситуацій та отримання команд керування. Це відбувається через різні мережі передачі даних, такі як телефонні, радіоканали або мережі місцевих операторів мобільного зв'язку. Програмне забезпечення ТП містить функціональні блоки, реалізовані на програмному рівні. Однією з основних ланок, яка приймає участь у перетворенні енергії для приводу компресора, є перетворювач частоти. Він відповідає за плавний розгін та гальмування двигуна компресора та регулювання його обертання під час роботи. Подробиці вибору конкретного перетворювача частоти та пов'язані розрахунки наведено в наступному пункті.

Принципова схема силових ланцюгів перетворювача частоти представлена у додатку А. Вона складається з наступних компонентів.

Струмообмежуючі реактори L та конденсатори C на вході є для схеми мережевим фільтром. Некерований випрямляч реалізований на діодах VD1-VD6, паралельно з якими з'єднані конденсатори, які обмежують напругу на діодах. Конденсатори C7 та C8 заземлені, таким чином вони усувають можливий вплив змінної напруги та радіоперешкоди. Конденсатори C9 та C10 захищають транзистори автономного інвертора від перенапруги. Світлодіод VD7 є індикатором заряду. Автономний інвертор напруги реалізований на транзисторах VT1-VT4, паралельно з якими з'єднуються діоди VD8-VD11. Таким же чином реалізуються і фази B та C. Для управління перетворювачем необхідно реалізувати зворотній зв'язок за струмом, тому в схемі використовуються трансформатори струму ТА1-ТА3. ВJ1 є датчиком струму для ланки постійного струму.

Система електроприводу використовує такі можливості перетворювача:

- 1) Функція енергозбереження;
- 2) Вбудований ПДД-регулятор для регулювання тиску;
- 3) Множинні функції вхідних та вихідних блоків для установки тиску та автоматизації завдань.

У режимі з енергозбереженням перетворювач автоматично зменшує енергоспоживання при низькому навантаженні двигуна. Він контролює струм, який споживається, регулюючи вихідну напругу для передачі лише необхідної потужності. Чим більше пристрій працює у цьому режимі, тим більша ефективність енергозбереження. Проте, якщо навантаження перевищує 70% номінального моменту обертання двигуна, ефективність зменшується. Для певних спеціальних типів двигунів, наприклад, шпindelних чи тих, що працюють під водою, режим енергозбереження не забезпечує оптимальну економію енергії у разі надмірного споживання потужності.

Ступені режиму енергозберігаючого регулювання перетворювача:

- 1) Початок роботи без енергозберігаючого регулювання під час розгону двигуна.

- 2) Запуск енергозберігаючого режиму після досягнення вихідної частоти, заданої частотою.
- 3) Розрахунок оптимальної вихідної напруги для зменшення енергоспоживання.
- 4) Зміна вихідної напруги для досягнення оптимальної ефективності.
- 5) Автоматичне налаштування для пошуку мінімальної необхідної потужності двигуна, змінюючи вихідну напругу.
- 6) Перетворювач починає процедуру нормального гальмування двигуна. Під час цього процесу перетворювач не виконує режим енергозбереження.

Коли активний режим енергозбереження, перетворювач автоматично регулює споживану енергію двигуна, знижуючи її при низькому навантаженні. Зміна вихідної напруги під контролем перетворювача забезпечує мінімізацію реальної потужності, що використовується двигуном.

Розглянемо вбудований ПІД регулятор, що входить до складу інвертора. На відміну від самого перетворювача, який не містить системи регулювання швидкості, цей регулятор дозволяє регулювати швидкість інших величин, що залежать від швидкості. Він має два типи ПІД регулювання: з диференціюванням зворотного зв'язку та основний режим регулювання. Всі основні параметри регуляторів визначаються числово, враховуючи тип регулювання.

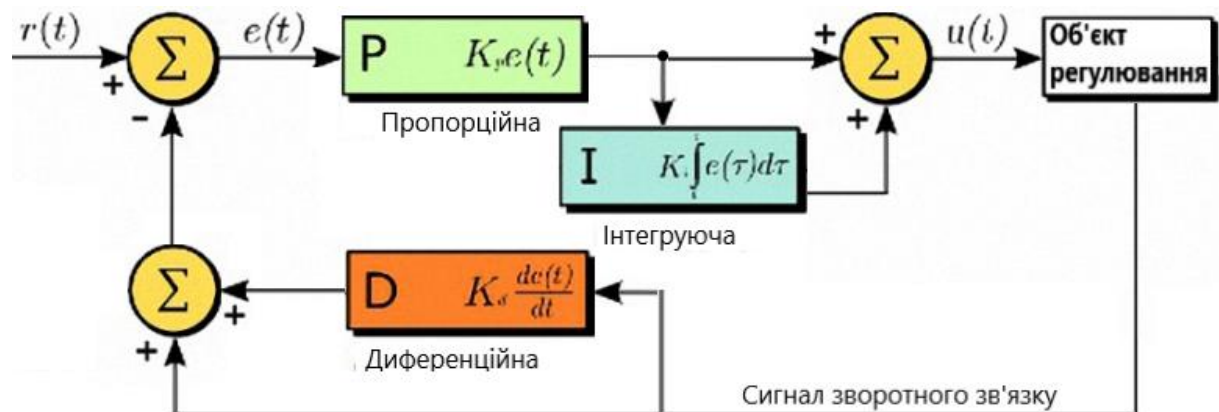


Рисунок 5.1 - Режим ПІД регулювання з диференціюванням зворотного зв'язку

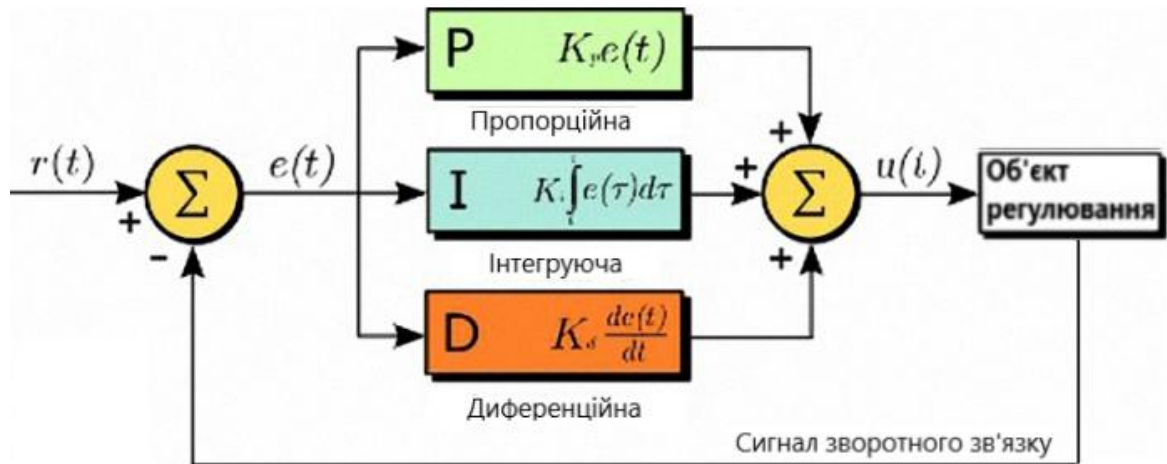


Рисунок 5.2 - Основний режим ПІД регулювання

Схема, представлена на рисунку 5.3 пояснює принцип впливу уставок, що відносяться до ПІД регулятора, на його режими.

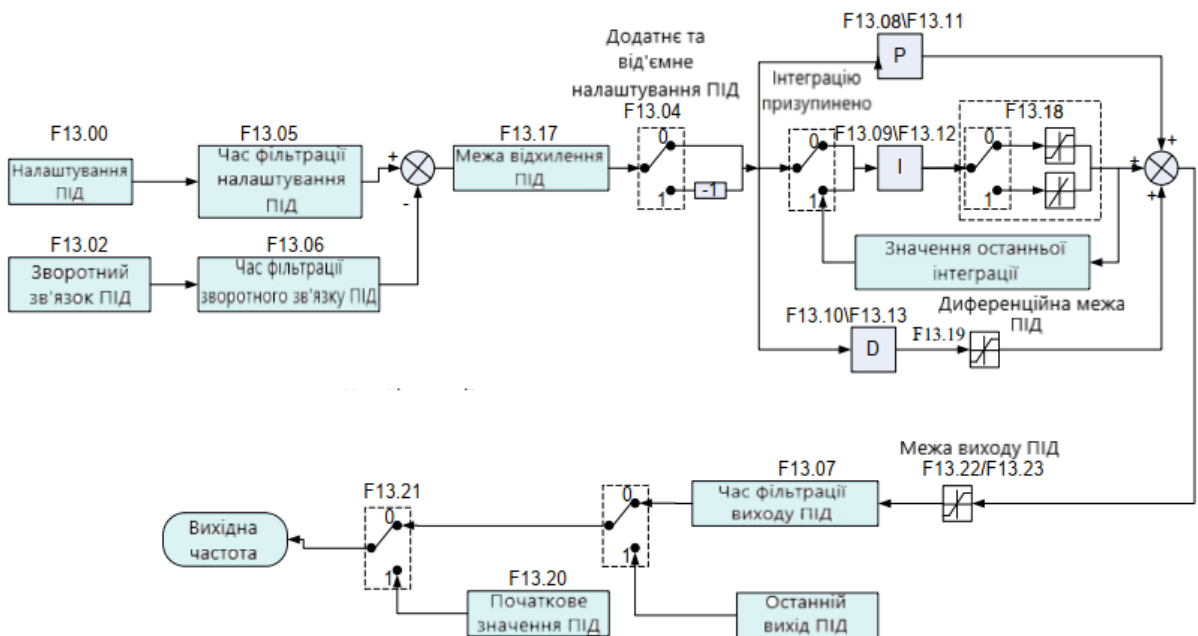


Рисунок 5.3 - Функціональна схема ПІД регулятора

F13.00	Налаштування ПІД	Діапазон: 0~7	За замовчуванням: 0
--------	------------------	---------------	---------------------

Обирається джерело налаштування ПІД-контролю:

0: F13.01 цифрове налаштування;

1: Потенціометр клавіатури;

2: AI1;

3: Система зв'язку;

4: Багатоступінчата функція;

5: Імпульсний вхід DI7/H

6: AI2;

7: AI3.

F13.01	Цифрове налаштування ПІД	Діапазон:0.0~1 00.0%	За замовчуванням:50.0%
--------	--------------------------	-------------------------	------------------------

Якщо F13.00 встановлено на 0, ця величина параметра береться як встановлене значення для ПІД-контролю.

F13.02	Зворотний зв'язок ПІД	Діапазон:0~8	За замовчуванням:0
--------	-----------------------	--------------	--------------------

Вибір джерела зворотного зв'язку для ПІД-контролю:

0: AI1;

1: AI2;

2: Система зв'язку;

3: AI1 + AI2;

4: AI1 – AI2;

5: Макс. {AI1, AI2};

6: Мін. {AI1, AI2};

7: Імпульсний вхід DI7/HI;

8: AI3.

F13.03	Діапазон налаштувань зворотного зв'язку ПІД	Діапазон:0.0 ~6000.0	За замовчуванням:100.0
--------	---	-------------------------	------------------------

Цей параметр - безрозмірна одиниця. Використовується для відображення налаштування ПІД (U00.11) та зворотнього зв'язку ПІД (U00.12). Відносна величина 100% налаштування зворотнього зв'язку ПІД відповідає значенню F13.03. Якщо F13.03 встановлено на 1000, а налаштування ПІД дорівнює 50,0%, відображення налаштування ПІД (U00.11) відповідатиме 500.

F13.04	Напрямок дії ПІД	Діапазон:0~1	За замовчуванням:0
--------	------------------	--------------	--------------------

0: Позитивне регулювання;

1:Негативне регулювання.

Цей параметр може використовуватися з цифровим входом-виводом "Напрямок регулювання ПІД" для вибору позитивного або негативного регулювання ПІД.

F13.04	Вивід направлення регулювання ПІД	Регулювання
0	ВИМК	Позитивне
0	ВКЛ	Негативне
1	ВИМК	Негативне
1	ВКЛ	Позитивне

Позитивне регулювання: коли зворотний сигнал менший за налаштування ПІД, вихідна частота приводу зростає, щоб досягти балансу ПІД. Коли зворотний сигнал більший за налаштування ПІД, вихідна частота приводу зменшиться, щоб досягти балансу ПІД.

Негативне регулювання: коли зворотний сигнал менший за налаштування ПІД, вихідна частота приводу зменшиться, щоб досягти балансу ПІД. Коли зворотний сигнал більший за налаштування ПІД, вихідна частота приводу зростає, щоб досягти балансу ПІД.

F13.05	Час фільтрації налаштування ПІД	Діапазон:0.00 0~10.000 с	За замовчуванням:0.000 с
--------	---------------------------------	-----------------------------	--------------------------

F13.06	Час фільтрації зворотного зв'язку ПІД	Діапазон:0.00 0~10.000 с	За замовчуванням:0.000 с
F13.07	Час фільтрації виходу ПІД	Діапазон:0.00 0~10.000 с	За замовчуванням:0.000 с

Цей параметр встановлює час фільтрації для налаштування ПІД, зворотного зв'язку та виходу.

F13.08	Пропорційне підсилення K_p1	Діапазон: 0.0~100.0	За замовчуванням: 1.0
F13.09	Час інтегрування T_i1	Діапазон: 0.01~10.000 с	За замовчуванням: 0.10 с
F13.10	Диференційний час T_d1	Діапазон: 0.000~10.000 с	За замовчуванням: 0.000 с

Пропорційне підсилення K_p1 : визначає інтенсивність регулювання ПІД-регулятора. Чим вище значення K_p1 , тим сильніше регулювання. Значення 100.0 вказує, що коли відхилення між зворотнім зв'язком ПІД і налаштуванням ПІД становить 100.0 %, амплітуда регулювання ПІД-регулятора на вихідній опорній частоті є максимальною.

Час інтегрування T_i1 : він визначає інтегральну інтенсивність регулювання. Чим коротший час інтегрування, тим сильніше регулювання. Коли відхилення між зворотнім зв'язком ПІД і налаштуванням ПІД становить 100.0 %, інтегральний регулятор виконує постійне налаштування протягом часу, встановленого у FA-06. Тоді амплітуда регулювання досягає максимальної частоти.

Диференційний час T_d1 : це визначає інтенсивність регулювання ПІД-регулятора за зміною девіації. Чим довший диференційний час, тим сильніше регулювання. Диференційний час - це час, протягом якого зміна значення зворотного зв'язку досягає 100.0 %, після чого амплітуда регулювання досягає максимальної частоти.

F13.11	Пропорційне підсилення Kp2	Діапазон: 0.0~100.0	За замовчуванням: 1.0
F13.12	Час інтегрування Ti2	Діапазон: 0.01~10.00 с	За замовчуванням: 0.10 с
F13.13	Диференційний час Td2	Діапазон: 0.000~10.000 с	За замовчуванням: 0.000 с

Деякі програми потребують перемикання параметрів ПІД, коли одна група параметрів ПІД не може задовольнити вимоги всього процесу. Ці параметри використовуються для перемикання між двома групами параметрів ПІД. Параметри регулювання від F13.11 до F13.13 встановлюються аналогічно до параметрів від F13.08 до F13.10.

F13.14	Перемикання параметрів ПІД	Діапазон:0 ~2	За замовчуванням: 0
F13.15	Відхилення 1 перемикання параметрів ПІД	Діапазон:0. 0~100.0%	За замовчуванням:20.0%
F13.16	Відхилення 2 перемикання параметрів ПІД	Діапазон:0. 0~100.0%	За замовчуванням:80.0%

ПІД процесу має дві групи пропорційних, інтегральних та диференціальних параметрів, що встановлюються цим параметром.

- 0: немає перемикання, визначається параметрами Kp1, Ti1 та Td1. Завжди визначається Kp1, Ti1 та Td1, встановленими з F13.08 до F13.10.
- 1: автоматичне перемикання на основі вхідного зміщення.

Коли зміщення між установкою та зворотним зв'язком менше заданого значення F13.15, регулювання ПІД визначається Kp1, Ti1 та Td1. Коли зміщення між установкою та зворотним зв'язком більше, ніж задане значення F13.15, регулювання ПІД визначається Kp2, Ti2 та Td2 у F13.11 – F13.13.

Перемикання за допомогою виводу:

При встановленні виводу цифрового входу «Перемикач параметрів ПІД» у стан OFF, параметри визначаються K_{p1} , T_{i1} та T_{d1} . Коли "Перемикач параметрів ПІД" встановлений у положення ON, параметри визначаються K_{p2} , T_{i2} та T_{d2} .

F13.17	Межа відхилення ПІД	Діапазон:0.0~ 100.0%	За замовчуванням:1.0%
--------	---------------------	-------------------------	--------------------------

Якщо зміщення між зворотним зв'язком ПІД та налаштуванням буде більше цього заданого значення, регулятор ПІД здійснить регулювання. Якщо зміщення між зворотним зв'язком ПІД та налаштуванням буде менше цього заданого значення, то ПІД зупинить регулювання, і вихід регулятора ПІД залишатиметься незмінним. Ця функція може покращити стійкість роботи ПІД.

F13.18	Властивість інтегрування ПІД	Діапазон:00~ 11	За замовчуванням:00
--------	------------------------------	--------------------	------------------------

Одиниці: (необхідність зупинки операції інтегрування, коли вихід досягає межі):

0: продовження операцій інтегрування;

1: зупинення операцій інтегрування.

Якщо обрано "Зупинення операцій інтегрування", операції інтегрування ПІД зупиняються, що допоможе уникнути викидів ПІД.

Десятки (окреме інтегрування):

0: неприпустимий;

1: допустимий.

Якщо він має значення допустимий, операції інтегрування ПІД зупиняються, коли DI, розподілений з функцією 25 "Пауза інтегрування ПІД", встановлено в ON. У цьому разі працюють лише пропорційні і диференціальні операції. Якщо встановлено "неприпустимо", інтегрування залишається недійсним незалежно від того, чи встановлена функція 25 «Пауза інтегрування ПІД» у стан ON, або ні.

F13.19	Межа диференціювання ПД	Діапазон:0.0 ~100.0%	За замовчуванням:0.5%
--------	-------------------------	-------------------------	-----------------------

Встановлює межу виходу диференціювання керування ПД.

F13.20	Початкова величина ПД	Діапазон:0.0 ~100.0%	За замовчуванням:0.0%
F13.21	Час утримання початкової величини ПД	Діапазон:0.0 ~6000.0 с	За замовчуванням:0.0 с

ПД не виконує налаштування, коли привід починає працювати, але виводить значення F13.20 та зберігає його протягом часу витримки, встановленого F13.21, а потім починається регулювання ПД. Якщо F13.21 має значення 0.0, початкове значення ПД заблоковано. Ця функція дозволяє регулюванню ПД швидко досягти стабільного стану.

F13.22	Верхня межа вихідної частоти ПД	Діапазон: Нижня межа вихідної частоти ~100.0%	За замовчуванням: 100.0%
F13.23	Нижня межа вихідної частоти ПД	Діапазон: -100.0% ~ нижня межа вихідної частоти ПД	За замовчуванням:-100.0%

Ця функція використовується для обмеження вихідної частоти ПД, 100.0% відповідає максимальній частоті.

F13.24	Виявлення втрати зворотного зв'язку ПД	Діапазон: 0.0% ~ 100.0 %	За замовчуванням: 0.0%
F13.25	Час виявлення втрати зворотного зв'язку ПД	Діапазон: 0.0 ~ 30.0 с	За замовчуванням: 1.0с
F13.28	Високе значення втрати зворотного зв'язку ПД	Діапазон: 0.0% ~ 100.0 %	За замовчуванням:100.0%
F13.29	Час виявлення високого значення втрати зворотного зв'язку ПД	Діапазон:0.0 ~ 30.0s	За замовчуванням:1.0s

Якщо значення зворотного зв'язку ПД-регулятора не знаходиться в діапазоні F13.24 та F13.28, а тривалий час досягає значення F13.25/F13.28, то інвертор повідомить про помилку Err19 (втрата зворотного зв'язку ПД-регулятора).

F13.26	Вибір операції ПД	Діапазон: 000~111	За замовчуванням: 000
F13.27	Швидкість ПД цифрового налаштування UP / DOWN	Діапазон: 0.0~100.0%	За замовчуванням: 0.0%

Розряд одиниць:

вибір операції при зупинці:

0: немає операцій ПД при зупинці;

1: робота ПД при зупинці.

Він використовується для вибору, чи продовжити роботу ПД у стані зупинки. Зазвичай робота ПД зупиняється, коли привід змінного струму зупиняється.

Розряд десятків:

обмеження вихідної частоти на вихідну нижню та верхню межу:

0: немає обмеження;

1: обмеження.

Коли ПД використовується для регулювання, варіант 1 може ефективно запобігти серйозній проблемі затримки, спричиненій впливом існуючого прискорення/сповільнення.

Розряд сотень: ПД цифр. налашт. UP / DOWN

При цифровому заданому ПД задане значення може бути змінено через UP/DOWN функції F13.27, зміна швидкості проводиться за допомогою коду функції F13.27.

0: скидання при втраті живлення, після вимкнення живлення регулююча функцією UP/DOWN частота скидається.

1: збереження при втраті живлення, після вимкнення живлення регулююча функцією UP/DOWN частота зберігається.

5.2 Визначення основних елементів електропривода

Проведемо розрахунок потужності та вибір електродвигуна для компресорної установки. Щоб відповідати вимогам завдання, необхідно виконати розрахунок потужності та обрати відповідне обладнання на основі каталогів виробників. Оскільки основною задачею є регулювання напору шляхом зміни частоти обертання компресорного валу, привід, який обирається для цієї установки, повинен мати можливість регулювання швидкості обертання валу двигуна.

Ключовим елементом в системі електроприводу є сам електродвигун. Відомо, що застосування асинхронних двигунів сприяє підвищенню надійності електроприводу, а також зменшує капітальні та експлуатаційні витрати.

Опис компресорного обладнання.

В компресорній установці високовольтної підстанції зазвичай становлено 4 поршневі компресора типу На насосній станції другого підйому для підвищення надійності встановлені два відцентрових насоса типу ЗВШ 1,6-3/46МЗ.

Установки компресорні ЗВШ 1,6 призначені для одержання стисненого повітря високого тиску, використовуваного в високовольтних повітряних вимикачах і інших системах на атомних, теплових, гідроелектростанціях та електропідстанціях електричних мереж гірничих робіт; облаштування нафтових і газових свердловин, і інших промисловостях, де необхідна наявність повітря високого тиску для технічних цілей, створення надуву інертного середовища і попередження пожежо - і вибухонебезпечних ситуацій.

Установка компресорна ЗВШ 1,6-3/46МЗ є поршневою, стаціонарною, призначеною для отримання стиснутого повітря під тиском 4,51 МПа (46 кгс/см²),

яке використовується у високовольтних повітряних вимикачах та інших системах електростанцій та підстанцій.

Виготовлена у вигляді моноблока. Компресор жорстко з'єднаний з двигуном через з'єднувальний корпус. Це усуває необхідність центрування валів двигуна та компресора при монтажі на місці експлуатації.

Таблиця 5.1 - Технічні характеристики поршневого компресора ЗВШ 1,6-3/46МЗ.

Газ, який стискається	Повітря
Тип компресора	Стаціонарний, поршковий, W-подібний, трирядковий, триступеневий, трициліндровий
Об'ємна працездатність, приведена до початкових умов	3±0,15 м ³ /хв
Тиск початковий, абсолютний	0,101 МПа (1,033 кгс/см ²)
Тиск максимальний, абсолютний	4,51 МПа (1,033 кгс/см ²)
Допустимий кавітаційний запас	Не менше 6,5 м
Витрата оливи	Не більше 0,06 кг/г
Температура повітря на вході в установку	- номінальна -293 (20) К (°С) - максимальна -313 (40) К (°С) - мінімальна -274 (1) К (°С)
Температура кінцева	Не більше 323 (60) К (°С)
Частота обертання колінвалу компресора	16,42±0,18 с ⁻¹ (985±10,8 об/хв)
Потужність, яка споживається установкою	Не более 38,1 кВт
ККД	83%
Маса установки	1600 кг
Середній час роботи до відмови	Не менше 750 год
Середній час відновлення працездатності	Не більше 3,5 год
Середній ресурс до капітального ремонту	Не менше 15000 год
Середній термін працездатності	Не менше 15 років

Компресори належать до тих механізмів, де неможливо точно передбачити навантаження на валу двигуна в певний момент. При розгляді їх функціонування узагальнено, більшу частину часу повітря споживається у невеликих обсягах. Система регулювання тоді зменшує швидкість компресорів для підтримки сталого тиску. Це означає, що споживання енергії з мережі залишатиметься невеликим, але іноді можливі ситуації, коли споживання, і відповідно, швидкість, будуть високими. Тому при виборі двигуна доцільно керуватися номінальними характеристиками компресора.

Розрахуємо потужність на валу двигуна за наступною формулою:

$$P_{\text{вал}} = \frac{g Q_{\text{н.к}} (H_{\text{н.к}} + \Delta H)}{\eta_{\text{н.к}}} = \frac{9,81 \times 0,05 \times (67,5 + 6,5)}{0,83} = 43,73 \text{ кВт}$$

Позначення:

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

$Q_{\text{н.к}} = 0,05$ – номінальна продуктивність (подача) компресора, м³/с;

$H_{\text{н.к}}$ – номінальний напір компресора, м;

$\Delta H = 6,5$ – кавітаційний запас, м;

$\eta_{\text{н.к}} = 0,83$ – номінальний ККД компресора.

Таким чином, двигуни встановлені на компресорній установці повинні мати номінальну потужність не менше 43,74 кВт. Маючи ці дані, можемо підібрати асинхронний двигун серед тих, які рекомендує виробник компресорної установки.

Обираємо двигун за рекомендацією виробника компресора та розрахованою потужністю: 4AM250S6Y3.

Зовнішній вигляд двигуна 4AM250S6Y3 показаний на рисунку 5.4.



Рисунок 5.4 - Асинхронний двигун 4AM250S6У3

В системах, подібних цій, наявність лише компресорної установки для підвищення напору недостатня. Необхідно, щоб установка регулювала тиск у пневмережі зменшення витрат енергії, а також мінімізувала обсяг та розміри використовуваного обладнання. Тож наступним кроком буде вибір перетворювального пристрою.

Перетворювач має забезпечувати необхідні параметри електричної енергії для нормальної роботи приводного двигуна, а також контролювати електричну потужність, що постачається до двигуна для регулювання його швидкості. Для досягнення цієї мети, як описано раніше (в розділі 2), використовується перетворювач частоти на основі автономного інвертора напруги. При виборі перетворювача частоти важливо керуватися основними вимогами:

- надійність у будь-яких режимах роботи;
- простота управління, не втрачаючи основних параметрів вихідного струму, напруги та функціональних можливостей ПЧ.

У цьому випадку вибирається частотний перетворювач FRECON FR500A-4T-045G/055P(B)-H, який є потужним інвертором з розширеними функціональними можливостями, включаючи пропорційно-інтегрально-диференціальне (ПІД) регулювання та режим енергозбереження.

Частотний перетворювач FRECON FR500A-4T-045G/055P(B)-H використовується в установках, де вимагається висока точність контролю швидкості та швидкість відгуку крутного моменту, має низькочастотні вихідні характеристики. У розробці цього частотного перетворювача застосовується оновлене обладнання на базі нового покоління IGBT, яке має покращену конфігурацію та дизайн. Особливості включають:

- Незалежну конструкцію повітроводу, що ефективно захищає частотний перетворювач від пилу, зменшуючи ймовірність короткого замикання та підвищуючи надійність.
- Потужні вентилятори, що знаходяться в корпусі частотника, ефективно охолоджують інвертор, забезпечуючи захист від перегріву й стабільну роботу.

Цей перетворювач має широкий діапазон вхідної напруги, що відповідає міжнародним стандартам:

- Номінальна напруга: 3 фази 380-480 В, 50 Гц/60 Гц
- Діапазон коливань напруги: від 325 до 528 В, 50 Гц/60 Гц Він також оснащений комплексом функцій захисту, включаючи захист від короткого замикання, перевантаження двигуна, перегріву та інші. Частотники цієї серії мають різні режими обслуговування, такі як попередження, повна зупинка та безперервна робота, в залежності від серйозності несправності.

У таблиці 5.2 наведені основні характеристики перетворювача частоти FR500A-4T-045G/055P(B)-H.

Таблиця 5.2 - Номінальні дані перетворювача

Частота	50
Число фаз/напруга на вході	3 фази / 380В
Кількість аналогових входів	3
Гальмівний модуль	Є
Максимальна кількість фіксованих швидкостей	16
Панель програмування у комплекті з ПЧ	Знімна
Квадратичний закон управління	U/f^2 Є
Лінійний закон управління	U/f Є
Максимальна вихідна частота	600 Гц
Вбудований регулятор	ПД
ЕМС фільтр	Є
Інтерфейс	RS-485/ModbusЄ
Вбудований ПЛК	Ні
ККД, не менше	90
Захист від короткого замикання	True
Захист від обриву фази	Є
Кількість дискретних входів	7
Кількість дискретних виходів	2
Кількість аналогових виходів	2
Тип робочої величини	Потужність
Пусковий момент	0.5 Гц 180%
Ступінь захисту	IP20

Перетворювач забезпечує різноманітні режими функціонування та управління приводами машин та механізмів:

- Плавний старт;
- Довготривала робота в заданому діапазоні частот обертання та навантажень;
- Зміна напрямку руху;
- Гальмування та зупинка.

Захист електричного та механічного обладнання в аварійних ситуаціях.

- Застосування даного електроприводу виправдовується;
- Високою якістю статичних та динамічних характеристик;
- Високими показниками енергоефективності;
- Гнучким налаштуванням параметрів та режимів роботи;
- Розвиненим інтерфейсом та адаптивністю до різноманітних систем управління та автоматизації, включаючи високий рівень;
- Високою готовністю до монтажу;
- Простотою та зручністю управління та обслуговування під час експлуатації.



Рисунок 5.5 - Перетворювач частоти FR500A-4T-045G/055P(B)-H

Вибір датчика тиску.

Існує безліч можливих варіантів встановлення датчиків тиску. На більшості підстанцій нашої області встановлено датчики типу Сафір серії 2xxx Асс, тому розглянемо саме їх.



Рисунок 5.6 - Зовнішній вигляд датчиків тиску Сафір 2

Серія датчиків надлишкового тиску Сафір 2xxx Асс складається з корпусів, що виготовлені з нержавіючої сталі, та електронних модулів спеціального виконання. Ця конфігурація дозволяє їх використання в складі інформаційних і керуючих систем АЕС, виконуючи визначені завдання при підвищених температурах (LOCA).

Залежно від верхньої межі допустимого тиску, датчики можуть бути виконані у трьох типах: з важільною основою, мембранні на основі монокристалічного кремнію і мембранні на структурі кремнію на сапфірі.

Для систем із позитивним тиском рекомендується використання датчиків надлишкового тиску. У випадку систем із свідомо негативним тиском

використовуються датчики розрідження, а якщо можлива зміна знака тиску – датчики тиск-розрідження.

Оберемо датчик виходячи з робочого тиску компресора $N_{\text{ном}}=34,5\text{м} = 3,45$ атм.. Тоді максимально високий робочий тиск дорівнює:

$$P_{\text{макс}} = k \cdot N_{\text{ном}} = 1,2 \cdot 3,45 = 4,14 \text{ атм.}$$

Вибираємо датчик з найближчим великим робочим тиском:

Тип тиску:	надлишковий
Електронний модуль:	аналоговий
Діапазон вимірювань:	від -100 ... 60 кПа до -0.1 ... 1.5 МПа, від 0 ... -0.063 кПа до 0 ... -100 кПа, від 0 ... 0.063 кПа до 0 ... 100 МПа
Переналаштування:	1:10
Вихідний сигнал:	0-5 mA, 4-20 mA
Похибка:	0.25% FS
Матеріали, що контактують із середовищем:	Hastelloy, Корозійно-стійка сталь 12X18H10T
Управління:	Джампери, потенціометри
Підключення до процесу:	G1/2, M20x1.5
Промисловість:	Атомна енергетика, Гірничодобувна, Металургійна, Нафтогазова, Теплова енергетика, Трубопровідний транспорт, Хімічна
Сертифікація/кваліфікація:	ATEX, IP 66/67, LOCA, Атомна сертифікація, сейсмічна і радіологічна кваліфікація

5.3 Визначення апаратів захисту

Також, нам необхідно обрати апарати захисту для нашої схеми. Для цього знову скористаємося додатком Б. Ми бачимо схему живлення компресорної установки від трансформаторів власних потреб підстанції. Оскільки нас цікавить саме живлення компресорної установки, звертаємо увагу лише на автоматичні вимикачі QF15, QF31 та QF47. Окрім того, важливо правильно налаштувати ввідні вимикачі QF25, QF28 та QF42, а також секційні вимикачі QF26 та QF52.

Ввідні та секційні автоматичні вимикачі фірми EATON IZMX16B3-V16W



Рисунок 5.6 - Зовнішній вигляд автоматичного вимикача EATON

IZMX16B3-V16W

Маючи розрахунки струмів короткого замикання на різних ділянках об'єкта захисту, можемо виставити необхідні уставки.

Таблиця 5.3 - Уставки ввідних вимикачів

АВ	QF25 (1СШ)	QF28 (3СШ)	QF42 (2СШ)
Тип АВ	EATON IZMX16B3- V16W-1	EATON IZMX16B3- V16W-1	EATON IZMX16B3-V16W- 1
Тип розчеплювача	Мікропроцесорний розчеплювач PXR		
$I_{ном.}, A$	1600	1600	1600
$I_{i(СВ)}, A$	3200	3200	3200
$I_{sd(МСЗ шв)}, A$	1200	1200	1200
$t_{sd(МСЗ шв)}, c$	0,4	0,4	0,4
$I_{r(МСЗ пов)}, A$	800	800	800
$t_{r(МСЗ пов)}, c$	4	4	4

Таблиця 5.4 - Уставки секційних вимикачів

АВ	QF26 (1 та 3 СШ)	QF52 (2 та 3 СШ)
Тип АВ	EATON IZMX16B3- V10W-1	EATON IZMX16B3- V10W-1
Тип розчеплювача	Мікропроцесорний розчеплювач PXR	
$I_{ном.}, A$	1000	1000
$I_{i(СВ)}, A$	2000	2000
$I_{sd(МСЗ шв)}, A$	1200	1200
$t_{sd(МСЗ шв)}, c$	0,2	0,2
$I_{r(МСЗ пов)}, A$	800	800
$t_{r(МСЗ пов)}, c$	2	2

Автоматичні вимикачі, які захищають саму компресорну установку обрані фірми EATON NZMC1-A100-SVE.



Рисунок 5.6 - Зовнішній вигляд автоматичного вимикача EATON IZMX16B3-V16W

Маючи розрахунки струмів короткого замикання на різних ділянках об'єкта захисту, можемо виставити необхідні уставки.

Таблиця 5.5 - Уставки відходящих вимикачів

AB	$I_{н.вим.}, A$	$I_{н.розч.}, A$	$I^{(3)}_{кз.мін.}, A$	КЧСВ	КЧМТЗ
QF15	63	63	2800	4.5	35
QF31	63	63	2800	4.5	35
QF47	63	63	2800	4.5	35

5.4 Розробка SCADA-системи

Для керування роботою компресорної установки була розроблена SCADA системи. Завдяки цьому, черговий підстанції має змогу з робочого місця спостерігати за процесами, які відбуваються в іншому приміщенні підстанції, отримувати актуальну інформацію щодо стану обладнання та режиму його роботи в реальному часі. Для проектування мною було використано середовище SCADA Zenon.

SCADA система zenon є ключовим продуктом від австрійської компанії COPA-DATA GmbH. Розроблена у середині 80-х, вона стала першим комплексним рішенням для графічної візуалізації у Windows-системах. Завдяки постійним оновленням та інтеграції передових технологій, zenon займає провідні позиції на ринку систем управління та візуалізації процесів.

Ця платформа повністю вирішує всі завдання, що виникають у сфері систем управління та візуалізації. Вона надає зручне та інтуїтивне керування, чітку взаємодію між всіма інженерними системами, автоматичну адаптацію та інтелектуалізацію режимів роботи. Також, zenon базується на стандартних відкритих технологіях і пропонує великий набір простих у використанні графічних інструментів для побудови систем візуалізації.

Комплекс складається з трьох основних модулів:

- 1) Zenon Editor - програма для редагування операторських схем, налаштування підключення до промислового комп'ютера та аварійних діапазонів.
- 2) Zenon Runtime - програмне забезпечення для відображення операторських схем, показу аварійних повідомлень, відображення реального часу та взаємодії з базою даних.
- 3) Zenon SQL Server - реляційна база даних на основі MS SQL Server, що зберігає дані про підключення до промислового комп'ютера, дані з сенсорів за часом, аварійні повідомлення та іншу інформацію, яка налаштована у Zenon Editor.

На основі функціональної схеми автоматизації була створена операторна мнемосхема пневмережі підстанції.

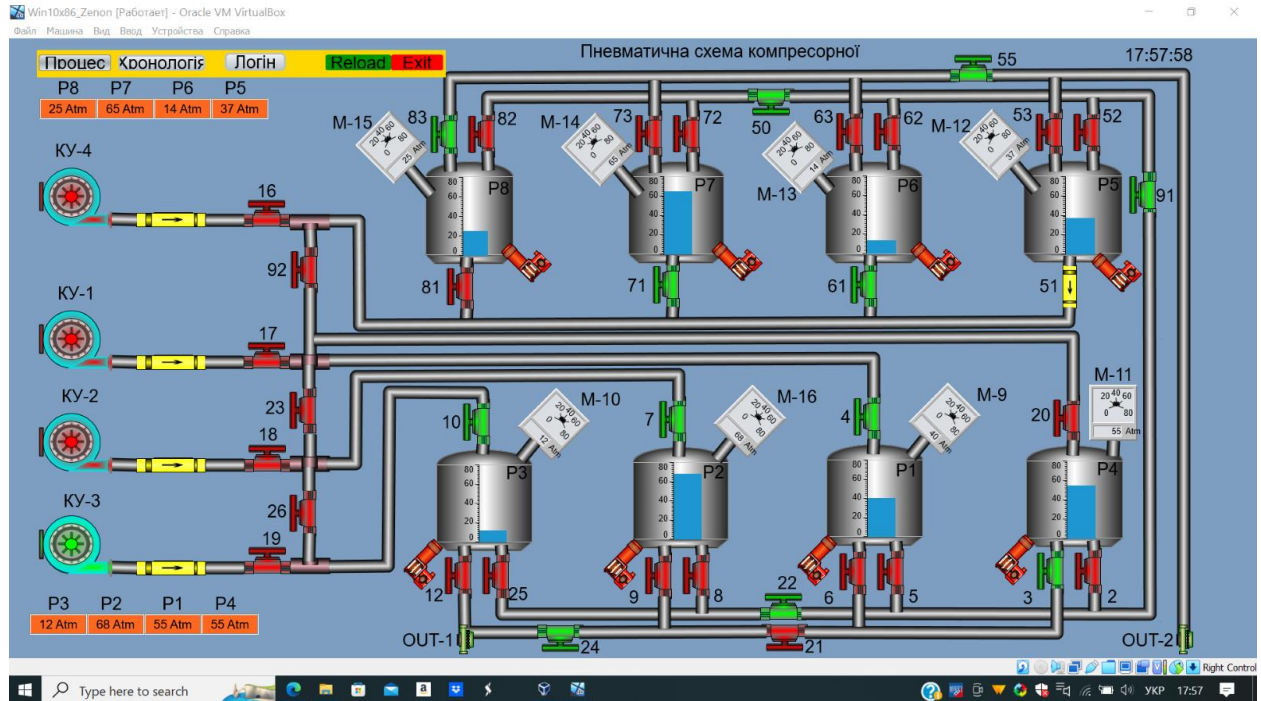


Рисунок 5.7 – Операторна мнемосхема пневмережі підстанції

Схема живиться від 4 компресорних установок, стиснене повітря від них надходить до 8 ресиверів. За мету я ставив автоматизувати саме частину схеми з компресорними установками та ресиверами.

Компресорні установки та клапани можуть вмикатися та вимикатися натисканням по ним кнопкою мишки, при цьому вони змінюють свій колір. Зелений колір сигналізує про вимкнене обладнання та зачинений кланан, червоний колір – навпаки. Це реалізовано завдяки функції невидимої кнопки. На кожному ресивері контролюється тиск, значення якого відображується на манометрі окремого ресивера та дублюється в таблиці зліва вгорі для P8-P5 та зліва внизу для P4-P1. Для можливості здійснення керування необхідно залогінитися, для цього на панелі навігації є кнопка “Логін”.

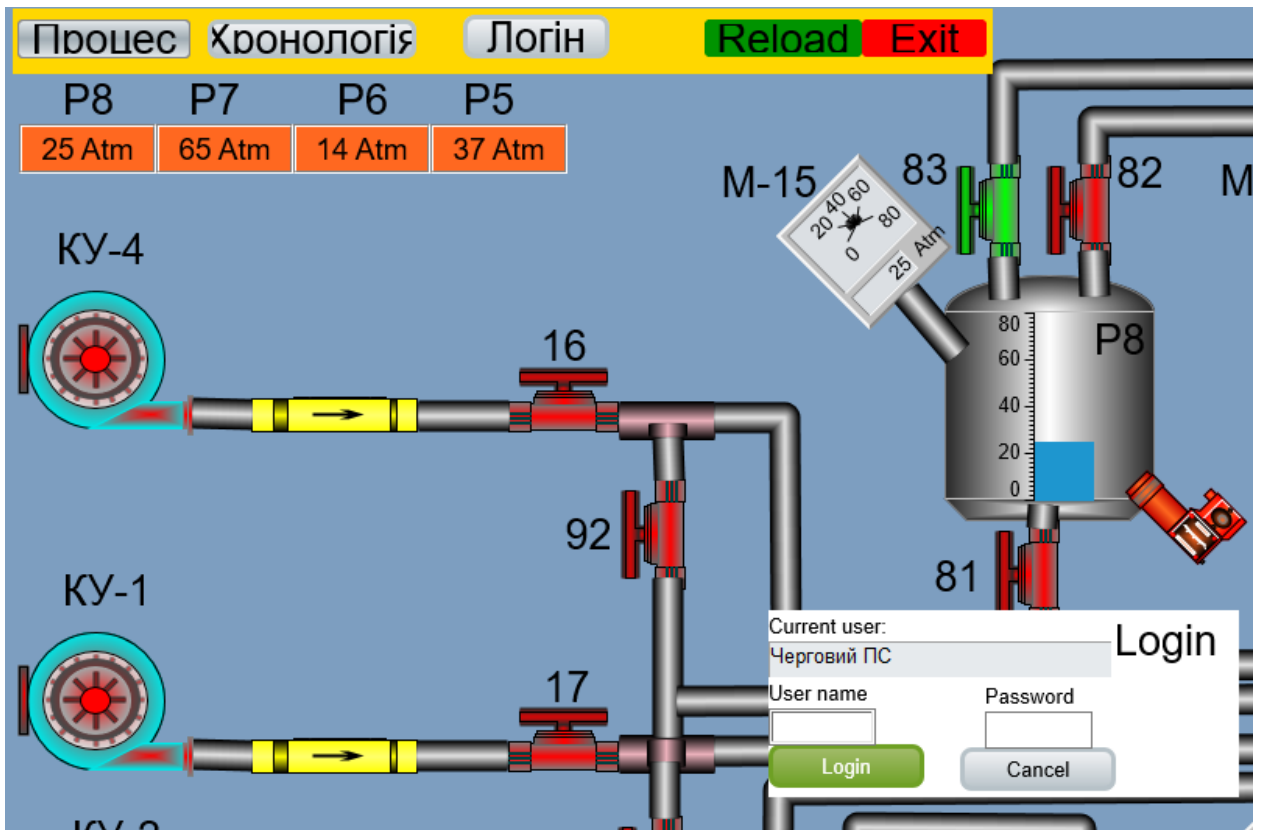


Рисунок 5.8 – Відображення необхідності встановлення особи для можливості керування технологічним процесом

Для контролю параметрів стану та зміни системи був створений екран “Хронологія”, куди фіксуються ці значення:

The screenshot displays the 'Хронологія' (Chronology) screen in SCADA. At the top, there is a 'Filter' field with the expression '[*]-[*]-[T,Rel:0d,1h,0m,0s]' and a 'Number' field with the value '23'. A 'Процес' (Process) button is visible. Below the filter, there are 'Filter profiles', 'Save', 'Import', 'Export', and 'Delete' buttons. The main area contains a table with the following data:

Time received	Text	Variable name	Value	Mea...	User - full na
06.06.2023 17:56:07	System was started				SYSTEM
06.06.2023 17:56:29	User 'Черговий - Черговий ПС' logged in				Черговий ПС
06.06.2023 17:56:31	Modify spontaneous value: (1)	КУ[3]	1		Черговий ПС
06.06.2023 17:56:36	Modify spontaneous value: (1)	Ресивер[8].Клапан 3	1		Черговий ПС
06.06.2023 17:56:40	Modify spontaneous value: (1)	Клапани.Клапан[8]	1		Черговий ПС
06.06.2023 17:56:41	Modify spontaneous value: (1)	Клапани.Клапан[9]	1		Черговий ПС
06.06.2023 17:56:44	Modify spontaneous value: (1)	Клапани.Клапан[10]	1		Черговий ПС
06.06.2023 17:56:48	Modify spontaneous value: (1)	Ресивер[7].Клапан 1	1		Черговий ПС
06.06.2023 17:56:49	Modify spontaneous value: (1)	Ресивер[6].Клапан 1	1		Черговий ПС
06.06.2023 17:56:53	Modify spontaneous value: (1)	Ресивер[3].Клапан 1	1		Черговий ПС
06.06.2023 17:56:54	Modify spontaneous value: (1)	Ресивер[2].Клапан 1	1		Черговий ПС
06.06.2023 17:56:54	Modify spontaneous value: (1)	Ресивер[1].Клапан 1	1		Черговий ПС
06.06.2023 17:57:00	Modify spontaneous value: (1)	Клапани.Клапан[11]	1		Черговий ПС
06.06.2023 17:57:00	Modify spontaneous value: (1)	Клапани.Клапан[12]	1		Черговий ПС
06.06.2023 17:57:04	Modify spontaneous value: (1)	Ресивер[4].Клапан 3	1		Черговий ПС
06.06.2023 17:57:13	Modify spontaneous value: (25 Atm)	Тиск[8]	25	Atm	Черговий ПС
06.06.2023 17:57:19	Modify spontaneous value: (65 Atm)	Тиск[7]	65	Atm	Черговий ПС

At the bottom, there is a 'Comment' field and a 'Print' button.

Рисунок 5.9 – Екран «Хронологія» SCADA

Мною були створені 4 ліміти для рівнів ресиверів 0-20, 20-40, 40-60 та 60-80. При досягненні кожного з лімітів, показники тиску повинні змінювати колір, що додатково привертає увагу чергового персоналу та дає змогу відповідно відреагувати на недопустимі режими роботи. Окрім того, був створений скрипт, який вмикає компресор при досягненні першого ліміту, а вимикає при досягненні 3 ліміту. При досягненні 4 ліміту має відчинятися запобіжний клапан, який стравлює з ресиверів надлишкових тиск.

Створена SCADA система складається з трьох рівнів:

- Автоматизоване робоче місце (АРМ) з панеллю оператора та промисловим комп'ютером;
- Програмовані логічні контролери (ПЛК), що управляють пристроями та комутаторами;

- Датчики та виконавчі механізми.

Для реалізації SCADA системи та збору, обробки та керування інформацією з датчиків, що впливає на виконавчі механізми, були вибрані компоненти технічного забезпечення. Основні складові системи включають промисловий комп'ютер (ПК), програмовані логічні контролери, пристрої узгодження, а також мережеві та силові інтерфейси.

Оскільки на даному етапі для вивчення процесів управління вибрано три основних керуючих контури, архітектура цієї SCADA системи обмежується цими контурами.

Для побудови модульної системи та організації самостійної роботи кожного контуру були обрані відповідні засоби. Такий підхід спрощує технічне обслуговування, дозволяє швидко виявляти поломки та встановлює програмні зв'язки між контурами.

На високовольтних підстанціях найчастіше встановлено обладнання фірми SEL, оскільки воно спеціалізується на енергетичній інфраструктурі та вважається найбільш надійним в цій галузі.

Системи управління SCADA від SEL забезпечують підвищену надійність та продуктивність, спрощений доступ до корисних даних і розширені можливості управління енергосистемою.

В якості ПК використовуємо SEL-3350.



Рисунок 4.4 – Лицева сторона SEL-3350

- 1) Світлодіодні індикатори кнопки перевірки лампи;
- 2) Світлодіодні індикатори оперативного стану та сигналізації;
- 3) Світлодіодні індикатори мережі та стану каналу порта Ethernet;
- 4) Світлодіодні індикатори передачі та прийому послідовного порта;
- 5) Радіатор зпереду та відсутність вентиляторів або рухомих частин;
- 6) До чотирьох накопичувачів SSD з можливістю «гарячої» заміни;
- 7) Світлодіодні індикатори активності накопичувача;
- 8) Три програмованих двокольорових світлодіодних індикатори;
- 9) Два USB-порти 3.1 на передній панелі.

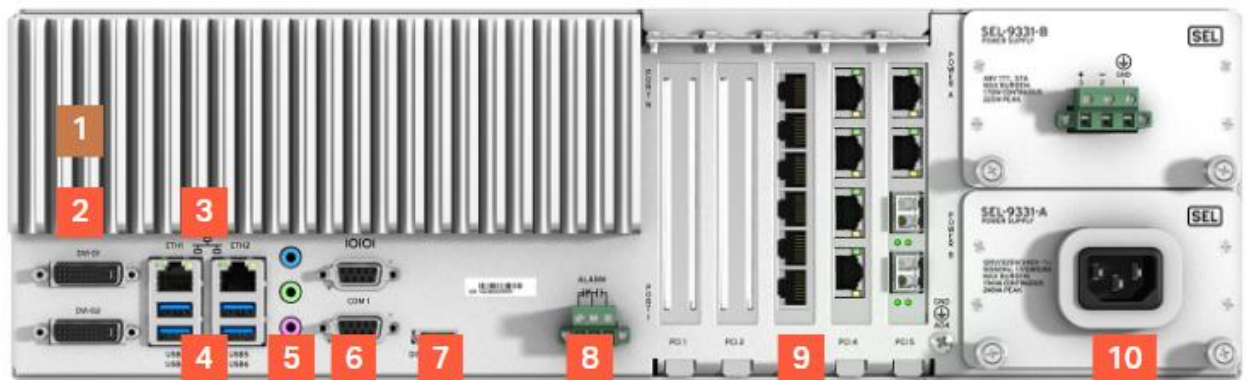


Рисунок 4.5 – Тильна сторона SEL-3350

- 1) Задній радіатор;
- 2) Два порти DVI-D;
- 3) Два високошвидкісних порти Gigabit Ethernet;
- 4) Чотири порти USB 3.1;
- 5) Порти лінійного входу/виходу та гнізда для мікрофона;
- 6) Два вбудованих конфігурованих порти EIA-232 в BIOS для подачі +5 В на Роз'єм 1;
- 7) Технологія під'єднання монітора DisplayPort;

- 8) Вихід контакта сигналізації, форма С
- 9) До п'яти слотів розширення: один PCI минулого покоління, два x1 PCI, та два x4 PCI;
- 10) Подвійні блоки живлення, які можна замінити під час роботи.

Контролер автоматизації реального часу (RTAC)

SEL-3555 є найпотужнішою моделлю RTAC, яка має багатоядерну обробку та параметри оперативної пам'яті, які можна налаштувати, здатні запускати декілька програм одночасно та відповідати найвибагливішим вимогам галузі. Додатковий інтегрований веб-інтерфейс користувача з портом локального дисплея усуває потребу в додатковому комп'ютері. Ця модель ідеально підходить для найвимогливіших програм, інтегрує до 256 пристроїв і підтримує до 100 000 точок даних.

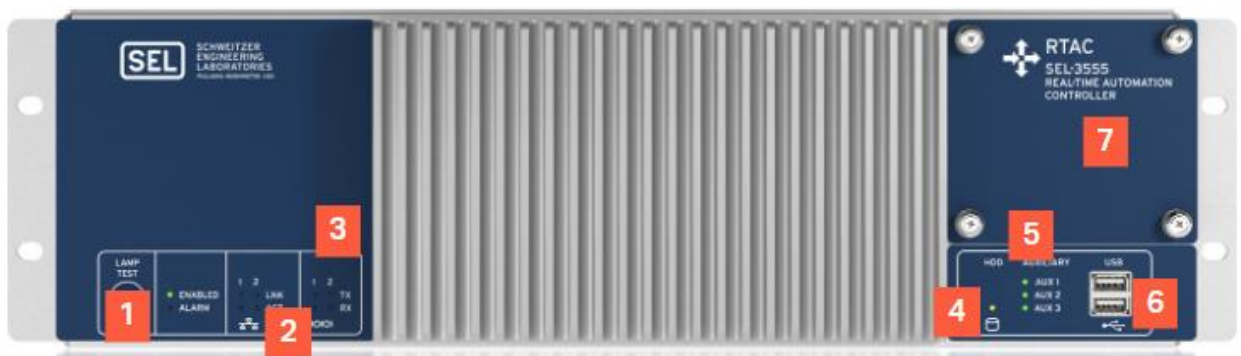


Рисунок 4.6 – Лицьова сторона SEL-3555

- 1) Кнопка перевірки лампи;
- 2) Світлодіоди активності Ethernet;
- 3) Світлодіоди активності послідовного порту;
- 4) Індикатор активності SSD;
- 5) Програмовані двоколірні світлодіоди;
- 6) 2 порти USB 3.1 на передній панелі;

7) SSD з ємністю до 480 ГБ.

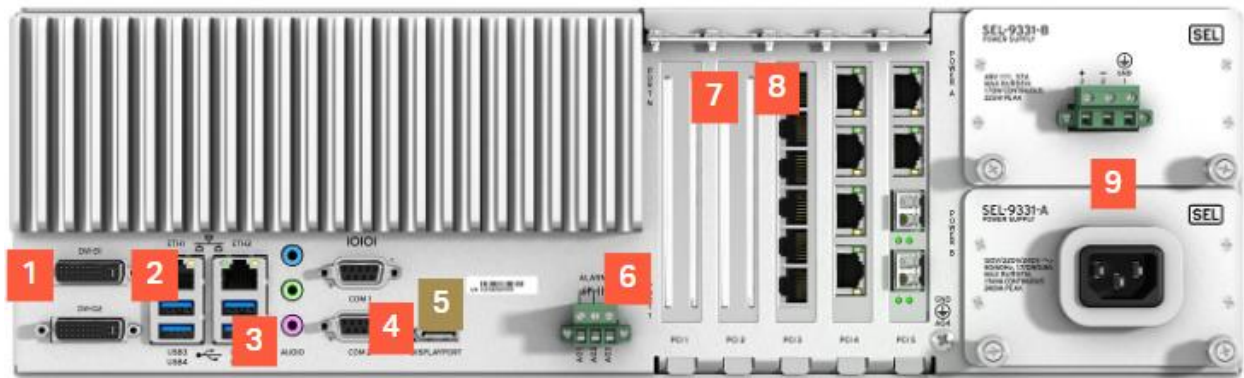


Рисунок 4.7 – Тильна сторона SEL-3555

- 1) Порти DVI-D;
- 2) 2 високошвидкісних порти Gigabit Ethernet;
- 3) 4 порти USB 3.1;
- 4) 2 вбудованих порти EIA-232;
- 5) DisplayPort;
- 6) Вихід тривоги Form C;
- 7) Слоти розширення PCIe;
- 8) 6 портів EIA-232/422/485.

Подвійні блоки живлення з можливістю гарячої заміни.

Отже, відповідно до завдання, були проведені розрахунки та вибір необхідного обладнання: поршневий компресор, частотний перетворювач, датчик тиску та апарати захисту. Сучасні досягнення в області силової електроніки дозволяють використовувати простий асинхронний електродвигун та компактний частотний перетворювач для створення повнофункціонального електроприводу. Ця конструкція має можливість використовувати функції енергозбереження, вбудований ПІД регулятор для керування тиском, різноманітні функції для

введення та виведення сигналів для автоматизації, що дозволяє компресорній установці високовольтної підстанції працювати надійно та ефективно.

ВИСНОВКИ

В результаті виконаної роботи було створено та оптимізовано систему автоматичного керування компресорною установкою високовольтної підстанції. Ця система була побудована з використанням регулювання асинхронного електроприводу з частотним керуванням. На основі вхідних значень тиску та витрат була розрахована потужність електродвигуна компресора, обраний відповідний тип двигуна та частотний перетворювач.

Була розроблена оптимальна система управління компресорною установкою за критерієм мінімізації енерговитрат через ПД регулювання тиску, базуючись на математичному описі об'єкта управління. Також, було використано цифрове моделювання в MatLab Simulink для аналізу динамічних режимів системи. Ці результати показали, що система забезпечує стабілізацію тиску повітря при зміні витрат.

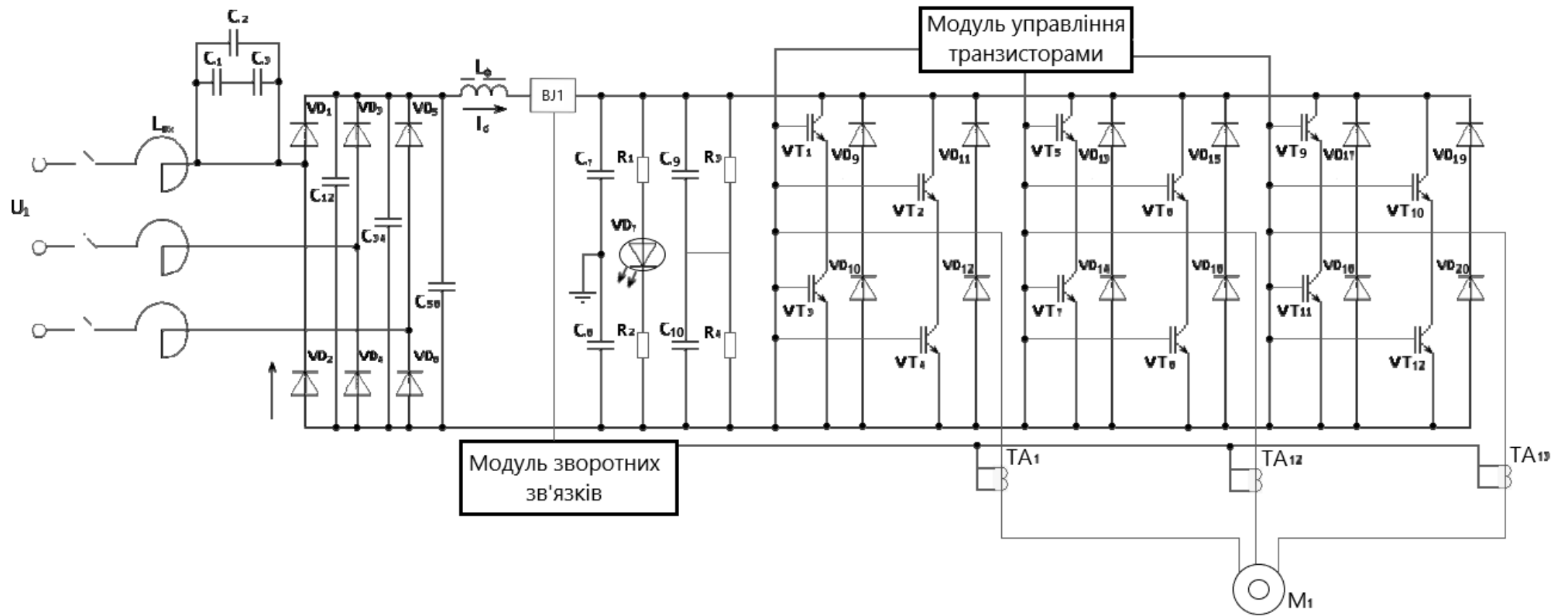
Технічна реалізація цієї системи базується на частотному перетворювачі FRECON FR500A-4T-045G/055P(B)-H. Також, запропонована реалізація системи керування параметрами компресорної установки та їх моніторинг за допомогою SCADA системи. Розроблена система управління компресорною установкою відповідає заявленим технічним характеристикам, забезпечуючи максимальний економічний ефект, і відповідає всім вимогам безпеки та якості в монтажі, експлуатації та обслуговуванні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

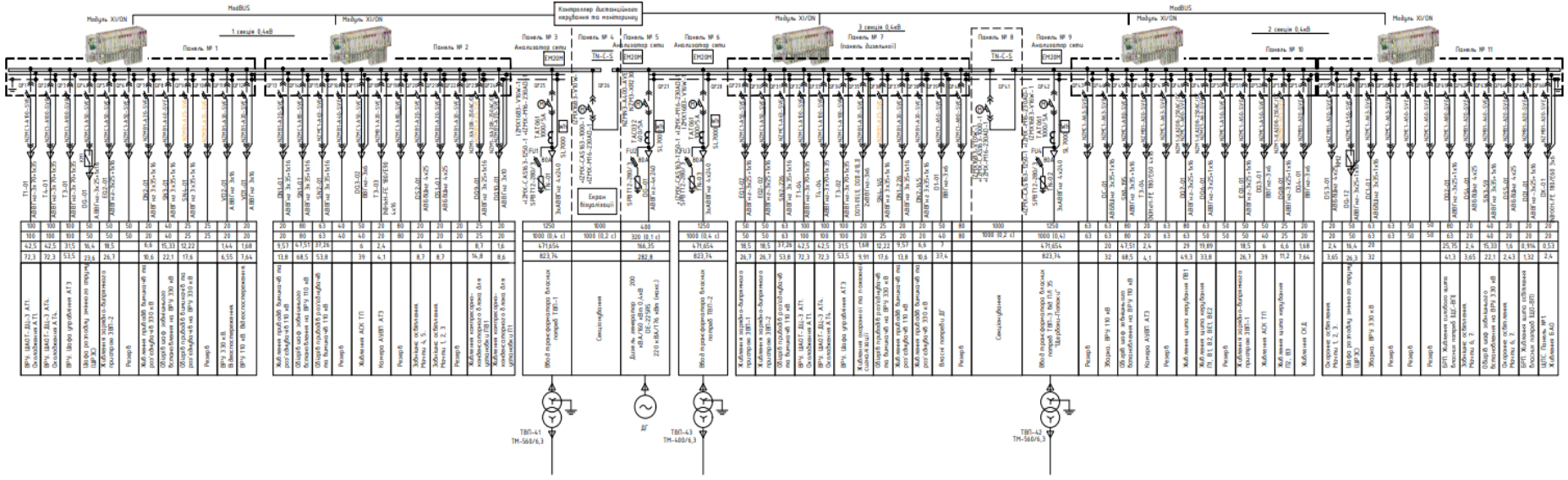
1. Г. А. Бондаренко, Г. В. Кирик КОМПРЕСОРНІ СТАНЦІЇ. Суми Сумський державний університет 2016
2. Р.О. Клімов, Компресори та компресорні станції. Кам'янське 2016
3. https://www.ni.biz.ua/15/15_9/15_91081_kompresorni-ustanovki-ta-rovitroprovodi.html - Основні характеристики компресорних установок.
4. П. О. Василега, Д. Муріков Електропривод робочих машин. Суми 2019
5. В. М. Гаряжа, А. О. Карюк, «ЕЛЕКТРИЧНА ЧАСТИНА СТАНЦІЙ ТА ПІДСТАНЦІЙ. Харків – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова – 2018
6. Оптимальні та адаптивні системи: конспект лекцій / викладач С. В. Соколов. – Суми: Сумський державний університет, 2012. – 166 с.
7. Перетворювач частоти з багатомоторною функцією керування. <https://privodok.com.ua/frecon-fr500a-4t-7.5g-011pb>
8. ЕЛЕКТРОПРИВОД Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів. Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського 2019
9. Установка компресорна. https://www.ukms.com.ua/good_view/kompressor-3vsh-16-346-m3/
10. Компресорна установка. <https://iren.sumy.ua/kompresorna-ustanovka-zvsh-16-3-46m3/>
11. Компресорна установка. <http://sumy.promportalua.com/goods/2371003/kompressor-tipa-3vsh1.htm>
12. Частотні перетворювачі FRECON FR500A. <https://aquatools.com.ua/preobrazovatel-chastoty-frecon-na-11-15-kvt-fr500a-4t-011g-015pb-h-vhodnoe-napryagienie-3-f-380v.html>

13. Датчики тиску САФІР. <https://manometr-kharkiv.com/product/datchik-nadlishkovogo-tisku-safir-serija-2hhh-acc/>
14. Воронов А.А. Основи теорії автоматичного керування. – М.: Енергія, 2006
15. ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК. Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського 2020
16. СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ КОМПЛЕКСАМИ. Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського 2022
17. Електродвигун 4АМ250S6. <https://xn--80addceesni0axzh6mb.xn--j1amh/katalog-elektrovdigatelej-4a-4am-5am-4amn/>
18. Високовольтна підстанція 330кВ. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/53619/2/Karpenko_magistr_drawings.pdf
19. Загальні принципи ПІД-регулятора. https://www.svaltera.ua/guide/glossary/pid_regulyator_obshchie_printsipy.php
20. SCADA-system <https://www.onlogic.com/company/io-hub/what-is-a-scada-system-and-how-does-it-work/>
21. SCADA-control <https://www.techtarget.com/whatis/definition/SCADA-supervisory-control-and-data-acquisition>
22. Compressors system <https://www.quincycompressor.com/resource/air-compressor-systems-the-basics/>
23. High-pressure systems <https://www.compressedairsystems.com/the-complete-guide-to-high-pressure-air-compressor-systems/>
24. Asynchronous motors <https://www.elprocus.com/what-is-an-asynchronous-motor-construction-its-working/>
25. А.С. Зимовець, С.В. Соколов «Система автоматичного керування компресорною установкою високовольтної підстанції 330кВ», Суми: СумДУ, 2023.

Додаток А Принципова схема силових ланцюгів перетворювача частоти



Додаток Б - Схема електропостачання компресорних установок



Панель по тип панелі
Марка позначка на тип рубильника
Марка позначка на тип автоматичного вимикача
Марка позначка на тип реле
Кодифікований профілювання стрижня
Марка, тип на марку силового кабелю
Потенціальні струни вимикача А
Потенціальні струни роз'єднувача А
Потенціальні струни вимикача В
Сигнальні кабелі вимикача А
Найменування сигналізації

Додаток В - Функціональна схема пневматичної мережі підстанції

