

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Підхід до оцінки ефективності роботи електромеханічної системи виробництва стиснутого повітря»

Виконав: студент 4 курсу, гр. ЕМСА-216
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Сухляка Я.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доцент каф. КЕСМК

Мошноріз М.М.
(прізвище та ініціали)

« 20 » травня 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доцент каф. КЕСМК

Мошноріз М.М.
(прізвище та ініціали)

« 10 » червня 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри КЕСМК

к.т.н., проф. Мошноріз М.М.

(прізвище та ініціали)

« 3 » червня 2025 р.

Вінниця – 2025 року

Вінницький національний технічний університет

Факультет Електроенергетики та електромеханіки

Кафедра Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КЕМСК

к.т.н., доц. Микола МОШНОРІЗ

“18” лютого 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сухляку Ярославу Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підхід до оцінки ефективності роботи електромеханічної системи виробництва стиснутого повітря керівник роботи Мошноріз Микола Миколайович, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від “20” березня 2025 року №97
2. Термін подання студентом роботи “03” червня 2025 року
3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Енергоефективні електромеханічні системи компресорів. Класифікація, аналіз, та методи регулювання продуктивності. Розробка функціональної схеми, розрахунок і вибір елементів. Розрахунок регуляторів, контурів струму та швидкості. Математичне моделювання електромеханічної системи компресора. Підхід до оцінки ефективності роботи електромеханічної системи виробництва стиснутого повітря. Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності впровадження частотного перетворювача. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Функціональна схема. Схема моделювання. Модернізована схема моделювання.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Мошноріз М.М., к.т.н., доц., каф. КЕСМК	18.02.2025	06.05
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кобилянський О.В., д.пед.н., проф., каф. БЖДПБ	18.02.2025	06.05

7. Дата видачі завдання 18.02.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	18.02.2025	вир
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	06.05.2025	вир
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	20.05.2025	вир
4	Виконання розділу «Охорона праці»	20.05.2025	вир
5	Попередній захист БКР	03.06.2025	вир
6	Нормоконтроль БКР	03.06.2025	вир
7	Рецензування БКР	10.06.2025	вир
8	Захист БКР	19.06.2025	вир

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Здобувач освіти

(підпис)

Сухляк Я.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Мошноріз М.М.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Сухляк Ярослав Анатолійович. Підхід до оцінки ефективності роботи електромеханічної системи виробництва стиснутого повітря. Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 108 с. Бібл.:51. Іл.:45. Табл.:34.

В бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто питання щодо підвищення ефективності роботи компресора. Робота присвячена дослідженню енергоефективних електромеханічних систем компресорів, що використовуються для виробництва стиснутого повітря. Основним завданням є розробка методів оцінки і підвищення ефективності роботи таких систем, зокрема за допомогою частотного регулювання швидкості обертання двигуна компресора.

У роботі проведено аналіз сучасних технологій керування компресорами, включаючи класифікацію електромеханічних систем, математичне моделювання процесів виробництва стиснутого повітря та оцінку економічної ефективності запропонованого підходу. Застосовано програмне забезпечення MATLAB/Simulink для побудови математичної моделі системи та проведення чисельних експериментів.

Основні результати: Розроблено функціональну схему електромеханічної системи компресора з використанням частотного перетворювача. Проведено математичне моделювання процесів виробництва стиснутого повітря, яке дозволило оцінити можливості підвищення ефективності системи.

Ключові слова: Електромеханічна система. Компресор. Частотне регулювання. Моделювання. Економічна ефективність.

ABSTRACT

Sukhlyak Yaroslav Anatolyovich. Approach to assessing the efficiency of the electromechanical system for the production of compressed air. Bachelor's qualification work. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 108 p. Bibliography: 51. Ill.: 45. Table: 34.

The bachelor's qualification work addresses issues related to improving the efficiency of compressor operation. The study is devoted to investigating energy-efficient electromechanical systems used in compressed air production. The primary objective is to develop methods for assessing and enhancing the efficiency of such systems, particularly through frequency control of the compressor motor speed.

The work includes an analysis of modern compressor control technologies, classification of electromechanical systems, mathematical modeling of compressed air generation processes, and an evaluation of the economic efficiency of the proposed approach. The MATLAB/Simulink software package was applied to construct a mathematical model of the system and conduct numerical experiments.

Key results: A functional diagram of the electromechanical system with a frequency converter has been developed. Mathematical modeling of compressed air production processes was carried out, enabling an assessment of potential efficiency improvements.

Keywords: Electromechanical system; Compressor; Frequency control; Modeling; Economic efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ЕНЕГООЕФЕКТИВНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ КОМПРЕСОРІВ: КЛАСИФІКАЦІЯ, АНАЛІЗ, ТА МЕТОДИ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ	12
1.1 Класифікація компресорів та їх електроприводів	12
1.1.1 Класифікація компресорів	12
1.1.2 Класифікація за типом електродвигуна	19
1.1.3 Приклади поєднання компресорів і електроприводів для різних застосувань	23
1.1.4 Сучасні тенденції в розвитку компресорних технологій і їх електроприводів	25
1.2 Основні проблеми енергоефективності компресорів виробництва	на 26
1.2.1 Методи вирішення проблем енергоефективності	27
1.3 Основні компоненти схеми електроприводу компресора	28
1.4 Приклади виконання схем електроприводу компресорних установок	29
2 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ, РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ	34
2.1 Розробка функціональної схеми	34
2.2 Розрахунок і підбір усіх елементів для функціональної схеми	36
2.2.1 Розрахунок параметрів електричного двигуна	38
2.2.2 Розрахунок параметрів і вибір частотного перетворювача	40
2.2.3 Розрахунок і вибір лічильника електроенергії	42
2.2.4 Розрахунок і вибір редуктора	45

	7
2.2.5 Розрахунок і вибір сенсорів продуктивності	46
2.2.6 Розрахунок і вибір сенсорів тиску	47
2.2.7 Вибір сенсору швидкості електричного двигуна	48
2.2.8 Розрахунок і вибір системи керування	49
3 РОЗРАХУНОК РЕГУЛЯТОРІВ, КОНТУРІВ СТРУМУ ТА ШВИДКОСТІ	52
3.1 Передавальна функція для контуру струму	53
3.2 Передавальна функція для контуру швидкості	55
4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНО СИСТЕМИ КОМПРЕСОРА	58
4.1 Розробка аналізу і контролю енергоефективності електромеханічної системи компресора	68
5 ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВИРОБНИЦТВАСТИ СТИСНУТОГО ПОВІТРЯ	72
5.1 Розробка структурної схеми і алгоритму моніторингу	72
5.2 Пояснення структури схеми на основі розділення на пронумеровані кольорові частини	74
5.3 Розробка алгоритму і модернізація електромеханічної схеми	76
6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА	88
6.1 Обґрунтування вибору частотного перетворювача, аналіз енергетичних режимів роботи	88
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	99
7.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта	99

	8
7.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць	99
7.1.2 Електробезпека	102
7.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	103
7.2.1 Мікроклімат	103
7.2.2 Виробниче освітлення	104
7.2.3 Виробничий шум	105
7.2.4 Виробнича вібрація	106
7.3 Пожежна безпека	107
ВИСНОВКИ	110
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	114
Додаток А Технічне завдання	120
Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи	124

ВСТУП

Актуальність теми: Підвищення ефективності функціонування електромеханічних систем компресорних установок є надзвичайно актуальною темою в умовах енергетичної політики. України та світового промислового виробництва. Про актуальність цього дослідження свідчать такі фактори:

В індустрії компресорні пристрої належать до найбільш енергозатратних користувачів електроенергії. Приблизно від 10 до 30% загального електроспоживання промислових підприємств припадає на виробництво стисненого повітря згідно зі статистичними даними. Ефективність традиційних компресорних систем у більшості випадків становить 50-60%, утворюючи тим самим значний потенціал для економії енергоресурсів.

Оптимізація енергоспоживання стає важливим чинником для конкурентоспроможності підприємств в умовах безперервного зростання тарифів на електроенергію, а також загострення конкуренції на внутрішніх і зовнішніх ринках. Відчутна економія коштів та зменшення собівартості продукції цілком можливі навіть за умови зниження енергоспоживання компресорних систем на 10-15%.

Зменшення використання енергії промисловим обладнанням прямо допомагає зменшити екологічний вплив на навколишнє середовище, згідно з міжнародними обов'язками. України щодо зменшення викидів парникових газів та реалізації принципів сталого розвитку. При генеруванні електроенергії оптимізація у роботі компресорних систем веде до зменшення викидів CO₂.

Стрімкий розвиток у сфері мікропроцесорної техніки, силової електроніки, а також технологій автоматизації відкриває нові можливості для збільшення ефективності електромеханічних систем. Підходи до енергоменеджменту компресорних станцій принципово змінюються внаслідок впровадження сучасних систем керування з використанням частотно-

регульованих приводів, інтелектуальних алгоритмів керування й комплексного моніторингу.

Переваги використання:

Модернізація систем управління комп'ютерними установками підвищуватиме енергоефективність, збільшить експлуатаційний ресурс обладнання, скоротить експлуатаційні витрати, покращить надійність експлуатації та зменшить частоту надзвичайних ситуацій. Крім того, сучасні системи управління дозволять точно керувати параметрами стислого повітря багато точково для деяких технологічних процесів.

Норми та стандарти:

У контексті інтеграції України до європейського енергетичного простору реалізація стандартів енергоефективності та відповідність обладнання директивам ЄС щодо енергоспоживання (зокрема, директиви про еко дизайн 2009/125/ЕС) є необхідною умовою для виходу українських виробників на міжнародні ринки.

Цифрове перетворення промисловості.

Концепція Четвертою промисловою революцією передбачає впровадження інтелектуальних систем управління, що інтегруються в єдину інформаційну мережу підприємства. Модернізація електромеханічних систем компресорів за допомогою цифрових технологій є важливим кроком до створення інтелектуального виробництва.

Проблеми існуючих систем:

Більшість використовуваних в Україні комп'ютерних станцій оснащені застарілими системами керування, які не забезпечують оптимальних режимів роботи в умовах змінного навантаження. Традиційні методи регулювання продуктивності (дроселювання, періодичне включення/вимикання) мають низьку енергоефективність, що призводить до надмірних витрат електроенергії.

Можливості енергоефективності:

Дослідження показують, що впровадження сучасних систем управління на основі частотно-регульованого приводу може забезпечити економію електроенергії до 30–40% в порівнянні з традиційними системами.

Мета дослідження:

Метою дипломної роботи є: Підвищення надійності роботи системи виробництва стиснутого повітря за рахунок вчасного виявлення несправностей у роботі пневматичної системи.

Завдання дослідження:

Енергоефективні електромеханічні системи компресорів. Класифікація, аналіз, та методи регулювання продуктивності. Розробка функціональної схеми, розрахунок і вибір елементів. Розрахунок регуляторів, контурів струму та швидкості. Математичне моделювання електромеханічної системи компресора. Підхід до оцінки ефективності роботи електромеханічної системи виробництва стиснутого повітря. Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності впровадження частотного перетворювача. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Об'єкт дослідження: процес передачі корисної роботи від електромеханічної частини компресорної установки до кінцевого споживача.

Предмет дослідження: математичний апарат та комп'ютерна модель для імітації роботи системи виробництва та транспортування стиснутого повітря.

Методи наукових досліджень

- Теорія проведення електрики та автоматичного керування.
- Математичне моделювання та обчислювальні експерименти.
- Методи вдосконалення та визначення параметрів.
- Створення імітаційних моделей в спеціалізованих програмних середовищах.
- Покращення математичною моделі електромеханічною системи комп'ютера.

1 ЕНЕГОЕФЕКТИВНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ КОМПРЕСОРІВ: КЛАСИФІКАЦІЯ, АНАЛІЗ, ТА МЕТОДИ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ

1.1 Класифікація компресорів та їх електроприводів

Нижче наведені пункти будуть описані детально для повного розуміння що таке компресор і як він класифікується.

1.1.1 Класифікація компресорів

Компресор (англ. compressor, нім. Kompressor m, Verdichter m) — машина для стискування повітря або іншого газу до надлишкового тиску не нижче 0,2 МПа, компресії і переміщення газів під тиском [1].



Рисунок 1.1 – Вигляд компресора 2-х поршневий

- Класифікація компресорів за принципом роботи (обсягові та динамічні), з докладним описом кожного підтипу.
- Розподіл комп'ютерів за рівнем тиску та продуктивністю.
- Класифікація з урахуванням типу оточуючого середовища та рівня мобільності.

- Детальний опис різних електроприводів, які використовуються в комп'ютерних установках.
- Різноманітні комбінації компресорів і електроприводів застосовуються в різних галузях.
- Останні тенденції в розвитку комп'ютерних технологій.

Теорія компресорних машин, яка має практично прийнятну точність, ґрунтується на термодинаміці ідеального газу. Наприклад, розрахунок повітряних компресорів на тиск до 10 МПа по рівняннях ідеального газу дає похибку близько 2 % [2].

За принципом дії.

1. Компресори великого обсягу стискають газ шляхом зменшення об'єму робочою камери. Вони відрізняються високою ефективністю та можливістю створення значного тиску навіть при невеликих витратах газу.

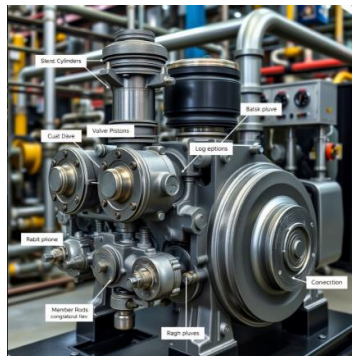


Рисунок 1.2 – Вигляд об'ємного компресора

Компресори з поршневим механізмом працюють за рахунок стиснення газу у циліндрах за допомогою зворотно-поступального руху поршня. Цей вид компресорів мають довгу історію розвитку і є одним з найбільш надійних типів на ринку сьогодення. Вони можуть створювати великий тиск (до 1000 бар і більше) та працювати з різноманітними газами, включаючи агресивне середовище.

Поршневі компресори, що стискають повітря від 0.5 до 100 МПа і продуктивністю до 1.7 м³ /с (100 м³ /хв), раціонально застосовувати на

компресорних станціях продуктивністю до 8.33 м³ /с (500 м³ /хв) [2]. У приводних компресорах зворотно-поступальний рух поршня здійснюється через кривошипно-шатунний механізм, що складається з колінчастого валу з кривошипом і шківом або маховиком, шатуна і в деяких конструкціях також з крейцкопфа (повзуна) і штока. Колінчастий вал виготовляється з високоякісної сталі. Шатун є ланкою, що пов'язує колінчастий вал з повзуном, штоком і поршнем. Він служить для перетворення обертального руху колінчастого валу на зворотно-поступальний рух поршня. Поступально-коливальний рух шатуна відбувається в площині перпендикулярній до осі валу [2].



Рисунок 1.3 – Вигляд поршневого компресора

Конструкція поршневих компресорів може бути:

- Одноступенева або багатоступенева.
- З одним або кількома циліндрами.
- З вертикальним, горизонтальним або V-подібним розташуванням циліндрів.
- З повітряним або водяним охолодженням.

3. Ротаційні компресори. Ротаційні компресори використовують ротор, що обертається в корпусі. До них належать:

- Пластинчасті компресори - це компресори з обладнанням у вигляді пластинок, вставлених у жолоб ротора, які при обертанні натискаються до стінок циліндра відцентровою силою, що створюють замкнуті об'єми.



Рисунок 1.4 – Вигляд пластинчатого компресора

- Гвинтові компресори використовують два гвинтоподібні ротори, які обертаються назустріч один одному і забезпечують рівномірне стискання без пульсацій.



Рисунок 1.5 – Вигляд гвинтового компресора

- Спиральні компресори працюють за допомогою двох спіралей: одна з них нерухома і інша обертається створюючи камери змінного об'єму.



Рисунок 1.6 – Вигляд Спирального компресора

4. Мембранні (діафрагмові) компресори використовують гнучку діафрагму для стискання газу шляхом їх коливання. Особливістю є

герметичність робочою камери, що робить їх незамінними для операцій з отруйними, вибухонебезпечними або особливо чистими газами. Широке застосування знаходять у медичній, фармацевтичній та хімічній промисловості.



Рисунок 1.7 – Вигляд мембранного компресора

5. Динамічні турбокомпресори підвищують тиск газу за рахунок передачі кінетичною енергією від робочого колеса до газу і його наступного перетворення в потенціальну енергію тиску.



Рисунок 1.8 – Вигляд динамічного компресора

6. Відцентрові компресори працюють за допомогою припливу газу через вхідний патрубок до центру робочого колеса, де від відцентрової сили переміщуватися до його периферії.



Рисунок 1.9 – Вигляд відцентрових компресорів

Вони характеризуються:

- Високою продуктивністю (до 1 000 000 м³/год).
- Середнім рівнем створюваного тиску (до 35 бар в одноступінчастому виконанні).
- Рівномірністю подачі газу без пульсацій.
- Відсутністю потреби в мастилі у газовому тракті.
- Компактністю і низьким рівнем вібрації.

7. Осьові компресори. В осьових компресорах газ рухається вздовж осі машини, проходячи через ряд нерухомих і рухомих лопаток.



Рисунок 1.10 – Вигляд осьового компресора

Ці компресори характеризуються:

- Найвищою продуктивністю серед всіх типів компресорів.

- Порівняно низьким ступенем підвищення тиску на одиницю ступеня.
- Високим ККД при великих витратах.
- Складністю конструкції та високою точністю виготовлення.

8. Струминні компресори працюють за рахунок енергії робочого потоку, який передають енергію газу при зіткненні з ним. Вони не мають рухомих частин, що визначає їх виняткову надійність. Проте вони мають низький коефіцієнт (ККД), що обмежує їх застосування у специфічних умовах.

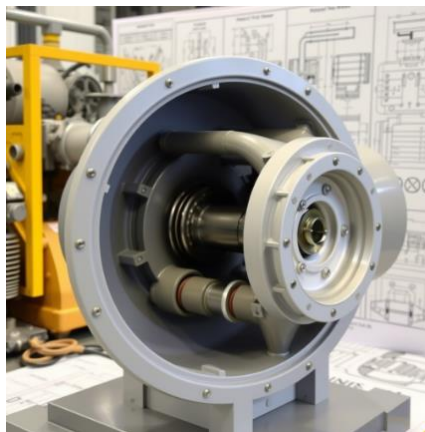


Рисунок 1.11 – Вигляд струмного компресора

Вентилятори - до 1,15 бар. Забезпечують невелике підвищення тиску і використовуються для подачі великих об'ємів повітря на невеликі відстані. Широко застосовуються в системах вентиляції, кондиціонування, охолодження обладнання, сушильних установках.

Повітродувки - 1,15-3 бар. Проміжна ланка між вентиляторами і компресорами. Використовуються в системах аерації очисних споруд, пневмотранспорті, для подачі повітря в топку котлів.

Компресори низького тиску - 3-10 бар. Найпоширеніший тип компресорів у промисловості. Застосовуються для живлення пневматичних інструментів, систем автоматики, фарбування розпиленням.

Компресори середнього тиску - 10-100 бар. Використовуються для заправки балонів, у хімічній промисловості, при виробництві поліетилену, стисненні природного газу.

Компресори високого тиску - понад 100 бар. Застосовуються для спеціальних технологічних процесів, наприклад, для виробництва синтетичних алмазів, заправки балонів для дайвінгу, у процесах гідрокрекінгу нафти.

За продуктивністю

- Малої продуктивності - до 10 м³/хв.
- Середньої продуктивності - 10-100 м³/хв.
- Великої продуктивності - понад 100 м³/хв.

За типом стисканого середовища.

Повітряні компресори - найпоширеніший тип, використовуються практично у всіх галузях промисловості. Газові компресори - для стиснення різних технічних газів (метану, етилену, аміаку, хлору тощо). Холодильні компресори - для стиснення холодоагентів у системах охолодження. Turbo компресори - для надшвидкісного стиснення газів у турбінах та авіаційних двигунах.

За мобільністю.

Стаціонарні - встановлюються на постійному місці, мають фундамент.

Пересувні - монтуються на шасі, причепах або платформах.

Портативні - малогабаритні установки, які можна переносити вручну.

1.1.2 Класифікація за типом електродвигуна

Асинхронні електродвигуни є найпоширенішим типом привода для компресорних установок завдяки своїй надійності, простоті конструкції та невисокій вартості. Вони поділяються на:

З короткозамкненим ротором. Відрізняються простотою конструкції, відсутністю ковзаючих контактів, високою надійністю і низькими експлуатаційними витратами. Однак мають відносно великий пусковий струм

(5-7 разів більший за номінальний) і обмежені можливості регулювання швидкості без спеціальних пристроїв [4].



Рисунок 1.12 – Вигляд асинхронного двигуна

З фазним ротором. Мають на роторі обмотку, виведену через контактні кільця і щітковий апарат. Це дозволяє включати в коло ротора додатковий опір, що забезпечує плавний пуск і регулювання швидкості. Недоліками є складніша конструкція, наявність щіток, що вимагають обслуговування, і більші втрати енергії.

Синхронні електродвигуни характеризуються постійною швидкістю обертання незалежно від навантаження і здатністю працювати з високим коефіцієнтом потужності. Вони поділяються на:

З електромагнітним збудженням. Мають обмотку збудження на роторі, яка живиться постійним струмом. Це дозволяє регулювати коефіцієнт потужності двигуна і навіть працювати в режимі компенсатора реактивної потужності. Завдяки високому ККД (до 98%) доцільні для приводу компресорів великої потужності при тривалій роботі з постійним навантаженням [5].

З постійними магнітами. Замість обмотки збудження використовують постійні магніти. Це спрощує конструкцію, підвищує надійність і ККД. Такі двигуни мають менші габарити при тій самій потужності, але їх вартість вища через використання дорогих магнітних матеріалів.

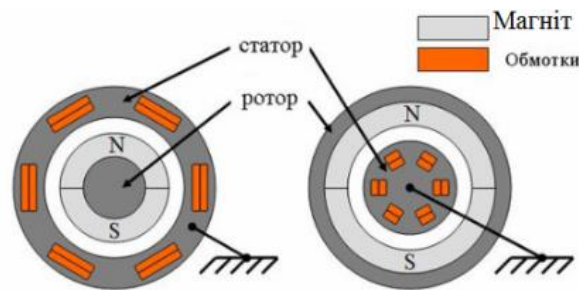


Рисунок 1.13 – Вигляд синхронного двигуна з постійними магнітами

Двигуни постійного струму.

Незважаючи на поширення частотних перетворювачів, двигуни постійного струму все ще використовуються для приводу компресорів, особливо там, де потрібне плавне і точне регулювання швидкості в широкому діапазоні.



Рисунок 1.14 – Вигляд двигуна постійного струму

З незалежним збудженням. Обмотка збудження живиться від окремого джерела постійного струму. Це забезпечує широкий діапазон регулювання швидкості і високу жорсткість механічних характеристик.

З послідовним збудженням. Обмотка збудження з'єднана послідовно з якірною обмоткою. Характеризуються високим пусковим моментом, але нестабільною швидкістю при зміні навантаження.

Зі змішаним збудженням. Поєднують переваги попередніх типів завдяки наявності і послідовної, і паралельної обмоток збудження.

Нерегульовані електроприводи.

Працюють з постійною швидкістю обертання. Регулювання продуктивності компресора здійснюється іншими способами:

- Дроселюванням на вході або виході.
- Зміною числа працюючих циліндрів.
- Байпасуванням (перепуском частини стиснутого газу).
- Періодичним вмиканням і вимиканням компресора.

Регульовані електроприводи.

З частотним перетворювачем. Найсучасніший і енергоефективний спосіб регулювання швидкості асинхронних і синхронних двигунів. Частотні перетворювачі змінюють частоту і амплітуду напруги живлення, що дозволяє плавно регулювати швидкість у широкому діапазоні [6].



Рисунок 1.15 – Вигляд однофазного частотного перетворювача

Забезпечують:

- Економію електроенергії до 30-50%.
- Плавний пуск без пускових струмів.
- Точне підтримання заданих параметрів.
- Захист від перевантажень і аварійних режимів.
- Можливість інтеграції в автоматизовані системи управління.

З тиристорними перетворювачами. Використовуються переважно для двигунів постійного струму. Змінюють напругу на якорі або в колі збудження, забезпечуючи регулювання швидкості. Мають високу надійність, але створюють гармонічні спотворення в мережі живлення.

З реостатним регулюванням. Застосовується для двигунів з фазним ротором. У коло ротора включаються додаткові опори, що дозволяє змінювати швидкість. Метод простий, але неекономічний через великі втрати енергії в реостатах.

За потужністю:

- Малої потужності - до 10 кВт.
- Середньої потужності - 10-100 кВт.
- Великої потужності - понад 100 кВт.
- Особливо великої потужності - понад 1 МВт.

За конструктивним виконанням:

- Загальнопромислові - для нормальних умов експлуатації.
- Вибухозахищені - для роботи у вибухонебезпечних середовищах.
- Морського виконання - для роботи на суднах і морських платформах.
- Тропічного виконання - з підвищеним захистом від вологи і грибка.
- Високотемпературні - для роботи при підвищених температурах.

1.1.3 Приклади поєднання компресорів і електроприводів для різних застосувань

Нафтогазова промисловість.

У цій галузі часто використовуються відцентрові та гвинтові компресори великої потужності для перекачування природного газу. Вони комплектуються синхронними електродвигунами потужністю до десятків мегават. Для регулювання продуктивності застосовуються частотні перетворювачі високої потужності, що дозволяють змінювати частоту обертання в залежності від обсягів газу і необхідного тиску.

Холодильна техніка.

У промислових холодильних установках широко використовуються гвинтові і поршневі компресори з асинхронними електродвигунами середньої потужності. Сучасні установки обладнуються частотно-регульованими

приводами, що дозволяють плавно змінювати холодопродуктивність і підтримувати оптимальний температурний режим при мінімальному енергоспоживанні.



Рисунок 1.16 – Вигляд холодильної техніки для побуту

Малі промислові підприємства.

На невеликих виробництвах зазвичай встановлюють поршневі або гвинтові компресори малої і середньої потужності з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором. Регулювання продуктивності здійснюється як простим вмиканням/вимиканням, так і за допомогою частотних перетворювачів для більш енергоефективної роботи.

Транспортні засоби.

У автомобільних кондиціонерах використовуються поршневі і ротаційні компресори малої потужності з електроприводами постійного струму або асинхронними двигунами, які живляться від інверторів. Швидкість обертання компресора регулюється в залежності від температури в салоні і теплового навантаження.

1.1.4 Сучасні тенденції в розвитку компресорних технологій і їх електроприводів

Енергоефективність.

Сучасний розвиток компресорної техніки спрямований насамперед на підвищення енергоефективності. Це досягається шляхом:

- Вдосконалення аеродинаміки проточної частини.
- Застосування сучасних матеріалів з покращеними характеристиками.
- Впровадження електродвигунів класу енергоефективності IE4 та IE5.
- Повсюдного використання частотно-регульованого приводу з оптимізованими алгоритмами керування [7].

Цифровізація та автоматизація.

Сучасні компресорні установки оснащуються розвиненими системами контролю і управління, які забезпечують:

- Автоматичне підтримання заданих параметрів роботи.
- Діагностику стану обладнання в реальному часі.
- Прогнозування відмов на основі аналізу даних.
- Інтеграцію в загальнозаводські системи управління.
- Дистанційний моніторинг і керування через інтернет.

Екологічність.

Зростаючі вимоги до захисту навколишнього середовища спонукають виробників компресорного обладнання:

- Знижувати рівень шуму і вібрації.
- Мінімізувати витоки газу через ущільнення.
- Використовувати безмасляні технології стиснення для чистих виробництв.
- Розробляти компресори для роботи з екологічними холодоагентами.

- Впроваджувати системи рекуперації тепла, що виділяється при стисканні газу.

Сучасні компресорні установки розвиваються у напрямку мініатюризації з використанням високошвидкісних компресорів до 100 000 об/хв і електродвигунів з постійними магнітами високою питомою потужністю. Енергетичні показники включають коефіцієнт корисної дії, споживану потужність, теплові втрати, продуктивність, тиск на виході та споживання енергії на одиницю продукції, які залежать від конструкції компресора, умов експлуатації та технічного стану обладнання.

Аналіз проводиться через моніторинг в реальному часі, аудит енергоспоживання та комп'ютерне моделювання для оптимізації роботи. Регулювання продуктивності здійснюються механічними методами через зміну частоти обертання або використання клапанів, гідравлічними шляхом зміни обсягу робочої камери термодинамічними шляхом регулювання температури та електронним шляхом автоматизованими системами управління. Комбіновані методи забезпечують максимальну гнучкість регулювання, і вибір конкретного підходу залежить від специфіки виробництва та вимог до енергоефективності [8].

1.2 Основні проблеми енергоефективності компресорів на виробництві

Невідповідність продуктивності потребам виробництва. Багато компресорів працюють на повну потужність навіть у разі зменшеного споживання стисненого повітря може призвести до надмірного використання енергії.

Застарілі методи регулювання продуктивності.

Використання неефективних способів керування (наприклад, дроселювання або періодичне включення/вимикання) може спричиняти втрату енергію і збільшене зношування техніки.

Високе енергоспоживання через застаріле обладнання. Старі моделі компресорів і електроприводів мають низький ККД і не відповідають сучасним стандартам енергоефективності.

Недостатня автоматизація та контроль. Відсутність систем моніторингу й управління не може швидко реагувати на зміни у технологічному процесі, що призводить до неоптимальної ефективності роботи.

Погане технічне обслуговування: забруднені фільтри та зношені клапани, недостатня система охолодження призводить до втрат і підвищування енергоспоживання.

Витоки в системі стисненого повітря. Несприйнятні витоки у трубопроводах призводять до перевантаження компресора та зайвого використання електроенергії.

1.2.1 Методи вирішення проблем енергоефективності

Встановлення приводу зі змінною частотою (ЧРП). Це дозволяють точно налаштовувати продуктивність компресора під реальні потреби, що дозволяють скорочувати споживання електроенергії на 30–40 %.

Модернізація системи управління. Впровадження сучасних контролерів і автоматизованих систем керування для оптимізації роботи компресора. Заміна застарілих моделей компресорів на енергоефективні варіанти. Використання сучасних гвинтових або центрифугальних компресорів з високим коефіцієнтом корисної дії (ККД).

Регулярне технічне обслуговування. Прочистка фільтру, заміна старих деталей, перевірка стану охолодження системи — все це сприяє підтримці високого допомагає утримувати високий рівень ефективності. Пошук та усунення витоків стиснутого повітря [9].

Проведення регулярних оглядів трубопроводу за допомогою ультразвукових детекторів. Оптимізації графика живлені.

Установка стабілізаторів напруги та компенсація реактивною потужністю дозволяють забезпечити надійне і ефективне функціонування електричних двигунів.

1.3 Основні компоненти схеми електроприводу компресора

1. Електродвигун: На станціях компресорних часто використовуються потужні асинхронні або синхронні трифазні двигуни. Двигун забезпечує механічну енергію для приводу компресора, який може бути поршневим, вітровим або центробіжним.

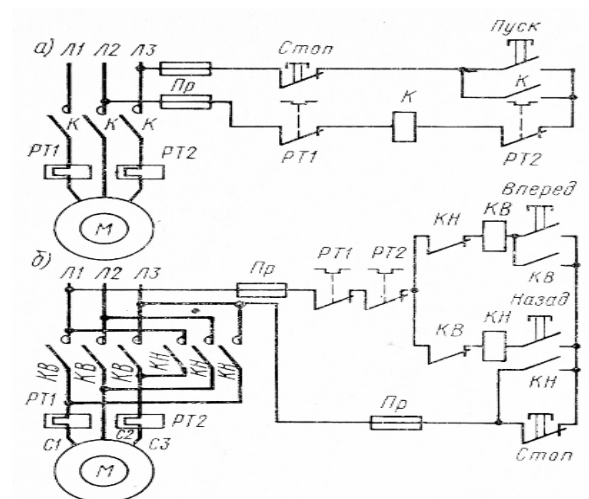


Рисунок 1.17 – Принципова електрична схема компресора

2. Пускове устаткування: Частотний перетворювач (VFD): Використовується для плавного пуску та регулювання швидкості двигуна, що допомагає зменшити навантаження на мережу і підвищити ефективність. Пускач (контактор): Забезпечує підключення двигуна до мережі. Тепловий реле: Захищає двигун від перевантажень. Автоматичний вимикач: Захищає від коротких замикань і перевантажень [10].

3. Система управління: Програмований логічний контролер (ПЛК): Відповідають за роботу комп'ютерною станцією і забезпечують автоматизацію процесів. Датчики тиску, температури, витрати: Обробляють робочі

параметри і передають дані до системи управління. Реле тиску: Вимикають комп'ютер при досягненні максимального або мінімального тиску.

4. Система передачі потужності (трансформатор) забезпечуватиме необхідний рівень напруги для роботи двигуна та інших елементів системи, а кабелі та дроти будуть постачати електроенергію до двигуна та інших компонентів.

5. Захисні пристрої: Заземлення: Забезпечує безпеку роботи системи. Плавкі запобіжники: Захищають від перевантажень і коротких замикань.

Додаткові компоненти: Система охолодження може використовувати повітряну або водяну систему для виведення тепла під час роботи. Фільтри та сепаратори очищують стиснене повітря від вологи, масла та інших домішок. Ресивер використовуваний для загладження пульсацій тиску і збереження стиснутого повітря. Система підготовки повітря включає додаткові фільтри, регулятори тиску для забезпечення якості стисненого повітря.

Принцип роботи:

1. Пуск: Система управління запускає пуск двигуна через частотний перетворювач, що забезпечує поступовий розгін.

2. Робота: Компресор стискає повітря або газ, а система управління корегує роботу в залежності від інформації, отриманої від сенсорів.

3. Зупинка: При досягненні заданого значення тиску або за знаком оператора система управління зупиняє електродвигун.

1.4 Приклади виконання схем електроприводу компресорних установок

Установка має два компресори, які запускаються на обертання в асинхронному режимі, двигуни з короткозамкненим ротором М1 і М2. Енергію для роботи двигунів подають ззовні роздільником (максимальним і тепловим). Увімкнення та вимикання, запуск двигунів відбуваються за допомогою магнітних стартерів ПМ-1 та ПМ-2, а також моніторингу та сигналізаційних систем, живляться при напрузі 220 вольт через однополюсний

автоматичний вимикач ВА3 з найбільш потужним електромагнітним розщеплювачем [11].

Керування роботою компресорів може бути здійснене автоматично чи вручну. Система управління виконуватиметься за допомогою ключів КУ3 та КУ4. При ручному керуванні увімкненням та вимиканням магнітних пускачів ПМ1 і Підняття РМ-блоку відбуваються за допомогою повороту ручок ключів КУ-першого та КУ-другого з положення “вимкнено” в положення П (ручний). Компресорами автоматично управляють, коли встановлені ключові параметри. Контакти КУ1 та КУ2 підключені до автомату.

Підключення до мережі здійснюються за допомогою замикальних контактів керуючих реле РУ1 і РУ 2. Основним пристроєм для регулювання тиску повітря в ресивері та передавання сигналу у схему. управління включають електричний манометр. Кожен компресор має свій власний. Манометр з першого компресора K_1 позначений на схемі як $M_1 - H$ Маркування Мотора 1 та Мотора 3 відбулося на компресорі $K1$ і $K3$ відповідно.

Порядок включення компресорів при зниженні тиску налаштовувати на За допомогою перемикача режимів ПР можна налаштовувати режим роботи пристрою. Індикатор $K1$ вказуватиме на вибраний режим. перший компресор виконуватиме основні функціональні обов'язки і другий буде використовуватися у ролі допоміжного пристрою.

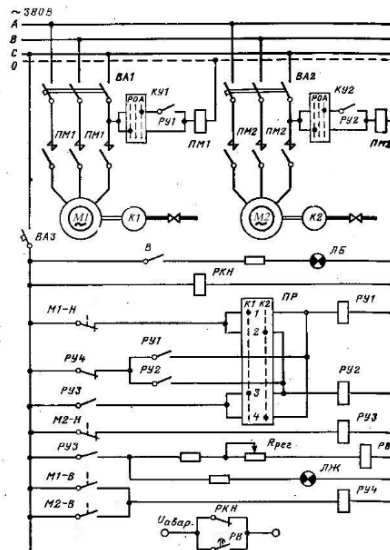


Рисунок 1.18 – Схема електроприводу компресорної установки

Припустимо якщо резервуар наповнений стислим повітрям і тиск відповідаючий на верхньому порозі значення через що МН1 та МН2 контактують Ресивер падаючи досягаючи мінімального значення потрібного для запуску. коли перший компресор запрацюватиме і контакт М1-Н першого манометра замикатиметься. РУ номер один активуватиме магнітний пускач ПМ номер один під час свого включення.

За допомогою другого контакту реле РУ1 через контакт РУ4 утворюються додаткові з'єднання. живлення для свої цілі для витокання енергію здатностями контактами ПМ 1 запускають двигун М2 першого компресора К2. Під час функціонування першого компресора тиск у резервуарі збільшуватиметься. і відкриваючи контакт МН-2 не призведе до відключення компресора К-2, оскільки котушка реле РП1 буде підключена до електромережі через свою замикаючу гілку контакт між РП-вим контактом ґрунту та контактом РП-вим контактом № ґрунту [12].

При підвищенні тиску в ресивері до максимального значення, контакт буде автоматично закритий. Коли манометр М2 спрацюватиме та активуватиме реле РУ3 своїм контактом відключиться реле РП2. вимкнути контактор К2 для відключення приводного двигуна М2 на старті компресорів.

Якщо перший компресор не працюватиме на повну потужність або його несправності тиску у резервуарі будуть продовжувати знижуватися.

І коли вони досягнуть критичного рівня, встановлено другий манометр М2-Н для замикання контакту реле. РУ3 та РУ3 встановлюють контакт; це активуватиме магнітний пускач ПМ3 через РУ3. запустить другий компресор двигуна М-02.

Манометри налаштовуються таким чином, щоб контакт з МН2 був увімкнений при під тиском менше ніж момент контакту МН-01. Коли тиск у ресивері впаде нижче межі значення для іншого приладу для вимірювання тиску розкриваються за допомогою контакту Майже двох - одне з реле перемикач залишаються активними завдяки свохидкольному контакту РП-2 та відривальний контакт.

Коли обидва компресори працюють разом, тиск у резервуарах збільшуватиметься. підніметься до максимально допустимого рівня і з'явиться сигнал вимикача манометра М2В і активуватиметься реле РУ4. Внаслідок цього вимикаються реле РУ1 і РУ2, які відключають Магнітні стартери ПМ1 та ПМ2 вимикаються і обидва компресори зупиняються. Схема передбачають цей процес. перевірка ефективності компресорного обладнання.

Навіть при активній роботі обох компресорів тиск у ресиверах не збільшувався. Якщо значення опадають нижче певного рівня калібрувальний контакт М2-Н манометра замкнеться І реле РПЗ Увімкненням активуватиметься реле часу РВ за певний часовий інтервал через його контакт. зателефонуйте РВ у зоні аварійно-попереджувальною сигналізацію і службовим працівникам буде надіслано сигнал про необхідність вжиття заходів неполадки.

На основі проведеного аналізу принципу функціонування автоматизованої системи керування компресорною установкою можна констатувати, що розроблена схема забезпечує ефективне автоматичне регулювання тиску стисненого повітря в резервуарі через послідовне підключення компресорів залежно від поточного навантаження системи.

Початковий стан системи характеризується наповненим резервуаром із тиском на верхній межі робочого діапазону, при якому манометричні контакти МН1 та МН2 знаходяться у замкнутому стані, що забезпечує готовність системи до роботи.

Алгоритм роботи системи базується на принципі каскадного включення компресорів відповідно до зниження тиску в резервуарі, при цьому перший компресор активується при досягненні мінімального порогового значення тиску через спрацювання реле РУ1 та магнітного пускача ПМ1, що забезпечує запуск електродвигуна М1. Система самоутримання реалізована через додатковий контакт реле РУ1 та контакт РУ4, що гарантує стабільну роботу першого компресора навіть після відкриття контакту МН2 під час підвищення тиску в резервуарі. При недостатній продуктивності першого компресора або його несправності система автоматично вмикає другий компресор через спрацювання манометра М2-Н і активацію реле РУ3, що призводить до включення магнітного пускача ПМ3 та запуску електродвигуна М2.

Живлення : На вході встановлений лічильник електроенергії СТ. Після лічильника мережа подає живлення силовому перетворювачу (СП). Керування електродвигуном : Силовий перетворювач (СП) підсилює напругу та регулює частоту живлення електродвигуна (ЕД) за командами системи керування (СК). Передача потужності : Електродвигун (ЕД) обертає редуктор (Р), який передає потужність до компресора (К). Контроль швидкості двигуна, продуктивності та тиску : Сенсори продуктивності (CQ) вимірюють об'єм повітря, що компресується. Сенсори тиску (CP) контролюють тиск у системі. Зворотний зв'язок : Дані з сенсорів (CQ і CP) і швидкості двигуна (W) передаються системі керування (СК). СК аналізує ці дані і коригує параметри роботи електродвигуна (ЕД) через силовий перетворювач (СП). Управління споживачами : Система керування (СК) також контролює декількох споживачів (CQ1, CQn, CP1, CPn), забезпечуючи оптимальне живлення та роботу всієї системи.

Функціональні особливості роботи системи

Режим стабілізації тиску. Система підтримує заданий тиск у головній магістралі, регулюючи швидкість обертання компресора. При падінні тиску нижче заданого плюс гістерезис, частота двигуна збільшується. При досягненні заданого тиску частота знижується до підтримуючої. Режим економії енергії. При відсутності споживання система переходить в режим очікування. Система аналізує графік споживання та прогнозує навантаження. Оптимізація швидкості нагнітання в залежності від потреб споживачів. Діагностика та превентивне обслуговування. Система відстежує напруження та інформує про необхідність технічного обслуговування. Контроль температури двигуна та компресора. Аналіз відхилень в роботі для раннього виявлення несправностей.

Переваги такої схеми полягають в тому, що здійснюється гнучке керування : За допомогою силового перетворювача (СП) можна точно регулювати швидкість обертання електродвигуна, що дозволяє підтримувати необхідну продуктивність компресора. Автоматизація процесу : Система

керування (СК) автоматично реагує на зміни у системі за допомогою зворотного зв'язку, що зменшує людське участю. Висока точність : Використання сенсорів продуктивності (CQ) та тиску (CP) забезпечує точне контролювання процесу компресії. Оптимізація для багатьох споживачів : Система керування (СК) може координувати роботу декількох споживачів (CQ1, CQn, CP1, CPn), забезпечуючи оптимальне живлення кожного. Захист електродвигуна : Силовий перетворювач (СП) може забезпечувати захист електродвигуна від перевантажень, коротких замикань.

Ця схема представляє сучасну систему електроприводу компресора з використанням силового перетворювача та системи керування. Вона має ряд переваг, таких як гнучке керування, автоматизацію процесу та високу точність. Однак для покращення енергоефективності слід враховувати недоліки, такі як надлишкове споживання енергії при неправильній налаштуванні та втрати енергії в силовому перетворювачі. Для покращення можна ввести механізми рекуперації енергії, оптимізовані алгоритми керування та енергозберігаючі технології.

2.2 Розрахунок і підбір усіх елементів для функціональної схеми

Такі як вхідні дані компресорної станції наведені в таб. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вхідні дані компресорної станції [13].

Найменування	ПКС 5,25
Робочий тиск	0,7 МПа
Продуктивність	до 5 м.куб/хв
Тип компресора	поршневий
Об'єм ресивера	0,045 м.куб
Вага	600/750 кг (ПКС 5,25)
Габарити ПКС 5,25	1865×910×1090 мм
Виробник	ПТМЗ (Україна)



Рисунок 2.2 – Зображення стаціонарного компресора ПКС 5,25

Дані для розрахунку наведені в таб. 2.2.

Таблиця 2.2 - Асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором 4A180M4 [14].

Потужність	30 кВт
Частота обертання	1500 об/хв
Фазність	трифазний
Коефіцієнт потужності	0,9
Напруга	91%
Номінальний струм	56 А
Відношення пускового струму до номінального	7
Відносний максимальний обертовий момент	2,2
Вага	195 кг
Режим роботи	S1 (тривалий)



Рисунок 2.3 – Вигляд асинхронного електродвигуна із короткозамкненим ротором 4A180M4

2.2.1 Розрахунок параметрів електричного двигуна

Пусковий струм:

$$I_p = 56 \cdot 7 = 392(\text{A}). \quad (2.1)$$

Повна потужність:

$$P = \frac{30}{0.9} = 33.333(\text{kVA}). \quad (2.2)$$

Реактивна потужність:

$$P_r = P \cdot \sin(\arccos(0.9)) = 14.53(\text{kVAp}). \quad (2.3)$$

Номінальний обертовий момент:

$$M_n = 9550 \cdot 0.02 = 191(\text{H} \cdot \text{m}) \quad (2.4)$$

Максимальний обертовий момент:

$$M_{\max} = 192 \cdot 2.2 = 420.2 (\text{Н} \cdot \text{м}) \quad (2.5)$$

Кутова швидкість обертання:

$$\omega = 2 \cdot 3.14 \cdot \left(\frac{n}{60} \right) = 157.08 \left(\frac{\text{Рад}}{\text{с}} \right). \quad (2.6)$$

Активна потужність при повному навантаженні:

$$P_1 = \frac{P_2}{\mu} = \frac{30}{0.91} = 32.967 (\text{кВт}). \quad (2.7)$$

Втрати потужності:

$$P_1 - P_2 = 2.967 (\text{кВт}). \quad (2.8)$$

Енергоспоживання за годину роботи:

$$P_1 \cdot 1 \text{ час} = 32.97 (\text{кВт} \cdot \text{час}). \quad (2.9)$$

Механічна потужність = (Продуктивність $\times$ Тиск) / (60 $\times$ ККД механічної частини). Для ПКС 3,5 (продуктивність 3,5 м³/хв). Прийmemo ККД механічної частини $\approx 0,85$.

$$P_{m3} = \frac{3.5 \cdot 0.7 \cdot 10^6}{60 \cdot 0.85} = 4.804 \cdot 10^4 (\text{Вт}). \quad (2.10)$$

Для ПКС 5,25 (продуктивність 5 м³/хв):

$$P_{m5} = \frac{5 \cdot 0.7 \cdot 10^6}{60 \cdot 0.85} = 6.863 \cdot 10^4 (\text{Вт}). \quad (2.11)$$

Для ПКС 5,25, максимальна продуктивність при потужності двигуна 30 кВт:

$$P_m = \frac{30 \cdot 0.85 \cdot 60}{0.7 \cdot 10^6} = 2.186 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{м}^3}{\text{хв}} \right). \quad (2.12)$$

Час наповнення ресиверу: Час наповнення ресивера до тиску 0,7 МПа при продуктивності 2,18 м³/хв:

$$T = \frac{0.045}{2.18} = 0.021 = 1.24(\text{с}). \quad (2.13)$$

Час роботи при споживанні стисненого повітря. Припустимо споживання стисненого повітря на рівні 1 м³/хв: Час роботи на повному ресивері = Об'єм ресивера × Тиск / Споживання.

$$T_{\text{пов}} = 0.045 \cdot \left(\frac{0.7}{1} \right) = 0.032 = 1.89(\text{с}). \quad (2.14)$$

Теплові розрахунки. Теплові втрати в двигуні Теплові втрати = Втрати потужності = 2,97 кВт. Температура нагріву двигуна При тривалому режимі роботи S1, можна очікувати нагрів до 70-80 С (в межах допустимого для двигуна класу ізоляції).

2.2.2 Розрахунок параметрів і вибір частотного перетворювача

Номінальний струм перетворювача. Для асинхронних двигунів потрібно вибирати перетворювач із запасом по струму: Необхідний струм ЧП = 1,1 × Номінальний струм двигуна [15].

$$I_{\text{чп}} = 1.1 \cdot 56 = 61.6(\text{А}). \quad (2.15)$$

Модель FC 202 P30K має номінальний вихідний струм 61 А, що практично відповідає розрахунковому значенню.



Рисунок 2.4 – Вигляд частотного перетворювача Danfoss VLT AQUA Drive FC 202

Розрахунок діапазону регулювання швидкості. Для забезпечення стабільної роботи компресора та енергоефективності рекомендується регулювання швидкості в діапазоні: Мінімальна швидкість = $0,5 \times \text{Номінальна швидкість}$ = $0,5 \times 1500 = 750$ об/хв. Максимальна швидкість = $1,1 \times \text{Номінальна швидкість}$ = $1,1 \times 1500 = 1650$ об/хв.

Відповідні частоти для перетворювача: Мінімальна частота = 25 Гц. Номінальна частота = 50 Гц. Максимальна частота = 55 Гц.

Розрахунок часу розгону та гальмування. Для поршневого компресора рекомендується плавний пуск: Час розгону від 0 до 50 Гц: 15-20 с. Час гальмування від 50 до 0 Гц: 15-20 с.

Розрахунок енергоспоживання при різних режимах роботи. При зниженні швидкості обертання пропорційно знижується продуктивність, але споживана потужність знижується нелінійно.

$$P = P_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^3 \quad (2.16)$$

При 75% від номінальної швидкості (1125 об/хв):

$$P = 30 \cdot (0.75)^3 = 12.656 (\text{кВт}). \quad (2.17)$$

При 50% від номінальної швидкості (750 об/хв):

$$P = 30 \cdot (0.50)^3 = 3.75 (\text{кВт}). \quad (2.18)$$

Вибір частотного перетворювача. З урахуванням характеристик двигуна та специфіки роботи поршневого компресора, рекомендуємо використовувати частотний перетворювач Danfoss VLT AQUA Drive FC 202.

2.2.3 Розрахунок і вибір лічильника електроенергії

Розрахунок параметрів лічильника електроенергії.

Для вибору лічильника електроенергії для живлення компресорної системи з електродвигуном 4A180M4 (30 кВт) та перетворювачем частоти Danfoss VLT AQUA Drive FC 202 P30K, необхідно розрахувати основні електричні параметри [16].

Номінальний струм двигуна: Для двигуна 4A180M4 (30 кВт, 380В, 56 А, трифазний).

Пусковий струм: розрахований вище становить 392 (А). (Однак з частотним перетворювачем пусковий струм обмежується, зазвичай до $1,5 \times I_{ном}$).

Максимальна споживана потужність: 32.967(кВт).

Вимоги до лічильника: Номінальна напруга: 380В. Номінальний струм: не менше 63А. Клас точності: не гірше 1.0. Можливість обліку активної та реактивної енергії. Можливість інтеграції до системи керування.

Рекомендований лічильник електроенергії:

ABB B23 112-100 (трифазний багатофункціональний електронний лічильник). Журнал подій та профіль навантаження наведено в таб. 2.3.

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики.

Номінальна напруга	400В
Номінальний/максимальний струм	5(80)А (безпосереднє підключення)
Клас точності	1.0 для активної енергії, 2.0 для реактивної енергії
Тарифна система	багатотарифний (до 4 тарифів)
Інтерфейси	RS-485, імпульсний вихід
Протокол	Modbus RTU
Ступінь захисту	IP51

Продовження таблиці 2.3 - Технічні характеристики.

Діапазон робочих температур	-25 С...+55 С
Вимірювання	активна і реактивна енергія в обох напрямках, потужність, напруга, струм, частота, коефіцієнт потужності



Рисунок 2.5 – Вигляд лічильника електроенергії ABB B23 112-100

Схема підключення лічильника:

Для лічильника ABB B23 112-100 з безпосереднім підключенням:

Фазні проводи L1, L2, L3 підключаються до входів 1, 4, 7 лічильника.

Вихідні фазні проводи підключаються до виходів 3, 6, 9 лічильника.

Нейтральний провід N підключається до входу 10 лічильника.

Вихід RS-485 (клеми 20, 21) підключається до системи керування (СК).

Імпульсний вихід (клеми 18, 19) можна підключити до ПЛК для додаткового контролю.

Для лічильника Schneider Electric PowerLogic PM5310 з підключенням через трансформатори струму:

Необхідно встановити трансформатори струму на кожну фазу з коефіцієнтом трансформації 100/5А.

Фазні проводи підключаються до первинних обмоток трансформаторів струму.

Вторинні обмотки ТТ підключаються до струмових входів лічильника.

Напруги фаз підключаються до відповідних входів лічильника.

Інтерфейс RS-485 підключається до системи керування.

Функціональні особливості обліку електроенергії в системі.

Інтеграція з системою керування.

Лічильник передає дані про споживання електроенергії до ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200.

Система керування аналізує енергоспоживання та оптимізує режими роботи компресора.

Можливість формування звітів про споживання енергії за періодами часу.

Моніторинг якості електроенергії . Контроль напруги та частоти мережі. Виявлення несиметрії фаз та перекосу напруг. Захист системи від аномалій електромережі.

Економічна ефективність. Облік спожитої електроенергії за тарифними зонами. Розрахунок питомого енергоспоживання на м³ стисненого повітря. Аналіз ефективності роботи компресора в різних режимах.

Превентивна діагностика. Виявлення аномального споживання електроенергії як індикатор проблем. Контроль коефіцієнта потужності системи для оптимізації роботи. Своєчасне виявлення погіршення енергетичних характеристик обладнання. Встановлення сучасного лічильника електроенергії дозволить не тільки вести точний облік спожитої електроенергії, але й оптимізувати роботу всієї компресорної системи, забезпечуючи її максимальну ефективність та надійність.

2.2.4 Розрахунок і вибір редуктора

Для асинхронного двигуна 4A180M4 номінальна швидкість обертання становить 1470 об/хв. Для поршневого компресора оптимальна швидкість обертання - близько 500-700 об/хв.

Розрахуємо передатне число:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1470}{600} = 2.45 \quad (2.19)$$

Крутний момент на валу двигуна:

$$M_1 = \frac{P}{\left(2\pi \cdot \frac{n_1}{60}\right)} = \frac{30000}{\left(2\pi \cdot \frac{1470}{60}\right)} = 194.6(\text{Нм}). \quad (2.20)$$

Рекомендований редуктор:

Циліндричний редуктор Bonfiglioli серії C серії C 41 2. Характеристика наведена в таб. 2.4.

Таблиця 2.4 - Технічні характеристики редуктора.

Передатне число	2,5
Максимальний крутний момент	до 600 Нм
ККД	96%
Тип монтажу: фланцевий	фланцевий
Охолодження	природне повітряне



Рисунок 2.6 – Вигляд редуктора Bonfiglioli серії С серії С 41 2

Редуктор Bonfiglioli має високий ресурс роботи (до 25000 годин), захист IP54 та здатний витримувати високі радіальні навантаження, що важливо для поршневого компресора з його пульсуючим навантаженням [17].

2.2.5 Розрахунок і вибір сенсорів продуктивності

Для компресора ПКС 5,25 з продуктивністю до 5,25 м³/хв потрібен відповідний витратомір [18].

Розрахунок параметрів витратоміра. Максимальна продуктивність:

$$5.25 \frac{\text{м}^3}{\text{хв}} = 315 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \quad (2.21)$$

З урахуванням запасу 20% = 378 м³/год.

Рекомендований сенсор продуктивності:

Термально-масовий витратомір Siemens SITRANS FP230 MASS 6000.



Рисунок 2.7 – Термально-масовий витратомір Siemens SITRANS FP230 MASS 6000

Таблиця 2.5 – Характеристики витратоміра.

Діапазон вимірювання	0-400 м³/год
Точність	±0,5% від виміряного значення
Вихідний сигнал	4-20 мА, HART, PROFIBUS-DP
Робочий тиск	до 100 бар
Температурний діапазон	-50...+180 С

2.2.6 Розрахунок і вибір сенсорів тиску

Поршневі компресори ПКС 3,5/ПКС 5,25 зазвичай забезпечують тиск до 10 бар.

Розрахунок параметрів сенсорів тиску:

Максимальний робочий тиск: 10 бар з урахуванням запасу 30%: 13 бар.

Рекомендований сенсор тиску: Endress+Hauser Cerabar PMC71 [19].



Рисунок 2.8 – Сенсор тиску Endress+Hauser Cerabar PMC71

Основні дані і характеристику сенсору тиску можна спостерігати в таб.
2.6.

Таблиця 2.6 – Характеристика сенсору тиску.

Діапазон вимірювання	0-16 бар
Точність	$\pm 0,15\%$ від діапазону
Вихідний сигнал	4-20 мА, HART
Приєднання	G1/2"
Матеріал	нержавіюча сталь 316L
Ступінь захисту	IP67

2.2.7 Вибір сенсору швидкості електричного двигуна

Рекомендований датчик швидкості:

Інкrementальний енкодер Kübler Sendix 5020 [20].



Рисунок 2.9 – Інкрементальний енкодер Kübler Sendix 5020

Таблиця 2.7 – Характеристика енкодеру.

Роздільна здатність	1024 імпульси/оберт
Механічна швидкість	до 6000 об/хв
Ступінь захисту	IP65
Вихідний сигнал	TTL/HTL, RS422
Живлення	5-30 В постійного струму

2.2.8 Розрахунок і вибір системи керування

З урахуванням вже наявного частотного перетворювача Danfoss VLT AQUA Drive FC 202 P30K потрібна сумісна система керування.

Рекомендована система керування: ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C.

Таблиця 2.8 – Дані системи керування.

14 цифрових входів DC 24V.
10 цифрових виходів DC 24V.
2 аналогових входи 0-10V.
Комунікаційні інтерфейси: PROFINET, Modbus TCP, Modbus RTU.
Можливість розширення до 3 комунікаційних модулів
Пам'ять програми: 100 КБ



Рисунок 2.10 – ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C

Додаткові модулі:

Модуль аналогових входів SM 1231 AI 8 x 13bit (для підключення сенсорів 4-20 мА).

Модуль зв'язку CM 1241 для інтеграції з перетворювачем Danfoss через RS485.

HMI панель оператора Siemens SIMATIC KTP700 Basic PN для візуалізації та керування.

Особливості системи керування:

Автоматичне підтримання заданого тиску в системі за допомогою ПІД-регулятора. Контроль продуктивності та тиску в різних точках системи. Захист від перевантаження та аварійних ситуацій. Оптимізація енергоспоживання шляхом регулювання швидкості двигуна. Програмований алгоритм черговості включення/виключення споживачів. Віддалений моніторинг та керування через SCADA-систему [21].

Розробка функціональної схеми електромеханічної системи компресора дозволила інтегрувати основні елементи керування, моніторингу та регулювання для реалізації енергоощадного режиму роботи. Проведено розрахунок і вибір ключових компонентів: двигуна, частотного перетворювача, редуктора, лічильника електроенергії та сенсорів продуктивності й тиску. Це забезпечило технічну реалізованість та економічну доцільність запропонованого рішення.

З РОЗРАХУНОК РЕГУЛЯТОРІВ, КОНТУРІВ СТРУМУ ТА ШВИДКОСТІ

Математична модель асинхронного двигуна 4A180M4. Розрахунок регуляторів за методом Лапласа вимагає представлення системи у вигляді передавальних функцій. Для асинхронного двигуна 4A180M4 з частотним перетворювачем Danfoss FC 202 розглянемо математичну модель в системі координат d-q, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора.

Дані параметрів двигуна 4A180M4 (30 кВт) наведено в таб.3.1.

Таблиця 3.1 - Параметри двигуна 4A180M4 (30 кВт).

Номінальна потужність	$P_{\text{ном}} = 30 \text{ кВт}$
Номінальна напруга	$U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$
Номінальна частота	$f_{\text{ном}} = 50 \text{ Гц}$
Номінальний струм	$I_{\text{ном}} = 58,6 \text{ А}$
Номінальна швидкість	$n_{\text{ном}} = 1470 \text{ об/хв}$
Кількість пар полюсів	$p = 2$
Номінальний момент	$M_{\text{ном}} = 195 \text{ Н}\cdot\text{м}$

Електричні параметри двигуна можна спостерігати в таб. 3.2.

Таблиця 3.2 - Електричні параметри

Активний опір статора	$R_1 = 0,15 \text{ Ом}$
Активний опір ротора, приведений до статора	$R_2' = 0,12 \text{ Ом}$
Індуктивність розсіювання статора	$L_{1\sigma} = 0,8 \text{ мГн}$
Індуктивність розсіювання ротора	$L_{2\sigma}' = 1,1 \text{ мГн}$
Взаємна індуктивність	$L_m = 45 \text{ мГн}$
Сумарний момент інерції	$J = 0,28 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$

3.1 Передавальна функція для контуру струму

Силовий перетворювач частоти можна представити як аперіодичну ланку першого порядку:

Коефіцієнт підсилення перетворювача:

$$K_{\text{пч}} = \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{упр}}} = \frac{380}{10} = 38 \quad (3.1)$$

Постійна часу перетворювача при тактовій частоті 4 кГц:

$$T_{\text{пч}} = \frac{1}{(2 \cdot f_{\text{такт}})} = \frac{1}{(2 \cdot 4000)} = 0.125(\text{мс}). \quad (3.2)$$

$$W_{\text{пч}(s)} = \frac{K_{\text{пч}}}{(T_{\text{пч}} \cdot s + 1)} \quad (3.3)$$

Електромагнітні процеси в обмотці статора описуються передавальною функцією:

Еквівалентна індуктивність статора:

$$L_{1\sigma} + L_m \cdot \frac{L_{2\sigma'}}{(L_m + L_{2\sigma'})} = 0.8 + 45 \cdot \frac{1.1}{(0.8 + 45)} \approx 1.87(\text{мГн}). \quad (3.4)$$

Електромагнітна постійна часу статора:

$$T_{\sigma} = \frac{L_{1\text{екв}}}{R_1} = \frac{0.00187}{0.15} = 12.5(\text{мс}). \quad (3.5)$$

$$W_{\text{дв.стр}(s)} = \frac{1}{(R_1 + s \cdot L_{\text{екв}})} \quad (3.6)$$

$$W_{\text{дв.стр}(s)} = \frac{6.67}{(0.0125 \cdot s + 1)} \quad (3.7)$$

Модульний оптимум в контексті математичних розрахунків — це підхід до оптимізації великих систем, коли загальну задачу розбивають на окремі, менші модулі (частини), які можна оптимізувати окремо, але з урахуванням їх взаємозв'язків. Цей підхід дозволяє ефективніше керувати складними економічними, технічними чи організаційними системами.

Використовуємо метод оптимізації за модульним оптимумом, який забезпечує швидкодію та відсутність перерегулювання.

Некомпенсована мала постійна часу системи:

$$T_{\mu} = T_{\text{пч}} + T_{\text{фільтр}} = 1.25(\text{мс}) \cdot (\text{мс}). \quad (3.8)$$

де $T_{\text{фільтр}}$ - постійна часу фільтра в контурі вимірювання струму.

Передавальна функція регулятора струму за методом модульного оптимуму:

$$W_{\text{pc}(s)} = \frac{(T_3 \cdot s + 1)}{(2 \cdot T_{\mu} \cdot K_{\text{пч}} \cdot s)} \quad (3.9)$$

Де $K_{\text{дс}} = 1$ - коефіцієнт датчика струму при використанні нормованих величин.

$$W_{\text{pc}(s)} = \frac{(0.0125 \cdot s + 1)}{(2 \cdot 0.0125 \cdot 38 \cdot s)} \quad (3.10)$$

Це відповідає ПІ-регулятору з параметрами:

Пропорційна складова:

$$K_p = \frac{0.0125}{0.095} = 0.132 \quad (3.11)$$

Інтегральна складова:

$$K_i = \frac{1}{0.095} = 10.53 \quad (3.12)$$

3.2 Передавальна функція для контуру швидкості

Механічна частина двигуна описується передавальною функцією:

$$W_{\text{дв.мех}(s)} = \frac{1}{(j \cdot s)} \quad (3.13)$$

Коефіцієнт зв'язку між моментом і струмом:

$$k_m = 1.5 \cdot p \cdot L_m \cdot \left(\frac{\varphi_r}{L_2} \right) \quad (3.14)$$

φ_r - потокозчеплення ротора (в номінальному режимі).

Зв'язок між моментом і струмом статора:

$$M = K_m \cdot I_{qs} \quad (3.15)$$

Для спрощення приймемо:

$$K_m = \frac{M_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{195}{58.6} = 3.33 (\text{Н} \cdot \text{м} / \text{А}). \quad (3.16)$$

Таким чином:

$$W_{\text{дв.шв}(s)} = \frac{K_m}{(j \cdot s)} = \frac{3.33}{(0.28 \cdot s)} = \frac{11.89}{s} \quad (3.17)$$

Використовуємо метод оптимізації за симетричним оптимумом для контуру швидкості. Контур струму можна представити як аперіодичну ланку з передавальною функцією:

$$W_{\text{зам.струм.}(s)} = \frac{1}{(2 \cdot T_{\mu} \cdot s + 1)^2} \quad (3.18)$$

Некомпенсована постійна часу для контуру швидкості:

$$T_{\mu c} = 4 \cdot T_{\mu} = 4 \cdot 0.00125 = 5(\text{мс}). \quad (3.19)$$

Передавальна функція регулятора швидкості за методом симетричного оптимуму:

$$W_{\text{рш}(s)} = \frac{(8 \cdot T_{\mu} \cdot s + 1)}{(8 \cdot T_{\mu c^2} \cdot K_{\text{м}} \cdot K_{\text{дш}} \cdot s)} \quad (3.20)$$

Де $K_{\text{дш}} = 1$ - коефіцієнт датчика швидкості при використанні нормованих величин.

$$W_{\text{рш}(s)} = \frac{(8 \cdot 0.005 \cdot s + 1)}{(8 \cdot 0.005^2 \cdot 11.89 \cdot 1 \cdot s)} \quad (3.21)$$

Це відповідає ПІ-регулятору швидкості з параметрами:

Пропорційна складова:

$$K_p = \frac{0.04}{0.00238} = 16.81 \quad (3.22)$$

Інтегральна складова:

$$K_i = \frac{1}{0.00238} = 420.17 \quad (3.33)$$

3.3 Налаштування регуляторів для частотного перетворювача

Параметри регулятора струму наведені в таб. 3.3.

Таблиця 3.3 - Параметри регулятора струму

P1.66 (Gain Current Proportional):	0,132
P1.67 (Gain Current Integral):	10,53 ms
P1.68 (Gain Current Filter):	1,25 ms

Параметри регулятора швидкості задані в таб. 3.4.

Таблиця 3.4 - Параметри регулятора швидкості

P1.60 (Speed PID Proportional Gain):	16,81
P1.61 (Speed PID Integral Time):	2,38 ms
P1.62 (Speed PID Differentiation Time):	0 ms
P1.63 (Speed PID Diff. Gain Limit):	5,0

Налаштування контуру струму:

Спочатку налаштовується внутрішній контур струму. Встановлюється розраховані значення параметрів регулятора струму. Перевірка перехідного процесу при стрибку струму (рекомендована тривалість 3-5 мс). За потреби зменшіть пропорційний коефіцієнт для зменшення перерегулювання. Налаштування контуру швидкості: Після налаштування контуру струму потрібно переходити до контуру швидкості. Встановлення розрахованих значень параметрів регулятора швидкості. Перевірка перехідного процесу при стрибку швидкості (рекомендована тривалість 50-100 мс). При значному перерегулюванні можна зменшити пропорційний коефіцієнт на 10-20%.

Дана система регулювання забезпечує високу якість керування двигуном 4A180M4 з перетворювачем частоти Danfoss FC 202 за критеріями швидкодії, точності підтримання швидкості та стійкості до збурень.

4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КОМПРЕСОРА

Представлена схема демонструє сучасну систему автоматичного керування компресорною установкою, яка базується на принципах частотного регулювання електродвигуна з комплексним контролем параметрів технологічного процесу. Дана конфігурація являє собою багатоконтурну систему автоматичного регулювання, що забезпечує оптимальне функціонування компресорного обладнання при змінних навантаженнях [22].

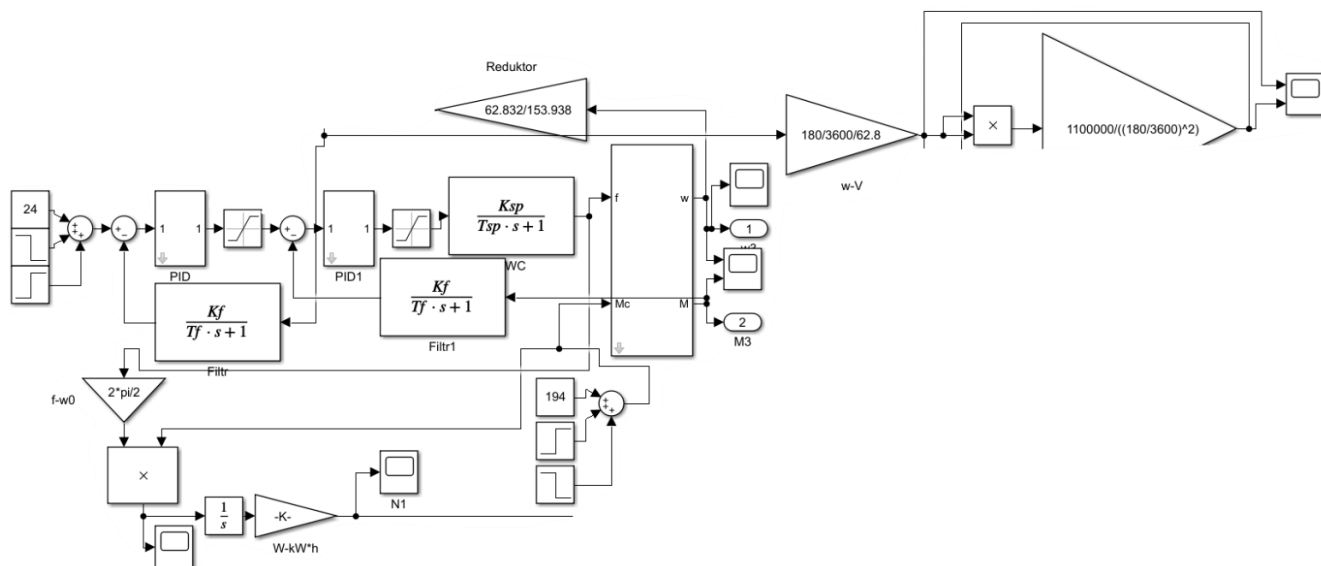


Рисунок 4.1 – Вигляд моделювання електромеханічної схеми

Основним елементом силової частини системи виступає частотний перетворювач, який здійснює керування асинхронним електродвигуном компресора. Частотний перетворювач забезпечує плавне регулювання швидкості обертання двигуна шляхом зміни частоти та амплітуди напруги живлення, що дозволяє адаптувати продуктивність компресора до поточних потреб системи. Використання частотного керування значно підвищує енергоефективність установки порівняно з традиційними методами регулювання продуктивності.

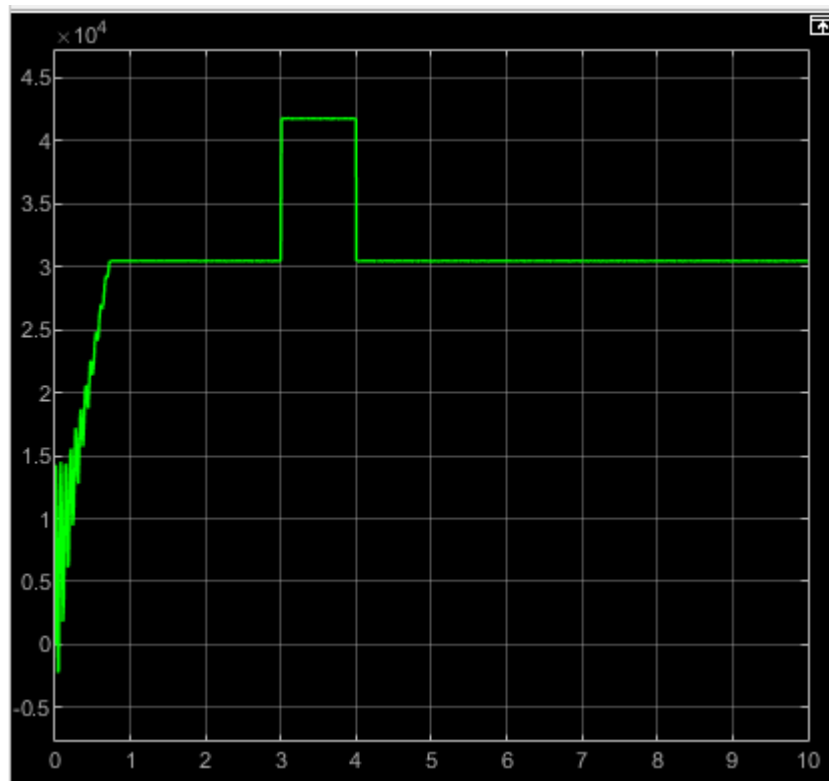


Рисунок 4.2 – Графік споживання електроенергії на вході системи

Проаналізувавши данні з графіку можна зробити висновок, що представлена конфігурація являє собою сучасне технічне рішення, яке забезпечує ефективне та надійне функціонування компресорного обладнання при змінних навантаженнях. Система частотного регулювання з багатоконтурним зворотним зв'язком дозволяє досягти високої енергоефективності та точності підтримання технологічних параметрів, однак характеризується значними пусковими струмами, що потребує додаткових заходів щодо їх обмеження [23].

Інтеграція датчиків тиску та продуктивності з автоматизованою системою керування забезпечує оптимальну адаптацію роботи компресора до потреб різних споживачів, що робить дану конфігурацію особливо придатною для промислових застосувань з високими вимогами до якості та стабільності пневматичного постачання. Незважаючи на підвищену складність та вартість реалізації, переваги системи у вигляді економії електроенергії, збільшення

терміну служби обладнання та покращення керованості процесом виправдовують її впровадження у сучасних промислових установках.

Система містить два основних контури зворотного зв'язку, які забезпечують стабільну та безпечну роботу обладнання. Контур зворотного зв'язку по струму електродвигуна виконує функції захисту від перевантажень та контролю споживаної потужності. Цей контур дозволяє оперативно реагувати на зміни навантаження на валу компресора і запобігати виникненню аварійних режимів роботи. Зворотний зв'язок по швидкості обертання забезпечує точне дотримання заданих параметрів роботи двигуна та компенсацію впливу зовнішніх збурень на систему.



Рисунок 4.3 – Графік енергоспоживання у Вт системи на вході

На основі аналізу представленого графіка електромеханічна система компресора демонструє стабільну експлуатаційну поведінку з поступовим зростанням енергоспоживання, що може бути обумовлено як збільшенням робочого навантаження системи протягом розглянутого періоду, так і природним процесом зношування обладнання, який призводить до зниження

його енергетичної ефективності. Експоненціальний характер кривої вказує на необхідність регулярного моніторингу технічного стану системи та своєчасного проведення профілактичних заходів для підтримання оптимальних енергетичних характеристик, оскільки подальше зростання споживання електроенергії може призвести до економічно невиправданих експлуатаційних витрат та потреби в модернізації або заміні компресорного обладнання [24].

Технологічна частина системи включає сенсори тиску та продуктивності, розташовані на виході компресорної установки. Датчик тиску забезпечує контроль над одним з найважливіших параметрів роботи системи, дозволяючи підтримувати необхідний рівень тиску в пневматичній мережі. Сенсор продуктивності здійснює моніторинг об'ємної витрати стисненого повітря, що дає можливість контролювати відповідність роботи компресора.

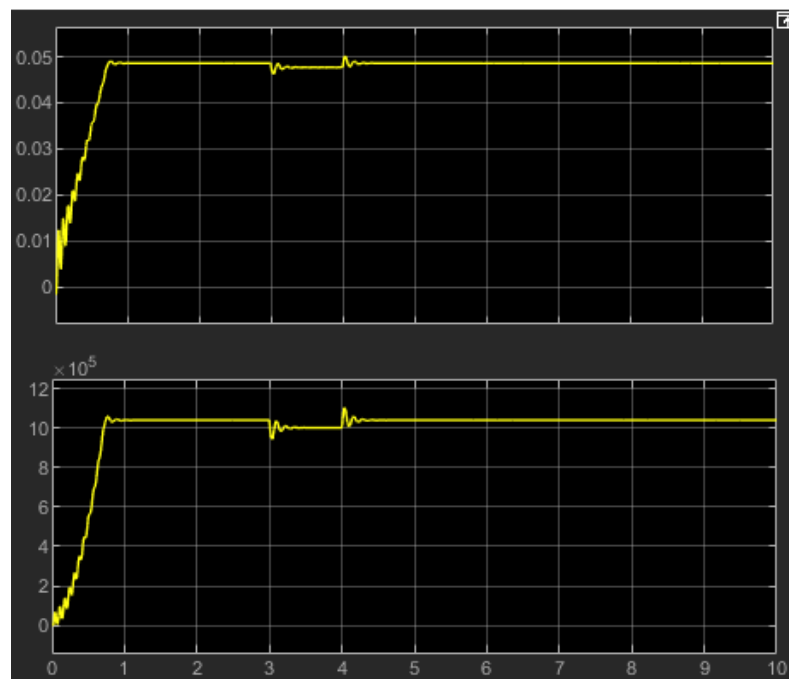


Рисунок 4.4 – Графік значень продуктивності і тиску

Графіки відображають динамічні характеристики продуктивності та тиску електромеханічної системи компресора в процесі її запуску та виходу на номінальний режим роботи, демонструючи типову поведінку пневматичної

системи з автоматичним регулюванням параметрів. Обидві криві характеризуються ідентичною формою перехідного процесу, що починається з нульових значень та демонструє експоненціальне зростання до максимальних робочих параметрів з подальшою стабілізацією на постійному рівні протягом тривалого періоду функціонування. Початкова фаза кожного графіка відображає процес розгону компресорної системи, коли електродвигун набирає обертів та починає створювати необхідний тиск у пневматичній мережі з відповідним збільшенням продуктивності установки. Перехідний процес характеризується відносно коротким часом встановлення, що свідчить про ефективність системи керування та оптимальні параметри налаштування регуляторів тиску та продуктивності.

Досягнення усталеного режиму роботи відображається горизонтальними ділянками кривих з мінімальними коливаннями навколо номінальних значень, що підтверджує стабільність роботи системи автоматичного регулювання та відсутність значних збурень у технологічному процесі. Незначні періодичні відхилення від встановлених значень можуть бути обумовлені природними коливаннями споживання стисненого повітря або роботою системи підтримання заданого тиску в автоматичному режимі. Синхронність поведінки обох параметрів свідчить про правильну настройку взаємозв'язаних контурів регулювання та збалансованість системи керування компресорною установкою [25].



Рисунок 4.5 – Графік енергоспоживання системи у Вт на виході

Проаналізувавши данні з графіку можна зробити висновок, що електромеханічна система компресора працює в режимі контрольованого поступового збільшення навантаження, демонструючи стабільну лінійну залежність споживання електроенергії від часу після початкового періоду підготовки, що свідчить про ефективну роботу системи автоматичного керування та відсутність технічних проблем у функціонуванні обладнання. Такий характер енергоспоживання є типовим для процесів заповнення великих пневматичних систем або поступового введення в експлуатацію компресорного обладнання з послідовним збільшенням робочих параметрів, що забезпечує оптимальні умови експлуатації та мінімізує ризики перевантаження системи на початкових етапах роботи.

Система керування реалізована на базі програмованого логічного контролера або спеціалізованого регулятора, який обробляє сигнали від усіх датчиків та формує керуючі впливи на частотний перетворювач. Алгоритм керування забезпечує оптимальну роботу компресора при мінімізації енергоспоживання та максимізації надійності обладнання. Регулятор аналізує поточні значення тиску та продуктивності, порівнює їх із заданими

значеннями та коригує швидкість обертання двигуна для досягнення оптимальних параметрів роботи [26].

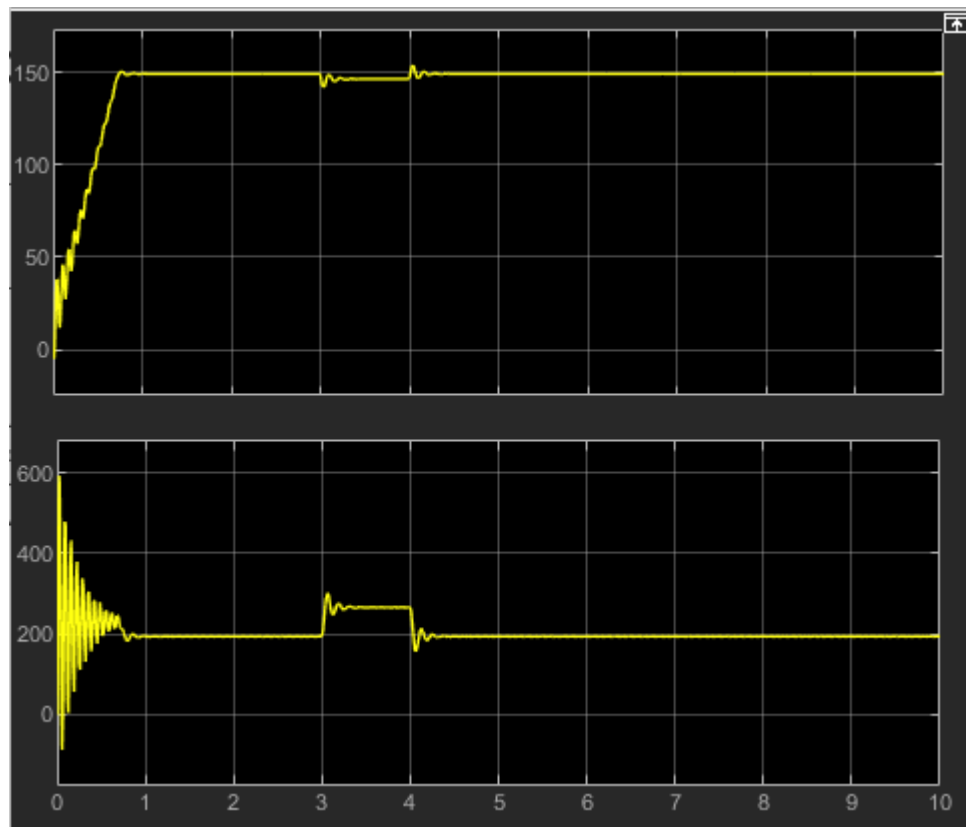


Рисунок 4.6 – Графік швидкості і моменту двигуна

Динамічні характеристики швидкості та моменту електродвигуна компресорної системи в двох різних режимах керування, що відображають кардинально відмінні підходи до управління електромеханічною системою. Верхній графік характеризується плавною експоненціальною кривою розгону швидкості або моменту від нульового значення до номінального рівня з подальшою стабілізацією на постійному значенні протягом тривалого періоду роботи, що є типовим для систем з частотним регулюванням або плавним пуском електродвигуна. Перехідний процес відзначається відсутністю коливань та перерегулювань, що свідчить про оптимально налаштовані параметри системи керування та ефективну роботу регуляторів швидкості та моменту [27].

Нижній графік демонструє імпульсний характер роботи з вираженим початковим піком високої амплітуди, який різко спадає до мінімального рівня з подальшими періодичними стрибками середньої величини. Такий характер може відповідати роботі системи прямого пуску з циклічним навантаженням або імпульсному режиму регулювання параметрів двигуна. Початковий високоамплітудний імпульс на нижньому графіку вказує на значний пусковий момент або швидкий розгон системи без обмеження динамічних параметрів. Подальші коливання можуть бути обумовлені циклічною роботою системи регулювання тиску або періодичним підключенням та відключенням навантаження компресора залежно від потреб пневматичної системи.

Порівняльний аналіз представлених графіків дозволяє зробити висновок про суттєву перевагу системи плавного керування швидкістю та моментом електродвигуна, відображеної на верхньому графіку, над імпульсним режимом роботи, представленим на нижньому графіку, оскільки перша забезпечує стабільні динамічні характеристики без значних механічних навантажень на систему привода та компресорний механізм. Імпульсний характер роботи, продемонстрований на нижньому графіку, створює додаткові динамічні навантаження на обладнання та може призводити до прискореного зношування механічних компонентів системи, що робить плавне керування більш привабливим з точки зору надійності, енергоефективності та довговічності електромеханічної системи компресора.

Взаємодія елементів системи відбувається за принципом каскадного регулювання, де зовнішній контур керування здійснює регулювання технологічних параметрів, а внутрішні контури забезпечують стабільну роботу електроприводу. Такий підхід дозволяє досягти високої точності регулювання при збереженні стійкості системи в широкому діапазоні робочих режимів [28].

Переваги представленої конфігурації включають високу енергоефективність завдяки частотному регулюванню, можливість точного дозування продуктивності компресора відповідно до потреб споживачів,

надійний захист обладнання від аварійних режимів, гнучкість налаштування параметрів роботи системи. Система забезпечує автоматичну адаптацію до змін навантаження без втручання оператора, що знижує експлуатаційні витрати та підвищує надійність роботи.

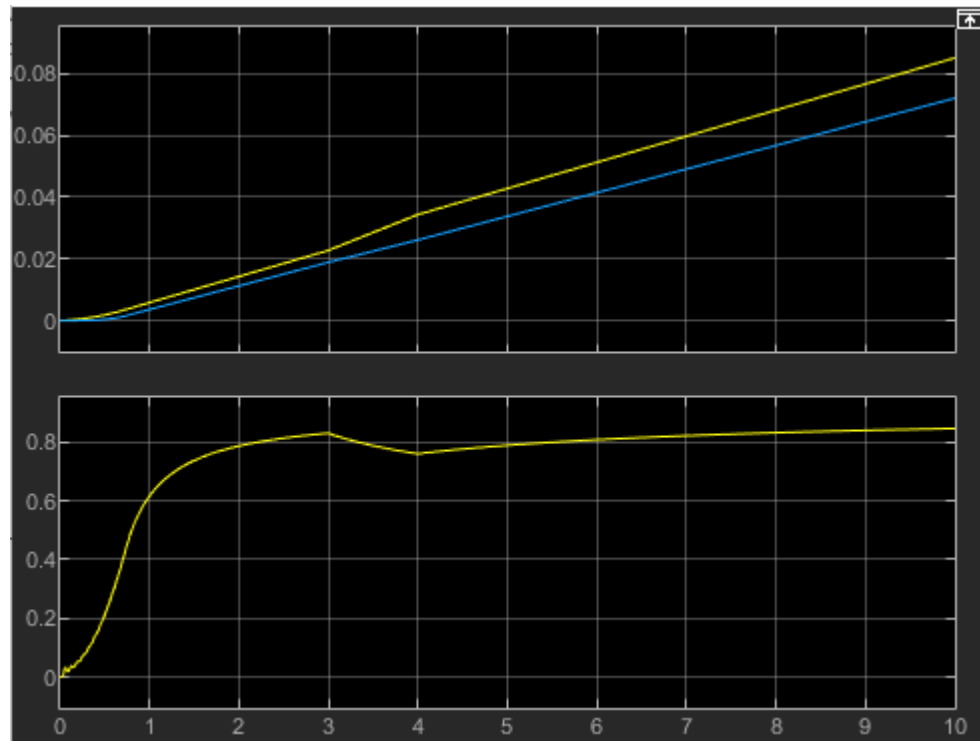


Рисунок 4.7 – Графік порівняння енергоспоживання системи на вході і на виході із представленням ККД

З графіків видно порівняльний аналіз енергетичних характеристик електромеханічної системи компресора на вході та виході з відображенням коефіцієнта корисної дії системи протягом повного робочого циклу. Верхній графік відображає дві лінійні залежності енергоспоживання, де жовта крива характеризує енергію на вході системи, а синя крива представляє корисну енергію на виході, при цьому різниця між кривими відображає енергетичні втрати в системі та дозволяє оцінити ефективність перетворення електричної енергії в механічну роботу стиснення повітря.

Характер обох кривих свідчить про стабільний коефіцієнт корисної дії системи протягом усього періоду роботи, що вказує на оптимальне

налаштування параметрів керування та відсутність значних змін у технічному стані обладнання. Постійний градієнт зростання обох залежностей підтверджує стабільну роботу системи під постійним навантаженням з незмінними параметрами ефективності. Нижній графік демонструє динамічну характеристику коефіцієнта корисної дії системи, що починається з негативних значень у момент пуску через високі пускові втрати та поступово зростає до максимального значення з подальшою стабілізацією на оптимальному рівні. Початкова негативна ділянка відображає період, коли енергоспоживання системи перевищує корисну роботу через необхідність подолання інерції системи та створення початкового тиску в пневматичній мережі. Досягнення максимального значення ККД та подальша стабілізація свідчать про вихід системи на оптимальний режим роботи з мінімальними відносними втратами енергії.

Недоліки даної конфігурації пов'язані з підвищеною складністю системи керування, що потребує кваліфікованого персоналу для обслуговування та налаштування. Використання частотного перетворювача може призводити до генерації електромагнітних завад, що вимагає додаткових заходів щодо електромагнітної сумісності. Вартість реалізації такої системи значно вища порівняно з простими схемами пуску двигуна, однак ці витрати компенсуються економією електроенергії та підвищенням терміну служби обладнання [29].

Система характеризується високою надійністю завдяки наявності множинних контурів контролю та захисту, що дозволяє своєчасно виявляти та усувати потенційні проблеми в роботі обладнання. Можливість плавного регулювання параметрів роботи знижує механічні навантаження на компресор та збільшує його ресурс експлуатації.

4.1 Розробка аналізу і контролю енергоефективності електромеханічної системи компресора

Розробка алгоритму аналізу енергоефективності електромеханічної системи компресора базується на комплексному підході до оцінки енергетичних характеристик через безперервний моніторинг та аналіз параметрів енергоспоживання на різних етапах роботи системи. Фундаментальною основою алгоритму є порівняльний аналіз енергетичних потоків на вході та виході електромеханічної системи, що дозволяє отримати об'єктивну оцінку ефективності перетворення електричної енергії в механічну роботу компресора.

Алгоритм здійснює безперервне збирання даних про споживану електричну потужність на вході системи та корисну механічну потужність на виході, формуючи динамічні характеристики енергоспоживання в реальному часі. Вхідна енергетична характеристика, представлена зеленою лінією на верхньому графіку, відображає загальне електричне споживання системи, включаючи всі втрати в електричних компонентах, магнітних полях двигуна та механічних елементах приводу. Вихідна характеристика, показана синьою лінією, характеризує корисну механічну роботу, що безпосередньо використовується для стиснення робочого середовища в компресорі.

Обчислення коефіцієнта корисної дії здійснюється через відношення вихідної корисної потужності до споживаної вхідної потужності, формуючи динамічну криву ККД, представлену на нижньому графіку. Алгоритм аналізує форму цієї кривої, виявляючи характерні особливості поведінки системи в різних режимах роботи. Початкова ділянка кривої ККД демонструє процес виходу системи на робочий режим, коли відбувається стабілізація всіх енергетичних процесів і досягнення оптимальних параметрів роботи електромеханічної системи [30].

Критичним аспектом роботи алгоритму є виявлення деградації ефективності системи через аналіз тенденцій зміни ККД у часі. Коли крива

ККД демонструє негативну динаміку або відхилення від оптимальних значень, алгоритм активує підсистему діагностики для визначення першопричин зниження ефективності. Діагностичний модуль аналізує співвідношення між вхідними та вихідними параметрами, ідентифікуючи специфічні патерни, що характерні для різних типів неефективності системи.

Алгоритм здатен розрізняти між різними типами втрат енергії, включаючи електричні втрати в обмотках двигуна, магнітні втрати в сталі статора та ротора, механічні втрати в підшипниках та ущільненнях, а також аеродинамічні втрати в елементах компресорної частини. Через аналіз частотних характеристик сигналів споживання потужності та вібраційних параметрів алгоритм може локалізувати джерела неефективності та класифікувати їх за ступенем критичності для загальної роботи системи.

Коригувальні дії, що пропонуються алгоритмом для відновлення оптимального ККД, базуються на результатах діагностичного аналізу та включають оптимізацію режимів роботи через коригування частоти обертання двигуна, налаштування параметрів системи керування, рекомендації щодо профілактичного обслуговування механічних компонентів або заміни зношених елементів. Алгоритм також враховує динамічні характеристики навантаження компресора та може адаптувати режими роботи до змінних умов експлуатації для підтримання максимальної енергоефективності протягом всього операційного циклу системи.

Ефективність, надійність, безпека та економічність обладнання КС повинні забезпечуватися: - постійним та періодичним контролем технічного стану обладнання візуально, за показаннями штатної контрольновимірювальної апаратури і з допомогою технічних засобів діагностики; - підтриманням обладнання та комунікацій у справному стані; - оптимальним режимом роботи технологічних установок КС; - ремонтами, модернізацією, реновацією або реконструкцією морально та фізично застарілого обладнання. Обладнання КС повинно мати технологічну

станційну нумерацію, нанесену фарбою, що не змивається або іншим способом [3].

КС повинні бути обладнані системою автоматичного збирання, обробки та передачі на вищий рівень інформації про стан обладнання та параметри технологічних процесів на КС. Ця інформація є вхідною для роботи автоматичних систем діагностування ГПА. Зміни у конструкції обладнання КС, запроваджені у порядку модернізації, повинні впроваджуватись на основі бюлетенів підприємств-виготовлювачів обладнання, інформаційних листів, раціоналізаторських пропозицій та інших технічних рішень, розглянутих і рекомендованих до впровадження.

Раціоналізаторські пропозиції та інші технічні рішення з модифікації конструкції ГПА та іншого основного технологічного обладнання КС, як правило, повинні бути погоджені з підприємством - виготовлювачем даного виробу, проектною організацією та дозволу технічного керівника підприємства (філії, підрозділу). Зміни у конструкції обладнання КС та ГПА, які проводяться в порядку реконструкції, шляхом заміни на нове сучасне обладнання, повинні проводитись на основі проекту реконструкції, який пройшов попередню експертизу [3].

Експертиза проектів об'єктів, що підлягають реконструкції, проводиться Державним комітетом України по нагляду за охороною праці, Міністерством охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки, Управлінням Державної пожежної охорони МВС України та іншими органами державного нагляду. Проектні організації зобов'язані здійснювати авторський нагляд за дотриманням проектних рішень. Дозвіл на початок роботи об'єкта видає Держнаглядохоронпраці.

Нові ГПА та обладнання, яке поставляють заводи-виготовлювачі і що впроваджуються під час реконструкції, повинні мати сертифікати відповідності. Дослідні зразки нової техніки впроваджуються у виробництво в дослідно-промислову експлуатацію без сертифікатів, але з дозволу

Держнаглядохоронпраці. Приймання в експлуатацію проводиться Державною комісією згідно з ДБН А 3.1-3-94 [3].

На основі математичного моделювання було отримано динамічні характеристики електромеханічної системи компресора, що дозволило прогнозувати поведінку системи при різних режимах роботи. Модель використовувалася для аналізу стабільності, швидкодії та точності регулювання, а також для оптимізації параметрів системи керування.

5 ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВИРОБНИЦТВА СТИСНУТОГО ПОВІТРЯ

5.1 Розробка структурної схеми і алгоритму моніторингу

Представлена структурна схема демонструє алгоритм діагностики втрат стисненого повітря в сегментованій системі розподілу електромеханічної компресорної установки, що базується на принципі енергетичного балансу між потужністю подачі та споживання в кожній окремій секції трубопроводу.

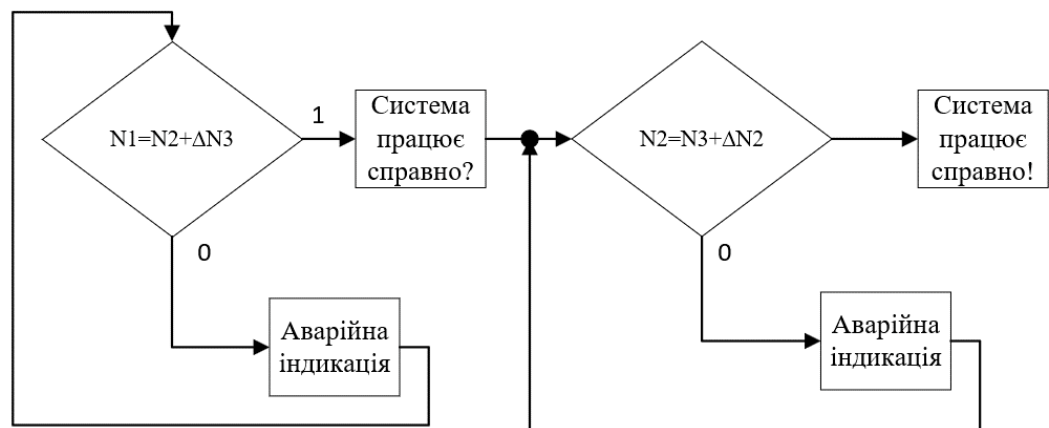


Рисунок 5.1 – Структурна схема моніторингу витрат повітря
споживачами

Система включає трубопровід стисненого повітря, розділений на три незалежні секції, кожна з яких обладнана датчиками тиску та продуктивності для безперервного моніторингу параметрів потоку стисненого повітря, що дозволяє обчислювати миттєву потужність транспортування через добуток тиску на об'ємну витрату в кожній секції. Одночасно кожна секція містить споживач стисненого повітря, оснащений аналогічною системою сенсорів для визначення фактичної потужності споживання, що створює можливість для

порівняльного аналізу енергетичних потоків на вході та виході кожної секції системи розподілу [31].

Алгоритм функціонує через послідовну перевірку енергетичного балансу в кожній секції, порівнюючи розрахункові значення потужності транспортування стисненого повітря з фактичними значеннями потужності споживання відповідного обладнання. Логічна структура алгоритму передбачає два основні сценарії: коли різниця потужностей $N1-N2+\Delta N3$ та $N2-N3+\Delta N2$ дорівнює нулю, система генерує сигнал про нормальну роботу без втрат стисненого повітря, а коли виявляється енергетичний дисбаланс, активується аварійна індикація, що сигналізує про наявність витоків або несправностей у відповідній секції трубопроводу.

Діагностична здатність системи забезпечується через послідовний аналіз енергетичних балансів у кожній секції, що дозволяє не тільки виявити факт наявності втрат стисненого повітря, але й точно локалізувати місце витoku через ідентифікацію конкретної секції з порушеним енергетичним балансом. Двоетапна структура перевірки, представлена на схемі, забезпечує надійність діагностики через перехресну верифікацію результатів аналізу в суміжних секціях системи, що мінімізує вірогідність помилкових спрацьовувань та підвищує точність локалізації місць втрат стисненого повітря в розгалуженій мережі розподілу компресорної установки [32].

5.2 Пояснення структури схеми на основі розділення на пронумеровані кольорові частини

На рисунку представлена структурна схема електромеханічної системи компресора, що включає основні функціональні елементи, необхідні для забезпечення ефективного керування, контролю та моніторингу параметрів.

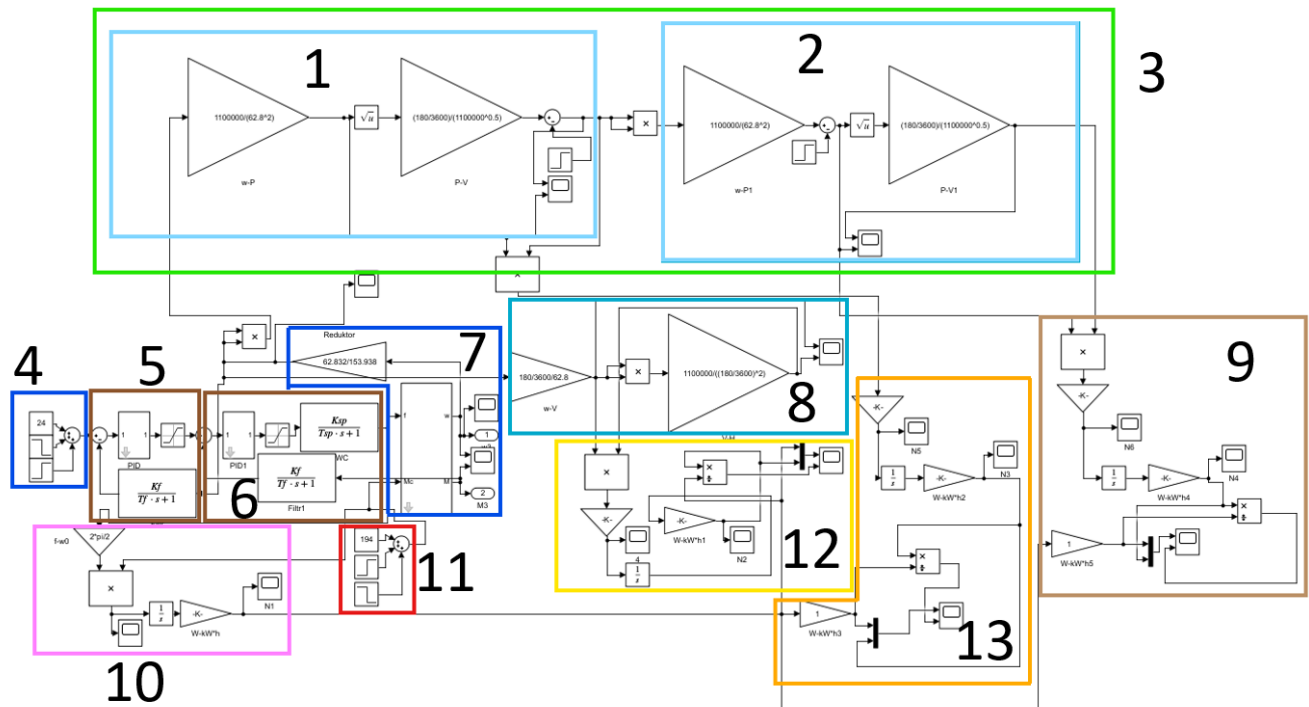


Рисунок 5.2 – Структурування схеми окремими кольоровими блоками

У лівій частині схеми номером 4 та 7 позначено джерело живлення, а також двигун постійного струму, з'єднаний із черв'ячним редуктором. Двигун забезпечує обертальний рух, який через редуктор передається на компресор.

11 номером представлено навантаження системи. Цей блок враховує взаємодію між механічною частиною привода та технологічним навантаженням, що забезпечує реалістичне представлення про роботу системи в умовах реальної експлуатації.

На рис.5.2 номером 10 показано лічильник електроенергії (W-kWh), який виконує функцію обліку спожитої енергії. Він реєструє сумарну кількість кіловат-годин, витрачених системою протягом роботи, що важливо для оцінки енергоефективності та техніко-економічних показників системи.

Номерами 5-6 виділено два блоки зворотних зв'язків: один — по струму, інший — по швидкості. Блок зворотного зв'язку по струму забезпечує контроль за струмом, що споживається двигуном, що дає можливість регулювати потужність і запобігти перевантаженням. Блок зворотного зв'язку по швидкості відповідає за точне підтримання заданих оборотів двигуна, що є критично важливим для стабільної роботи компресора.

Номером 8 позначено сенсори продуктивності та тиску, які встановлені безпосередньо в системі компресора. Ці сенсори забезпечують вимірювання таких параметрів, як об'ємна подача повітря та робочий тиск, що є ключовими факторами для оцінки ефективності роботи компресора.

Номером 12 представлено блок моніторингу значень, отриманих від сенсорів продуктивності та тиску компресора. Цей блок здійснює обробку та аналіз вхідних сигналів, формуючи сигнали управління для підтримання заданих режимів роботи системи.

Номером 13 позначено блок моніторингу тиску та продуктивності першого споживача. Цей блок відповідає за контроль параметрів стисненого повітря, що подається до першого технологічного обладнання, забезпечуючи необхідну якість подачі.

Номером 9 у правій частині схеми вказано аналогічний блок моніторингу, але призначений для іншого споживача. Цей блок виконує ті самі функції, що й попередній, але стосується іншого споживача, що дозволяє організувати роздільний контроль параметрів.

Номерами 1-2 позначено сенсори, встановлені на окремих секторах трубопроводу. Ці сенсори забезпечують постійний контроль стану середовища в трубопроводі, зокрема тиск і продуктивність, що дозволяє оперативно виявляти відхилення та вживати коригувальних заходів.

Номером 3 зображено трубопровід, який забезпечує транспортування стисненого повітря від компресора до споживачів. Трубопровід має послідовно встановлені сенсори, які забезпечують моніторинг параметрів у різних точках системи.

Таким чином, дана структурна схема являє собою комплексну модель електромеханічної системи компресора, яка включає елементи живлення, керування, регулювання, моніторингу та контролю. Кольорове кодування та функціональна організація забезпечують наочність, зручність аналізу та можливість подальшої математичної моделі для наукових досліджень.

5.3 Розробка алгоритму і модернізація електромеханічної схеми

Розширений алгоритм аналізу енергоефективності електромеханічної системи компресора з інтегрованим контуром моніторингу мережі розподілу стисненого повітря представляє комплексну систему діагностики, що поєднує енергетичний аналіз компресорної установки з детальним контролем споживання стисненого повітря в розгалуженій мережі споживачів. Фундаментальною особливістю даного алгоритму є одночасний аналіз енергетичних характеристик на рівні генерації стисненого повітря та його розподілу між множинними споживачами, що дозволяє отримати цілісну картину енергоефективності всієї пневматичної системи [33].

Алгоритм базується на принципі енергетичного балансу, де загальна потужність, що витрачається компресорною установкою на створення стисненого повітря, має відповідати сумарній потужності, що споживається всіма підключеними споживачами з урахуванням втрат у системі розподілу. Кожен споживач обладнаний високоточними сенсорами тиску та витратоміром продуктивності, що забезпечує безперервний моніторинг локальних параметрів споживання. Потужність споживання кожного окремого споживача обчислюється як добуток миттєвого значення тиску на об'ємну продуктивність, що дає можливість отримати енергетичний еквівалент споживання стисненого повітря в кожній точці системи [34].

Центральний блок алгоритму здійснює безперервне порівняння сумарної розрахункової потужності всіх споживачів з фактичною потужністю, що генерується компресорною установкою, визначеною через параметри тиску нагнітання та об'ємної продуктивності компресора. Енергетичний

дисбаланс між генерованою та споживаною потужністю індикує наявність втрат у системі, які можуть бути обумовлені витоками стисненого повітря через пошкодження трубопроводів, несправності з'єднань або деградацією ущільнювальних елементів.

Діагностичний модуль алгоритму використовує методи топологічного аналізу для локалізації місць втрат стисненого повітря через порівняння енергетичних балансів у різних сегментах розподільчої мережі. Система здатна ідентифікувати конкретні ділянки трубопроводу або з'єднання, де відбуваються втрати, через аналіз градієнтів тиску та невідповідностей між очікуваними та фактичними значеннями продуктивності в суміжних точках моніторингу. Алгоритм враховує гідродинамічні характеристики потоку стисненого повітря, включаючи втрати тиску на тертя в трубопроводах та місцевих опорах, що дозволяє відрізнити нормальні експлуатаційні втрати від аварійних витоків.

Система моніторингу споживачів забезпечує детальний профіль споживання кожного підключеного обладнання, дозволяючи оптимізувати режими роботи компресорної установки відповідно до реального попиту на стиснене повітря. Алгоритм аналізує динамічні характеристики споживання, виявляючи піки та спади навантаження, що дає можливість прогнозувати потребу в стисненому повітрі та адаптувати роботу компресора для мінімізації енергоспоживання при забезпеченні необхідних параметрів тиску та продуктивності.

Інтегрована система раннього попередження активується при виявленні аномальних відхилень в енергетичному балансі або при перевищенні порогових значень втрат стисненого повітря. Алгоритм класифікує виявлені аномалії за ступенем критичності, відрізняючи між поступовою деградацією системи внаслідок природного зносу компонентів та раптовими аваріями, що потребують невідкладного втручання.

Алгоритм також включає модуль оптимізації енергоспоживання, який аналізує ефективність роботи окремих споживачів та пропонує заходи для

покращення загальної енергоефективності системи. Це включає рекомендації щодо перерозподілу навантаження між споживачами, оптимізації тисків у різних сегментах мережі та координації режимів роботи споживачів для зменшення пікових навантажень на компресорну установку.

Представлена схема демонструє сучасну багаторівневу систему автоматичного керування компресорною установкою з розширеними можливостями моніторингу енергетичної ефективності та діагностики втрат продуктивності на кожному рівні споживання. Дана конфігурація являє собою комплексну електромеханічну систему, що поєднує традиційні принципи частотного регулювання з інноваційними підходами до контролю коефіцієнта корисної дії окремих гілок споживання стисненого повітря.

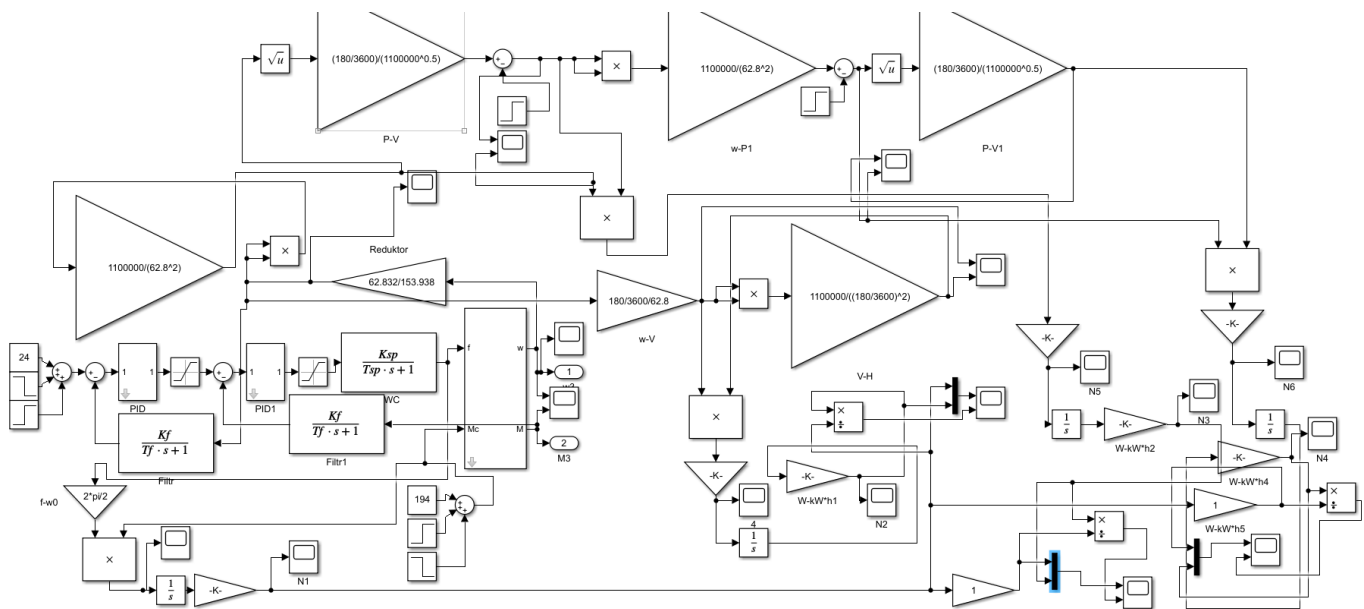


Рисунок 5.3 – Вигляд схеми електропривода з моніторингом втрат тиску і продуктивності в системі

Технологічна частина системи включає розгалужену мережу сенсорів тиску та продуктивності, стратегічно розміщених не лише на виході основного компресора, але й на вході кожного споживача стисненого повітря. Така конфігурація дозволяє здійснювати безперервний моніторинг втрат тиску в трубопроводній системі та оцінювати реальну продуктивність, що надходить до кожного споживача. Датчики продуктивності забезпечують вимірювання

об'ємних витрат стисненого повітря в реальному часі, що створює можливість розрахунку локального коефіцієнта корисної дії для кожної гілки споживання окремо.

Схема передбачає живлення двох споживачів з суттєво різними характеристиками споживання стисненого повітря. Перший споживач характеризується високими вимогами до тиску при помірній продуктивності, тоді як другий споживач потребує значних об'ємів стисненого повітря при нижчих вимогах до тиску. Кожна гілка споживання обладнана власною системою моніторингу ефективності, що включає вимірювальні перетворювачі тиску, датчики об'ємної витрати та обчислювальні блоки для розрахунку локального коефіцієнта корисної дії.

Ключовою особливістю системи є наявність спеціалізованих блоків моніторингу витрат продуктивності, які здійснюють безперервний аналіз ефективності кожної гілки споживання. Ці блоки порівнюють теоретично очікувану продуктивність з реально виміряними значеннями та розраховують коефіцієнт витрат для кожного споживача окремо. Така функціональність дозволяє оперативно виявляти деградацію ефективності окремих ділянок системи, ідентифікувати витoki в трубопровідній мережі або погіршення характеристик споживчого обладнання.

Реалізація функції моніторингу коефіцієнта корисної дії для кожного споживача окремо створює можливість впровадження системи економічного стимулювання ефективного використання стисненого повітря, коли споживачі з вищою ефективністю отримують пріоритет в розподілі ресурсів. Така функціональність особливо важлива для великих промислових комплексів з множиною технологічних процесів, що мають різні вимоги до параметрів стисненого повітря.

Недоліки системи пов'язані з значно підвищеною складністю як апаратної частини, так і програмного забезпечення, що потребує висококваліфікованого персоналу для налаштування, експлуатації та обслуговування. Велика кількість датчиків та вимірювальних пристроїв

збільшує ймовірність відмов окремих компонентів системи, що може призвести до зниження загальної надійності. Високі початкові інвестиції в обладнання та програмне забезпечення можуть створювати економічні бар'єри для впровадження такої системи на невеликих підприємствах.

Система характеризується високою гнучністю налаштування параметрів роботи для різних споживачів, що дозволяє адаптувати її до широкого спектру промислових застосувань. Можливість індивідуального моніторингу ефективності кожного споживача створює передумови для впровадження системи управління якістю енергетичних ресурсів на рівні підприємства та оптимізації загальних енергетичних витрат через ідентифікацію найменш ефективних споживачів стисненого повітря.

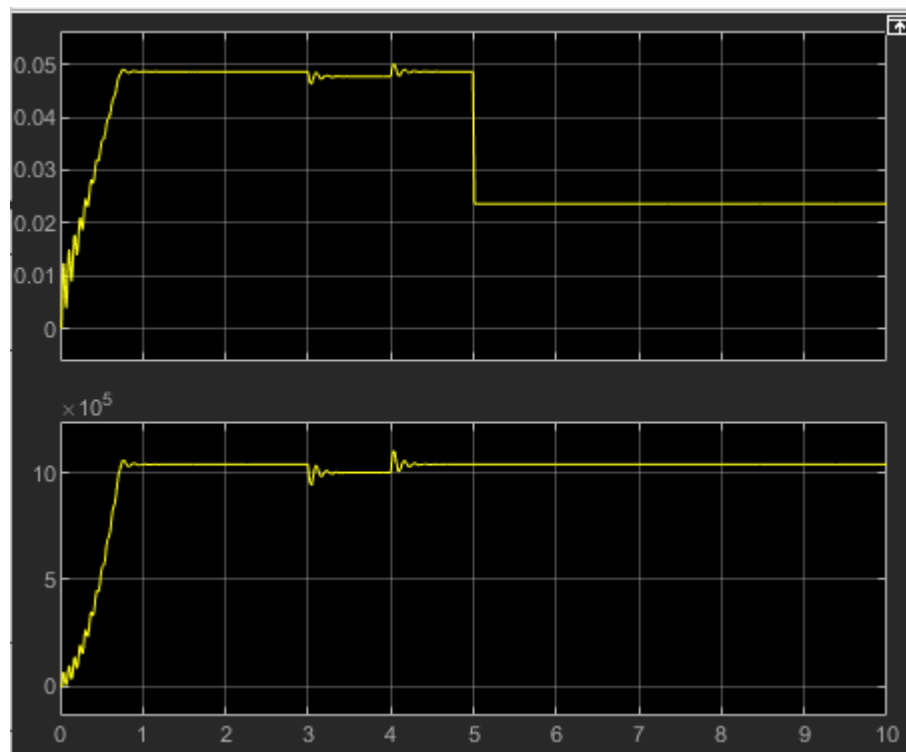


Рисунок 5.4 – Графік тиску і продуктивності першого споживача

Електромеханічна система компресора успішно реагує на запуск і підходить до стабільного режиму роботи. Тиск і продуктивність швидко піднімаються до певних рівнів і тримаються стабільно, що свідчить про коректну налаштування системи та її здатність забезпечувати необхідний

рівень надходження для першого споживача. Незначні коливання під час стабільної роботи можуть бути нормальною частиною процесу, пов'язаними з діяльністю системи або змінами навантаження.

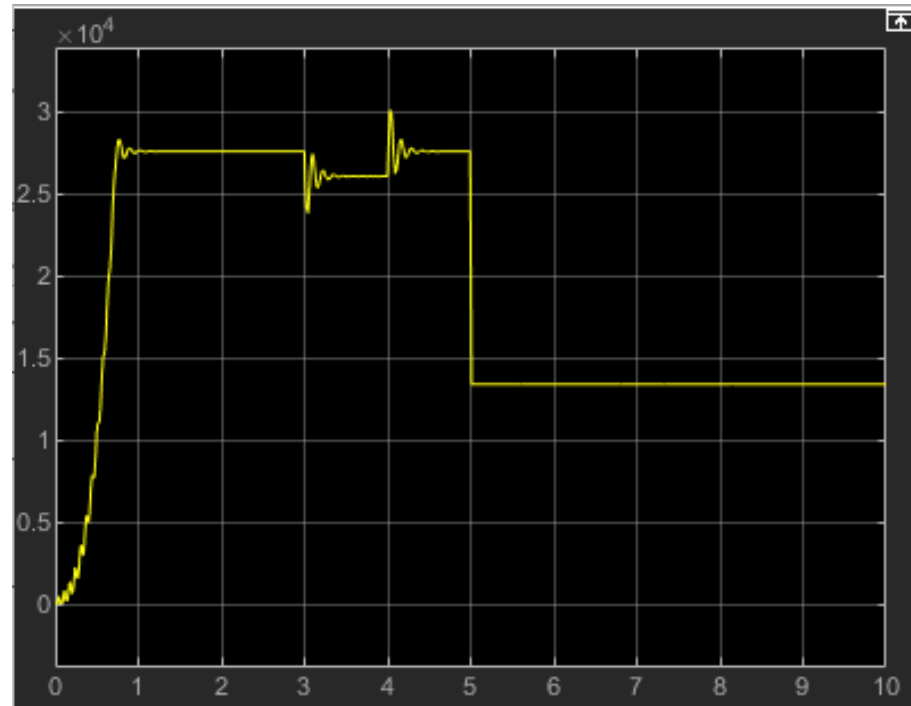


Рисунок 5.5 – Графік енергоспоживання системи при втратах першого споживача

На початку симуляції енергоспоживання системи швидко зростає, піднімаючись до певного рівня. Потім споживання стабілізується на цьому рівні, показуючи, що система досягла оптимального режиму роботи. Упродовж часу споживання тримається стабільно, з незначними коливаннями, які можуть бути пов'язані з діяльністю системи або змінами у навантаженні. На деякому моменті (близько середини графіка) споживання знову зростає і стабілізується на новому, нижчому рівні, що може вказувати на зміну режиму роботи або зменшення навантаження першого споживача.

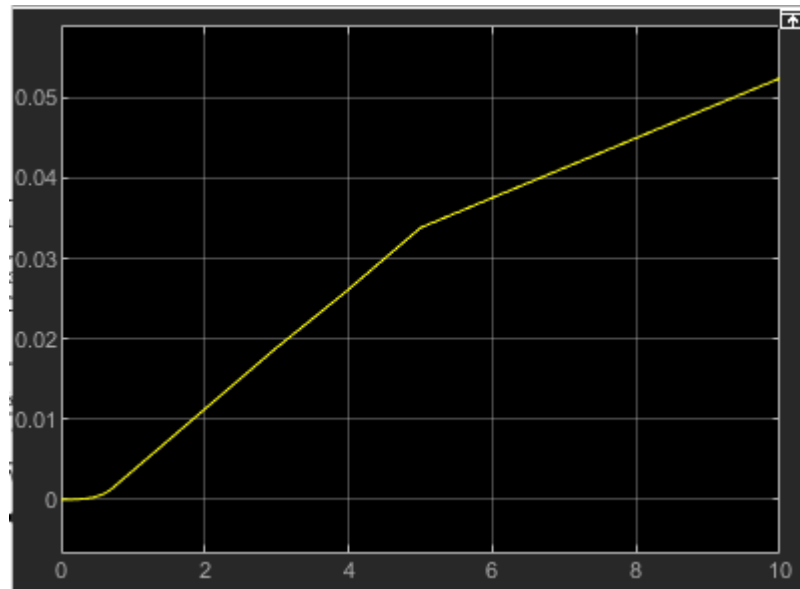


Рисунок 5.6 – Графік енергоспоживання системи в Вт

Проаналізувавши данні з графіку можна зробити висновок, що електромеханічна система компресора успішно реагує на запуск і підходить до стабільного режиму роботи. Енергоспоживання швидко піднімається до певного рівня і тримається стабільно, що свідчить про коректну налаштування системи та її здатність забезпечувати необхідний рівень потужності для першого споживача. Незначні коливання під час стабільної роботи можуть бути нормальною частиною процесу, пов'язаними з діяльністю системи або змінами навантаження. Зниження споживання після певного моменту може бути пов'язане з зменшенням навантаження або переходом системи до менш енергоємного режиму роботи.

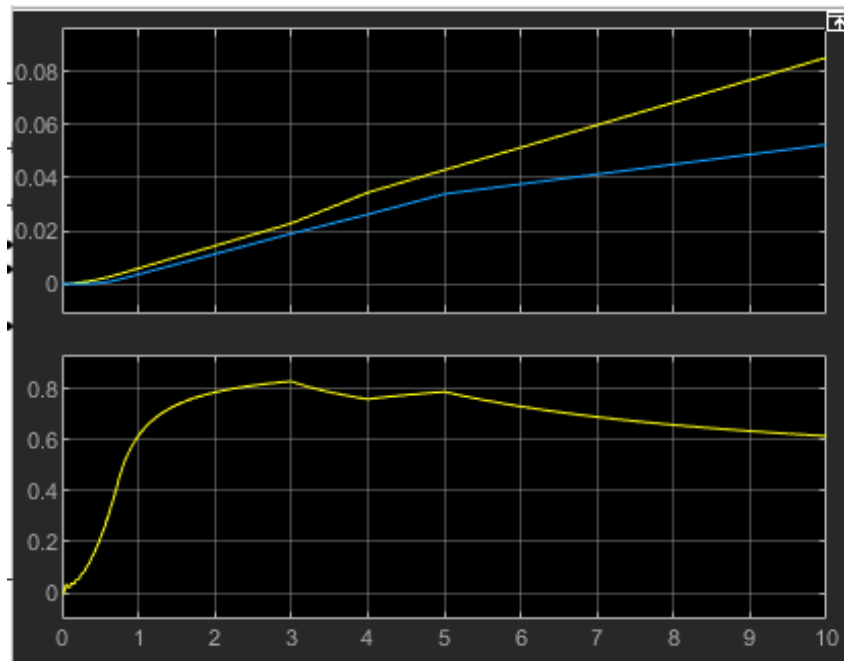


Рисунок 5.7 – Графік порівняння енергоспоживання між нормальним режимом роботи системи і втратою на першому споживачі

У нормальному режимі роботи порівняно з режимом, коли на першому споживачі виникають втрати. При цьому ефективність системи спочатку зростає, але згодом стабілізується на нижчому рівні, що може бути пов'язане з діяльністю системи або змінами у навантаженні. Втрати на першому споживачі впливають на загальну енергетичну ефективність системи, знижуючи споживання енергії, однак це не завжди призводить до поліпшення ефективності.

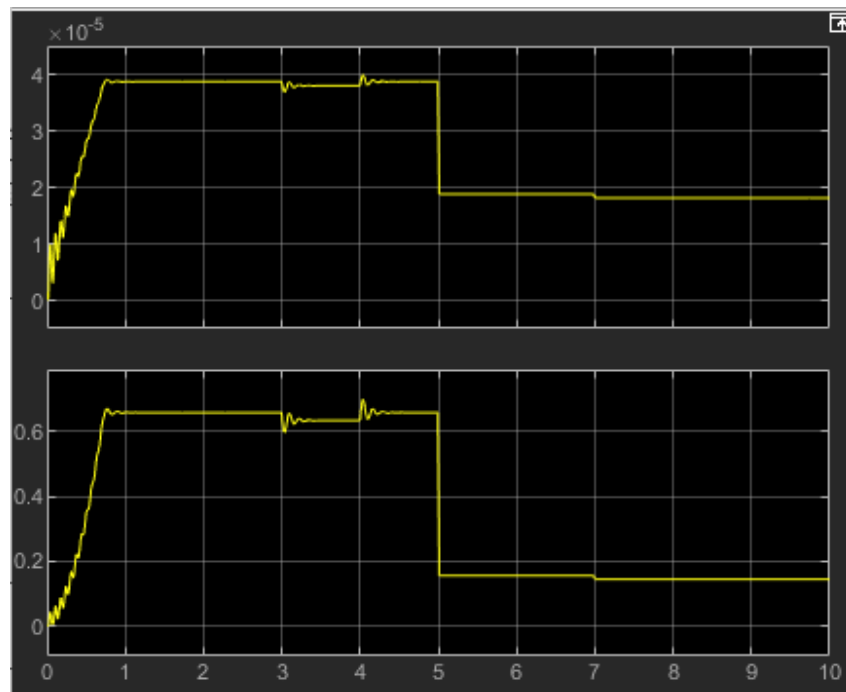


Рисунок 5.8 – Графік тиску і продуктивності з втратою на 2 споживачі

Система компресора успішно реагує на запуск і підходить до стабільного режиму роботи. Тиск і продуктивність швидко піднімаються до певних рівнів і тримаються стабільно, що свідчить про коректну налаштування системи та її здатність забезпечувати необхідний рівень надходження для споживачів. Незначні коливання під час стабільної роботи можуть бути нормальною частиною процесу, пов'язаними з діяльністю системи або змінами навантаження. Зниження тиску і продуктивності після певного моменту може бути пов'язане з втратами на другому споживачі, що призводить до зменшення загального навантаження і, як наслідок, до зниження ефективності системи.

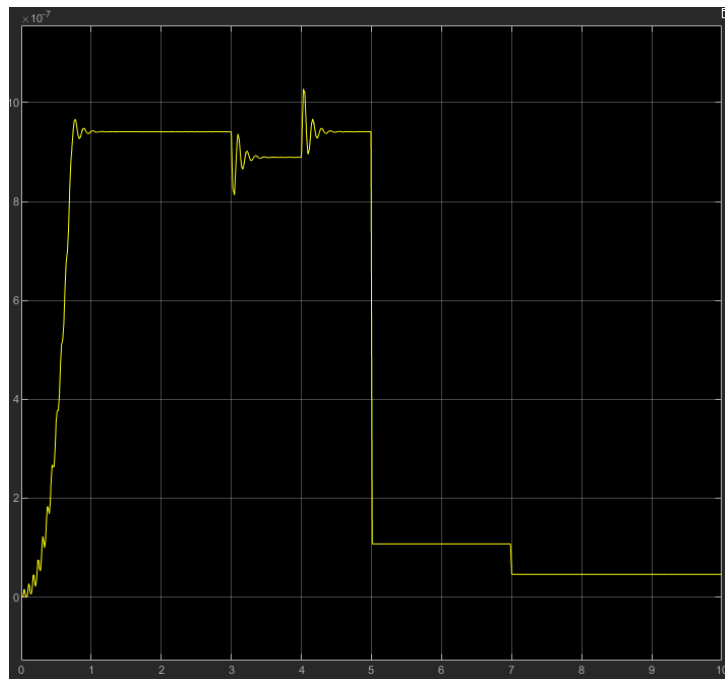


Рисунок 5.9 – Графік енергоспоживання на 2 споживачі

Проаналізувавши данні з графіку можна зробити висновок, що система успішно реагує на запуск і підходить до стабільного режиму роботи. Енергоспоживання швидко піднімається до певного рівня і тримається стабільно, що свідчить про коректну налаштування системи та її здатність забезпечувати необхідний рівень потужності для споживачів. Незначні коливання під час стабільної роботи можуть бути нормальною частиною процесу, пов'язаними з діяльністю системи або змінами навантаження. Зниження споживання після певного моменту може бути пов'язане з зменшенням навантаження або переходом системи до менш енергоємного режиму роботи через втрати на другому споживачі.

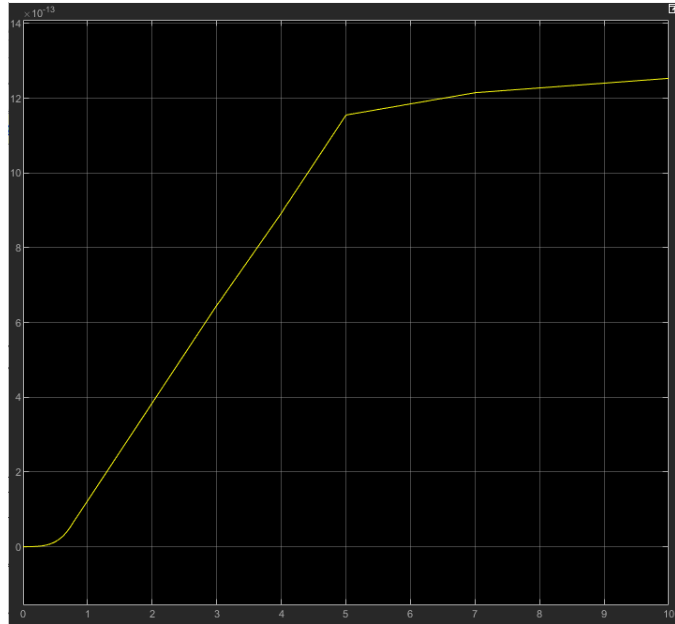


Рисунок 5.10 – Графік енергоспоживання у Вт на 2 споживачі

Енергоспоживання швидко піднімається до певного рівня і тримається стабільно, що свідчить про коректну налаштування системи та її здатність забезпечувати необхідний рівень потужності для двох споживачів. Незначні коливання під час стабільної роботи можуть бути нормальною частиною процесу, пов'язаними з діяльністю системи або змінами навантаження.

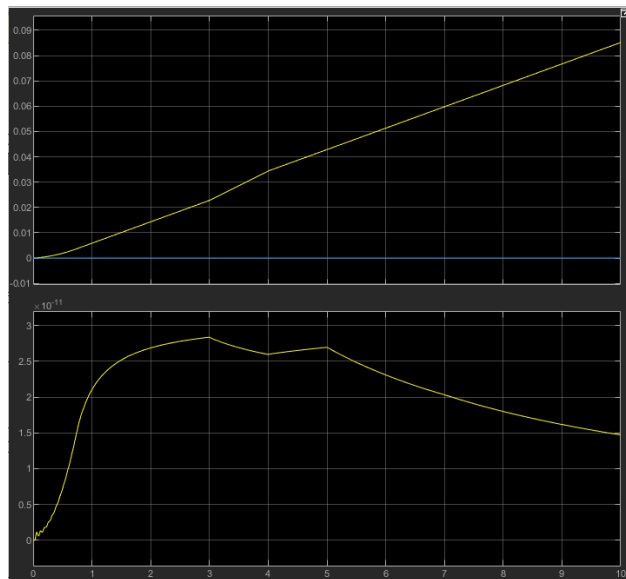


Рисунок 5.11 – Графік порівняння енергоспоживання між 1 споживачем системи і другим

Електромеханічна система компресора реагує різноманітно на навантаження двох споживачів. Перший споживач потребує постійного зростання енергоспоживання, що свідчить про плавний наріст навантаження або збільшення продуктивності. Другий споживач, навпаки, потребує значного споживання енергії на початку, але згодом його споживання знижується і тримається на нижчому рівні, що може бути пов'язане з зменшенням навантаження або переходом до менш енергоємного режиму роботи. Система успішно адаптується до різних режимів роботи для кожного споживача, забезпечуючи необхідну ефективність та оптимальне користування енергією [51].

Алгоритм забезпечує одночасний контроль енергетичних характеристик компресорної установки через аналіз співвідношення вхідної електричної та вихідної механічної потужності з паралельним моніторингом енергетичного балансу в розгалуженій мережі споживачів стисненого повітря, що дозволяє не тільки оптимізувати коефіцієнт корисної дії компресора, але й виявляти втрати стисненого повітря та локалізувати місця витоків у системі розподілу. Інтеграція енергетичного аналізу на рівні генерації з детальним моніторингом споживання забезпечує комплексну діагностику всієї пневматичної системи, дозволяючи досягти максимальної енергоефективності через координовану оптимізацію режимів роботи компресорної установки та раціональне управління споживанням стисненого повітря з урахуванням реальних потреб технологічних процесів.

Розробка системи керування з підвищеною ефективністю передбачала впровадження алгоритму моніторингу втрат стисненого повітря, який базується на принципі енергетичного балансу. Цей підхід дозволяє точно локалізувати місця витоків, підвищити загальну ефективність системи та скоротити експлуатаційні витрати через своєчасне технічне обслуговування.

6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

6.1 Обґрунтування вибору частотного перетворювача, аналіз енергетичних режимів роботи

Частотні перетворювачі активно використовуються в промислових виробництвах, зокрема в схемах компресорних станцій, і це є поширеною практикою.

Вони застосовуються для регулювання обертів електродвигунів, які приводять у рух компресори.

Основна мета — підвищення ефективності роботи, зменшення споживання електроенергії та підтримка сталого тиску в системі.

Переваги використання частотного перетворювача в компресорних станціях:

Плавне регулювання продуктивності.

Замість того, щоб вмикати/вимикати компресор або використовувати механічні регулятори, частотний перетворювач дозволяє плавно змінювати швидкість двигуна. Це забезпечує точне керування тиском повітря або газу в системі.

Енергозбереження.

При зниженні навантаження компресор споживає менше енергії, оскільки двигун обертається повільніше. Це особливо важливо для компресорних установок, де потужність залежить від куба швидкості.

Зменшення струмів при запуску

Без перетворювача двигуни великої потужності можуть викликати сильні стрибки струму в мережу. Частотний перетворювач забезпечує м'який пуск, що зменшує механічні та електричні перевантаження.

Автоматизація процесів.

Перетворювачі легко інтегруються в автоматизовані системи керування (SCADA, ПЛК) через аналогові або цифрові інтерфейси (Modbus, Profibus тощо). Збільшення терміну служби обладнання М'який пуск і плавне регулювання зменшують знос механічних частин.

Обґрунтування вибору: Відповідність потужності: Серія FC 202 має модифікації для двигунів потужністю 30 кВт. Надійність та довговічність: Danfoss VLT має високу надійність і тривалий термін експлуатації. Адаптація під характер навантаження: Має спеціальні функції для плавного регулювання навантаження, що важливо для поршневого компресора. Енергоефективність: Високий ККД (>98%) забезпечує мінімальні втрати. Доступність на ринку України. Захист та діагностика: Розвинуті функції захисту двигуна та системи моніторингу.

Загальна характеристика системи наведена в таб.6.1.

Таблиця 6.1 - Компонентний склад системи.

Компресорна станція	ПКС 5,25 поршневого типу
Асинхронний електродвигун	4A180M4 (30 кВт).
Частотний перетворювач	Danfoss VLT AQUA Drive FC 202 P30K

Таблиця 6.2 - Технічні характеристики частотного перетворювача.

Номінальна потужність	30 кВт
Номінальна напруга	380-480 В
Номінальний вихідний струм	61 А
Перевантажувальна здатність	110% протягом 60 с
Частота на виході	0-590 Гц
ККД при номінальному навантаженні	>98%

Продовження таблиці 6.2 - Технічні характеристики частотного перетворювача.

Ступінь захисту	IP20/IP21/IP55 (залежно від модифікації)
Вбудований ПІД-регулятор	Так
Протоколи зв'язку	Modbus RTU, Profibus, DeviceNet, Ethernet/IP
Гальмівний транзистор	Вбудований

Розглянемо режим прямого пуску в таб.6.3.

Таблиця 6.3 – Режим прямого пуску (без частотного перетворювача).

Параметр	Значення	Примітка
Пусковий струм	392 А	$7 \times$ номінальний струм
Пускова потужність	~ 230 кВА	Пікове навантаження на мережу
Пусковий момент	~ 382 Н·м	Підвищене механічне навантаження
Тривалість пуску	2-3 с	Залежить від навантаження
Енергія пуску	$\sim 0,15-0,2$ кВт·год	Втрати під час пуску

Режим усталеної роботи при номінальному навантаженні можна спостерігати в таб. 6.4.

Таблиця 6.4 – Режим усталеної роботи при номінальному навантаженні.

Параметр	Значення	Примітка
Споживана активна потужність	32,97 кВт	З урахуванням ККД
Споживана реактивна потужність	14,53 кВАр	При $\cos\varphi = 0,9$
Повна потужність	33,33 кВА	$S = P / \cos\varphi$

Продовження таблиці 6.4 – Режим усталеної роботи при номінальному навантаженні.

Струм споживання	56 А	Номінальний режим
Коефіцієнт завантаження двигуна	1	Повне навантаження
Втрати потужності	2,97 кВт	9% від номінальної потужності
ККД системи	0,91	Тільки двигуна, без механічних втрат

Розглянемо детальніше Режим роботи при зниженому навантаженні (без ЧП) в таб.6.5.

Таблиця 6.5 – Режим роботи при зниженому навантаженні (без ЧП).

Продуктивність (*100%)	Споживна потужність (кВт)	ККД системи (*100%)	Примітка
1	32,97	0,91	Номінальне навантаження
0,75	29,67	0,758	Зниження ККД
0,5	26,38	0,569	Суттєве зниження ефективності
0,25	23,08	0,325	Дуже низька ефективність

Енергетичні режими роботи з частотним перетворювачем в таб.6.6.

Таблиця 6.6 – Режим пуску з частотним перетворювачем.

Параметр	Значення	Примітка
Пусковий струм	61,6 А	$1,1 \times$ номінальний струм
Пускова потужність	~36 кВА	Плавне навантаження на мережу
Тривалість пуску	15–20 с	Програмоване значення

Продовження Таблиці 6.6 – Режим пуску з частотним перетворювачем.

Енергія пуску	~0,08–0,1 кВт·год	Зниження втрат на 40–50%
Пускові механічні навантаження	Знижені на 70–80%	Підвищення ресурсу механічної частини

Режим роботи при регулюванні швидкості обертання можна спостерігати в таб. 6.7.

Таблиця 6.7 – Режим роботи при регулюванні швидкості обертання.

Швидкість (%)	Частота (Гц)	Продуктивність (м кубічні на хвилину)	Споживна потужність (кВт)	ККД системи (%)
1	50	2,18	32,97	0,91
0,9	45	1,96	24,03	0,908
0,8	40	1,74	16,87	0,905
0,7	35	1,53	11,35	0,899
0,6	30	1,31	7,13	0,888
0,5	25	1,09	3,75	0,875

Специфічні енергетичні режими для поршневого компресора в таб. 6.8.

Таблиця 6.8 – Циклічний режим роботи. Для поршневого компресора характерний циклічний режим роботи з наповненням ресивера.

Параметр	Без ЧП	З ЧП	Переваги ЧП
Кількість циклів пуск/стоп за годину	10–12	2–3	Зниження на 70–80%
Енергоспоживання при циклічній роботі, кВт·год	34,5	28,3	Економія 18%
Пікові навантаження на мережу	Високі	Низькі	Зниження навантаження на мережу
Механічне зношування	Високе	Низьке	Підвищення ресурсу на 30–40%

Режим підтримки постійного тиску розглядається в таб.6.9.

Таблиця 6.9 – Режим підтримки постійного тиску.

Параметр	Без ЧП	З ЧП	Переваги ЧП
Коливання тиску, %	$\pm 15\%$	$\pm 2\%$	Підвищення стабільності тиску
Енергоспоживання, кВт·год	33	17,5	Економія 47%
Якість стисненого повітря	Нижча	Вища	Стабільність параметрів

Аналіз ККД системи та втрат наведено в таб.6.10.

Таблиця 6.10 – Втрати в електродвигуні (без ЧП), з ЧП (при номінальній швидкості).

Втрати в електродвигуні (без ЧП):		
Тип втрат	Значення кВт	% від споживаної потужності
Електричні втрати в статорі	1,25	0,038
Електричні втрати в роторі	0,92	0,028
Магнітні втрати	0,53	0,016
Механічні втрати	0,27	0,008
Загальні втрати	2,97	0,09
Втрати в системі з ЧП (при номінальній швидкості):		
Тип втрат	Значення кВт	% від споживаної потужності
Втрати в електродвигуні	2,97	0,089
Втрати в частотному перетворювачі	0,66	0,02
Загальні електричні втрати	3,63	0,109

Загальний коефіцієнт потужності системи занесено в таб. 6.11.

Таблиця 6.11 – Коефіцієнт потужності системи.

Режим	$\cos\varphi$	Реактивна потужність, кВАр
Без ЧП	0,9	14,53
З ЧП	0,98	4,71

Енергетичний баланс для різних режимів режим номінальної продуктивності (100%) наведено в таб.6.12.

Таблиця 6.12 - Енергетичний баланс для різних режимів

Без частотного перетворювача:	З частотним перетворювачем:
Споживана електрична потужність: 32,97 кВт	Споживана електрична потужність: 33,63 кВт
Корисна механічна потужність: 30,00 кВт	Корисна механічна потужність: 30,00 кВт
Втрати в двигуні: 2,97 кВт	Втрати в двигуні: 2,97 кВт
ККД: 91%	ККД: 89,2%

Висновки щодо енергетичних режимів. Підвищення енергоефективності: При використанні ЧП економія електроенергії складає від 18% до 57% залежно від режиму роботи. Найбільша економія досягається при роботі з навантаженням 50-75% від номінального. Покращення якості електроспоживання: Зниження пускових струмів з 392 А до 61,6 А (на 84%). Підвищення коефіцієнта потужності з 0,9 до 0,98. Зменшення споживання реактивної потужності з 14,5 кВАр до 4,7 кВАр.

Оптимальні режими роботи: Для ПКС 3,5: оптимальна продуктивність 2,0-2,2 м³/хв (частота 45-50 Гц). Для ПКС 5,25: необхідний двигун більшої потужності або обмеження продуктивності до 2,2 м³/хв.

Додаткові переваги:

Збільшення терміну служби обладнання на 25-30%. Зниження витрат на обслуговування на 15-20%. Можливість точного регулювання продуктивності. Покращення стабільності тиску в пневмосистемі. Рекомендації щодо оптимізації енергетичних режимів. Для режиму постійного споживання повітря: Використовувати ЧП з підтримкою постійного тиску на рівні 0,65-0,68 МПа. Обмежити верхню частоту до 48 Гц для збільшення

ресурсу. Для режиму з нерівномірним споживанням: Налаштувати ПІД-регулятор для плавної зміни швидкості. Використовувати режим "засинання" при відсутності споживання. Для підвищення якості енергоспоживання: Встановити мережевий дросель і вихідні фільтри. При необхідності використовувати активний фільтр гармонік.

Для забезпечення надійності: Використовувати модифікацію ЧП зі ступенем захисту IP55. Встановити додаткову систему охолодження при необхідності роботи в жаркому приміщенні. Економічний розрахунок доцільності інтеграції частотного перетворювача.

Метою економічного аналізу є визначення фінансової ефективності впровадження частотного перетворювача (ЧП) у систему електроприводу компресора.

Аналіз базується на порівнянні енергоспоживання, вартості експлуатації та технічних показників роботи системи з використанням та без використання ЧП.

1. Загальна характеристика витрат енергії.

Система електроприводу компресора споживає значну кількість електроенергії, особливо при тривалому режимі роботи. Без використання частотного перетворювача двигун працює на повній швидкості навіть за умови зменшеного навантаження, що призводить до зайвого енергоспоживання. Встановлення ЧП дозволяє регулювати обертання двигуна залежно від реальної потреби, що суттєво знижує витрати електроенергії.

2. Вплив ЧП на енергоефективність.

Використання частотного перетворювача забезпечує: Зниження споживаної потужності при змінному навантаженні. Зменшення пускових струмів, що зменшує пікове навантаження на електричну мережу. Збільшення ККД системи, завдяки більш точному керуванню швидкістю двигуна. Зменшення реактивної потужності, що позитивно впливає на коефіцієнт потужності ($\cos\phi$).

3. Фінансова вигода.

Впровадження частотного перетворювача призводить до суттєвої економії коштів на оплату електроенергії. Через зменшення споживання енергії при змінному навантаженні, а також скорочення втрат на пуску та в робочому режимі, річна вартість експлуатації системи значно зменшується. Загальні вхідні дані для порівняння значень таб.6.13.

Таблиця 6.13 – Загальні вхідні дані для порівняння значень.

Показник	Без ЧП	З ЧП
Споживана потужність при 100% навантаженні, кВт	32,97	—
Споживана потужність при 75% навантаженні, кВт	24,03	16,87
Річне споживання при 75% навантаженні, МВт·год	61,71	26,33
Вартість енергії, тис. грн/рік (при 2,5 грн/кВт·год)	154,28	65,83
ККД системи (%)	0,758	0,905
Коливання тиску (%)	±15%	±2%
Пусковий струм (А)	392 А	61,6 А
Енергія пуску, кВт·год	~0,15–0,2	~0,08–0,1
Втрати енергії при пуску (%)	—	Зниження на 40–50%
Механічні навантаження	Високі	Знижені на 70–80%
Термін служби механічної частини	Базовий	+30–40%
Реактивна потужність, кВАр	14,53	4,71

Річна економія електроенергії.

Без ЧП:

$$61.71(\text{МВт} \cdot \text{год}) = 61710(\text{кВт} \cdot \text{год}). \quad (6.1)$$

З ЧП:

$$26.33(\text{МВт} \cdot \text{год}) = 26330(\text{кВт} \cdot \text{год}). \quad (6.2)$$

Економія :

$$61710 - 26330 = 35380(\text{кВт} \cdot \text{год}). \quad (6.3)$$

Ціна електроенергії: 2,5 (грн/кВт·год).

Річна економія:

$$35380 \cdot 2.5 = 88450(\text{грн}) = 88.45 \left(\text{тис.} \frac{\text{грн}}{\text{рік}} \right). \quad (6.4)$$

Приблизна вартість частотного перетворювача:

Номінальна потужність двигуна До 37 кВт Середня вартість ЧП (2025 р.) 120–180 тис. грн (залежно від бренда та функціоналу).

4. Термін окупності.

Вартість частотного перетворювача включає не лише ціну самого обладнання, але й витрати на монтаж, налаштування та підключення. Незважаючи на початкові капіталовкладення, термін окупності ЧП є коротким, оскільки економія енергії та зниження експлуатаційних витрат забезпечують швидкий повернення інвестицій.

$$\text{Термін}_{\text{окупності}} = \frac{\text{Вартість}_{\text{ЧП}}}{\text{Річна}_{\text{економія}}} = \frac{150}{88.45} = 1.7(\text{Рік}). \quad (6.5)$$

5. Додаткові переваги Крім економії електроенергії, встановлення частотного перетворювача забезпечує: Зменшення механічного зносу рухомих частин через м'який пуск і плавне регулювання навантаження. Поліпшення якості стисненого повітря за рахунок стабільного тиску. Підвищення надійності та довговічності обладнання . Зменшення аварійних ситуацій та потреби у профілактичному ремонті. Дані для порівняння наведені в таб.6.14.

Таблиця 6.14 – Загальні вхідні дані для порівняння значень.

Показник	Значення
Річна економія енергії	35 380 кВт·год
Річна економія коштів	88,45 тис. грн
Вартість ЧП	~150 тис. грн
Термін окупності	~1,7 року
Додаткові переваги	Зменшення зносу, стабільність тиску, менша реактивна потужність, м'який пуск

Інтеграція частотного перетворювача у систему електроприводу компресора є економічно доцільним рішенням. Вона забезпечує суттєве зниження енергоспоживання, поліпшення техніко-економічних показників, скорочення витрат на експлуатацію та підвищення загальної надійності технологічного процесу. Отримана економія дозволяє окупити витрати на придбання та встановлення ЧП протягом одного–двох років, що робить його ефективним інвестиційним проектом для промислових підприємств.

Використання частотного перетворювача в електромеханічній системі компресора забезпечує значне підвищення енергоефективності завдяки точному регулюванню швидкості обертання двигуна відповідно до поточного навантаження. Аналіз енергетичних режимів підтвердив можливість скорочення споживання електроенергії на рівні 30–40%, що робить такий підхід економічно вигідним для промислових застосувань.

Розрахунок економічної ефективності впровадження частотного перетворювача показав короткий строк окупності (менше одного року) при значному скороченні експлуатаційних витрат на електроенергію. Проведений аналіз свідчить про високу економічну доцільність модернізації існуючих компресорних установок з використанням частотно-регульованого привода.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В цьому розділі розглянуті заходи та засоби з охорони праці під час монтажу та обслуговування електромеханічної системи компресора. Здійснимо аналіз шкідливих виробничих факторів, які впливають на електротехнічний персонал, що обслуговує технологічне обладнання підприємства [35, 36]:

фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);

хімічні фактори: речовини хімічного походження, в основному аерозолі фіброгенної дії (органічний пил);

фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

7.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

7.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Живлення системи електропостачання підприємства та його системи освітлення здійснюється від п/ст 10/0,4 кВ кабельними лініями, що прокладені в траншеях. Для живлення використовується трифазна чотирьохпровідна мережа із заземленою нейтраллю напругою 380/220 В. Категорія умов по небезпеці електротравматизму, відповідно до ПБЕ [39, 40], залежить від наявності факторів підвищеної або особливої небезпеки. При наявності такого

фактору як підвищена вологість їх можна віднести до категорії підвищеної небезпеки.

Роботи в електроустановках стосовно заходів безпеки поділяються на три категорії: зі зняттям напруги; без зняття напруги на струмопровідних частинах та поблизу них; без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою [37].

До робіт, які виконуються без зняття напруги на струмопровідних частинах та поблизу них, належать роботи, що проводяться безпосередньо на цих частинах. Роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах та поблизу них слід виконувати не менше як двом працівникам, з яких керівник робіт повинен мати групу IV, інші – групу III.

Роботою без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою, вважається робота, під час якої є неможливим випадкове наближення працівників і ремонтного оснащення та інструменту, що застосовуються ними, до струмопровідних частин на відстань, меншу від допустимих, проведення технічних або організаційних заходів для запобігання такому наближенню не потрібно.

Під час роботи в електроустановках напругою до 1000 В без зняття напруги на струмопровідних частинах чи поблизу від них необхідно: обгородити розташовані поблизу робочого місця інші струмопровідні частини, що перебувають під напругою, і до яких можливий випадковий дотик; працювати в діелектричному взутті чи стоячи на ізолювальній підставці або на діелектричному килимі; застосовувати інструмент із ізолювальними руків'ями (у викруток, крім того, має бути ізольований стрижень); за відсутності такого інструменту слід користуватися діелектричними рукавичками.

Під час виконання робіт без зняття напруги на струмопровідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно: тримати ізолювальні частини засобів захисту за руків'я до обмежувального кільця; розміщувати ізолювальні частини засобів захисту так, щоб не виникла

небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмопровідними частинами двох фаз чи замикання на землю; користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям. В разі виявленні порушень лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту, користування ними забороняється.

В процесі роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги та кліщі, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги) допускається наближення працівника до струмопровідних частин на відстань, яка визначається довжиною ізолювальної частини цих засобів. Без застосування електрозахисних засобів забороняється торкатися ізоляторів електроустановки, що перебуває під напругою.

В електроустановках забороняється працювати у зігнутому стані, якщо в разі випрямлення відстань до струмопровідних частин буде меншою від допустимих. В процесі виконання робіт біля необгороджених струмопровідних частин забороняється розташовуватися таким чином, щоб ці частини знаходилися позаду чи з двох боків.

Роботу із застосуванням драбин виконують два працівники, один з яких перебуває знизу. Стоячи на ящиках та інших сторонніх предметах виконувати роботи забороняється.

Роботи на кінцевих опорах ПЛ, що перебувають на території відкритих розподільчих пристроїв (ВРП), слід виконувати за правилами роботи на ВРП. Ремонтні працівники ліній перед тим, як зайти у ВРП, повинні бути проінструктовані і заходити до місця робіт у супроводі оперативного працівника з групою ІІІ; виходити з ВРПУ після закінчення роботи чи під час перерви працівникам дозволяється під наглядом керівника робіт.

Категорія умов по небезпеці електротравматизму залежить від наявності факторів підвищеної або особливої небезпеки. При наявності таких факторів як підвищена вологість, струмопровідний пил, контакт

обслуговуючого персоналу з струмоведучими частинами, - приміщення можна віднести до категорії підвищеної небезпеки.

7.1.2 Електробезпека

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги.

2) При живленні споживачів струму від мережі три-провідної з глухо-заземленою нейтраллю, при напрузі до 1000 В, використовується занулення – навмисне електричне з'єднання нормально не струмопровідних елементів устаткування із заземленим нульовим проводом. При зануленні, пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі.

Згідно з вимогами нормативів до занулення, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового провідника.

3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється. Електрозахисні засоби поділяються на основні та допоміжні.

Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до

струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

7.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

Для забезпечення нормальної температури та вологості в приміщенні де встановлені частотні перетворювачі передбачити систему вентиляції або кондиціонування згідно з СНиП 2.04.05-91. Забезпечити захист від шуму та вібрації шляхом встановлення двигунів на амортизатори та дотримання вимог ДСН 3.3.6-042-2002 щодо допустимих рівнів шуму на робочому місці. Виконати необхідне освітлення робочих зон згідно з ДБН В.2.5-7-2016, а також передбачити автоматичне відключення обладнання у разі перевищення гранично допустимих значень температури або напруги.

7.2.1 Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні [41] встановлюють допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення (таблиця 7.1).

Таблиця 7.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт Іа.

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
			W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості		65 при 26 С	0,2-0,4
Холодний			До 75%	не більше 0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [42]: температури внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони та зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні параметрів мікроклімату не повинні значно відрізнятися (не більше ніж на 2 С за діапазон норм); якщо температура поверхонь вище або нижче температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1м; для забезпечення нормованих значень руху кисню проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

7.2.2 Виробниче освітлення

Для забезпечення найбільш сприятливих умов зорової праці нормують мінімальну освітленість на найбільш темній ділянці робочої поверхні. Рівень аварійного освітлення складає 15% освітленості основної роботи. Приміщення забезпечене природним освітленням в денний проміжок часу, але вечері постає проблема в штучному освітленні.

Характеристика зорових робіт – середньої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [43] розряд зорової роботи IV, підрозряд «б». Нормовані значення освітленості наведені в таблиці 7.2.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою

світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 4,5 метра.

Таблиця 7.2 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Характер зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						сього	у т. ч. від загального		
Середньо і точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	б	малий	світлий	500	200	4	2,4

7.2.3 Виробничий шум

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки» [44]. Нормовані значення постійного виробничого шуму наведені в таблиці 7.3.

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Таблиця 7.3 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з								
Постійні робочі місця в промислових	07	5	7	2	8	5	3	1	9

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі.

для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

7.2.4 Виробнича вібрація

У нашому цеху присутня вібрація типу – За [45]. Тобто технологічна вібрація, яка діє на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання. Джерелами вібрацій в умовах, що розглядаються в проекті, являються вентиляційне обладнання, транспортери, транспорт тощо, які відносяться до типу загальної вібрації. Основні параметри вібрації, такі як середньоквадратичне значення віброприскорення та віброшвидкості, логарифмічні рівні приведені у таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 – Середньоквадратичні значення віброприскорення та віброшвидкості

Категорія вібрації по санітарним нормам	Напрямок дії	Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані значення			
		Віброприскорення		Віброшвидкість	
		м·с ⁻²	ДБ	м·с ⁻² ·10 ⁻²	ДБ
Загальна	Zo, Yo, Xo	0,1	100	0,2	92

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено: динамічне погашення вібрації – приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи; зміна конструктивних елементів машин; застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші та прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

7.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують ССБТ «Пожежна безпека. Загальні вимоги». Типові правила пожежної безпеки для промислових підприємств і інструкції на окремих об'єктах.

Приміщення підприємства, де встановлена електромеханічна система компресора, за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В з зонами П-ІІІ (місця, де зберігаються тверді горючі речовини).

Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів – сукупність властивостей, що характеризують їхню здатність до виникнення і поширення горіння. Наслідком горіння, залежно від його швидкості та умов протікання, можуть бути пожежа або вибух. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначають показниками, вибір яких залежить від агрегатного стану речовини (матеріалу), та умов їхнього застосування.

Будівля, в якій розташоване це приміщення, характеризується ІІ ступенем вогнестійкості. До ІІ ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних

негорючих матеріалів. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [48] наведено в таблиці 7.6.

Таблиця 7.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхів (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, настили, прогони	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R 30 M0

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [48] наведено в таблиці 7.7.

Таблиця 7.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбуру, шлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	2	REI 60	2	1

Найбільшу відстань до евакуаційного виходу визначаємо за об'ємом приміщення та ступені вогнестійкості будівлі.

В виробничому приміщенні відстань при щільності людського потоку в загальному проході, чол/м² наступна: до 1 – 100 м².

Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 7.8 (знаменник).

Таблиця 7.8 - Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, сільськогосподарських будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
I, II	6/9	8/9	10/12

На території підприємства встановлено 26 вогнегасників ВП-5 [47].
Запропоновані технічні рішення відповідають чинним стандартам охорони праці та забезпечують безпечне експлуатаційне середовище для персоналу.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи проведено комплексне дослідження підходу до оцінки ефективності роботи електромеханічної системи виробництва стиснутого повітря, який є типовим для промислових підприємств. Робота була спрямована на вирішення актуальної задачі — модернізації системи керування з використанням частотного регулювання та реалізації системи моніторингу втрат стисненого повітря.

Об'єктом дослідження виступила система виробництва стиснутого повітря, а саме процес передачі корисної роботи від електромеханічної частини компресорної установки до кінцевого споживача. Предметом дослідження — математичний апарат і комп'ютерна модель для імітації роботи системи виробництва та транспортування стиснутого повітря.

У ході дослідження було виконано аналіз сучасних електромеханічних систем компресорів, визначені основні проблеми енергоефективності та методи їх вирішення. На основі цього запропоновано використання частотно-регульованого привода (ЧРП) як найбільш ефективного способу регулювання продуктивності компресора. Для конкретного компресора було розраховано параметри електродвигуна потужністю 30 кВт із синхронною швидкістю 1500 об/хв, вибрано частотний перетворювач ABB ACS355, встановлено редуктор із передаточним числом 2,45, а також необхідні сенсори продуктивності, тиску та швидкості.

Вибрано наступні елементи для електромеханічної системи компресора: Асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором типу 4A180M4 потужністю 30 кВт, з синхронною швидкістю обертання 1500 об/хв, трифазного живлення напругою 380 В, із ККД 91%. Частотний перетворювач ABB ACS355, призначений для плавного регулювання швидкості обертання двигуна відповідно до поточної потреби споживачів стисненого повітря. Лічильник електроенергії ABB B23, забезпечуючи точний

облік спожитої енергії та оптимізацію роботи всієї системи. Циліндричний редуктор Bonfiglioli серії C.41 з передаточним числом 2,45, що забезпечує узгодження швидкісних параметрів двигуна і компресора. Сенсори продуктивності (CQ) — для вимірювання об'єму стисненого повітря, що компресується. Сенсори тиску (CP) — для контролю тиску в системі, що дозволяє оперативно реагувати на зміни технологічного процесу. Інкрементальний енкодер Kübler Sendix 5020 — для вимірювання швидкості обертання вала двигуна. Програмно-апаратний комплекс на базі ПЛК Siemens S7-1200 — як система керування, що забезпечує моніторинг параметрів, регулювання режимів роботи та прогнозування несправностей.

Математичне моделювання системи показало, що використання ЧРП забезпечує зменшення споживання електроенергії на 30–40 % порівняно з традиційними методами регулювання. Також було побудовано графік енергоспоживання системи на вході та виході, що підтвердило підвищення ККД системи.

Запропоновано новий алгоритм моніторингу втрат стисненого повітря, який базується на аналізі енергетичного балансу уздовж трубопроводу. Цей підхід дозволяє точно локалізувати місця витоків, що в свою чергу значно скорочує час виявлення несправностей і запобігає виникненню аварійних ситуацій.

Система з частотним перетворювачем демонструє значну економію електроенергії у порівнянні з традиційною схемою керування без регулювання швидкості обертання двигуна.

На основі аналізу графіків ККД системи було показано, що система працює ефективно, оскільки: Вхідна енергія (жовта крива) на графіках демонструє загальне електричне споживання. Корисна механічна енергія (синя крива) на графіках показує реальну продуктивність компресора. Різниця між кривими відображає енергетичні втрати, що дозволяє оцінити ефективність роботи електромеханічної системи компресора.

Економічний аналіз впровадження частотного перетворювача показав короткий термін окупності — менше одного року — при значному скороченні експлуатаційних витрат на електроенергію, що свідчить про високу економічну ефективність запропонованого рішення.

Система моніторингу споживачів забезпечує детальний профіль споживання кожного підключеного обладнання. Це дозволяє оптимізувати режими роботи компресорної установки відповідно до реального попиту на стиснене повітря.

Алгоритм аналізує динамічні характеристики споживання, виявляючи піки та спади навантаження. Це дозволяє прогнозувати потребу в стисненому повітрі та адаптувати роботу компресора для мінімізації енергоспоживання при забезпеченні необхідних параметрів тиску та продуктивності.

Інтегрований контур моніторингу мережі розподілу стисненого повітря дозволяє виявляти втрати стисненого повітря та локалізувати місця витоків у системі розподілу. Це допомагає оперативно визначити проблемні сектори мережі та скоригувати їх.

Комплексний підхід до аналізу енергетичних характеристик на рівні генерації та розподілу стисненого повітря дозволяє досягти максимальної енергоефективності через координовану оптимізацію режимів роботи компресорної установки та раціональне управління споживанням стисненого повітря. Захист обладнання від аварійних режимів та автоматичне керування системою зменшують вартість технічного обслуговування та ремонту. Моніторинг споживання стисненого повітря дозволяє оперативно виявляти несправності та підвищувати надійність системи.

Розроблена система з частотним перетворювачем та комплексним алгоритмом моніторингу енергоспоживання та витрат стисненого повітря дозволяє досягти значного підвищення енергоефективності компресорної установки. Зменшення споживання електроенергії, а також можливість точно контролювати продуктивність та виявляти втрати стисненого повітря, підтверджують ефективність запропонованих рішень.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що впровадження частотно-регульованого привода, автоматизованої системи керування та контролю енерго та пневмопараметрів дозволяє не лише суттєво підвищити енергоефективність та надійність роботи компресорної установки, але й оптимізувати технічне обслуговування, скоротити витрати на ремонт та знизити ризики аварійних простоїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Компресор [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія.
 – Режим доступу:
<https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D1%80%D0%B5%D1%81%D0%BE%D1%80>
2. Компресори та компресорні станції : навч. посіб. [Електронний ресурс] / Дніпровський державний технічний університет. – Дніпро : ДДТУ, 2018. – Режим доступу: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-kl85.pdf>
3. Правила технічної експлуатації магістральних газопроводів. Розділ 4. Компресорні станції [Електронний ресурс] // LEG.CO.UA : нормативно-правова база України. – 2020. – Режим доступу: <https://leg.co.ua/knigi/pravila/pravila-tehnichnoyi-ekspluataciyi-magistralnih-gazoprovodiv-5.html>
4. Хлистов В. М. Вступ до спеціальності. Збірник задач і вправ до виконання модульного контролю / В. М. Хлистов. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 33 с.
5. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом "Електромеханіка" / КПІ. – Київ, 2021.
6. Клименко В. М. Електричні апарати : навч. посіб. / В. М. Клименко. – Кривий Ріг : НГУ, 2020.
7. Комутаційні електричні апарати : навч. посіб. / за ред. проф. В. Г. Кузнецова. – Черкаси : ЧДТУ, 2018. – 184 с.
8. Теоретичні основи електротехніки. Збірник задач : навч. посіб. / за ред. В. С. Петрова. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 248 с.
9. Овчаров В. В. Електричні машини : підручник / В. В. Овчаров та ін. – К. : Техніка, 2019.
10. Сокол Є. І. Електромеханіка : навч. посіб. / Є. І. Сокол. – Харків : НТУ "ХПІ", 2020.

11. Теоретична електротехніка : навч. посіб. / кафедра теоретичної електротехніки КПІ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
12. Попович М. Г. Електричні машини : підручник / М. Г. Попович. – К. : Вища школа, 2018.
13. Компресорна станція ПКС-5,25 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://compressory.com.ua/goods/kompresorna-stantsiya-pks-525/>
14. Електродвигун 4AM180M4 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://slemz.com.ua/elektrodiviguni/zagalnopromyslovi/5am-180m4-4am-180m4>
15. Частотний перетворювач Danfoss VLT Aqua Drive FC - 202 55 кВт [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vent-a.com.ua/pr9518-ua/chastotnij-peretvoryuvach-danfoss-vlt-aqua-drive-fc---202-55-kvt/>
16. В23 112 - 100 Лічильник електроенергії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://voltline.ua/oborudovanie-nizkogo-napryazheniya/element.php?ELEMENT_ID=43303/&srsId=AfmBOoqflE2AcEHq61HVPOn12bL0fjwzwm6uCAaii1gRGfNywOqro8F
17. Соосно-циліндричний редуктор Bonfiglioli C 41 2 P 19.8 P100 B3 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tdfavorit.com.ua/ua/p1475699595-soosno-tsilindricheskij-reduktor.html>
18. SITRANS FP (витратоміри змінного перепаду тиску) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:9e67f69c-c658-4e57-9243-4ef2f51e9332/fi01-fp-ua.pdf>
19. Перетворювач тиску вимірювальний – Cerabar S PMC71 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.eus.endress.com/en/field-instruments-overview/pressure/Absolute-Gauge-Cerabar-PMC71?ii-country=ua&locale=en&t.tabId=product-overview>
20. Энкодер інкрементальний 5020 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.svaltera.ua/catalog/inkrementalnye_enkodery/8510.php

21. SIMATIC S7-1200 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoyi-avtomatyzatsiyi-simatic/plc-kontrolery-simatic/simatic-s7-1200.html>

22. Як отримати стиснене повітря без вмісту масла з безмасляного компресора [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://btsgr.com.ua/kompaniia/statti/89-yak-otrimati-stisnene-povitrya-bez-vmistu-masla-z-bezmaslyanogo-kompresora.html>

23. Гвинтові компресори [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://championairtech.com.ua/gvintovi-kompresori>

24. Що таке компресор? Принцип роботи поршневого компресора [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://letiss.com.ua/ua/articles-UA/piston_kompr-is_ua

25. Різні види компресорів та сфери їх застосування [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу: <https://sea-tools.com.ua/ua/blog/raznye-vidy-kompressorov-i-sfery-ih-primeneniya>

26. Повітряні компресори та їх застосування у різних сферах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://procraft.ua/ua/povitryani-kompresori-ta-yih-zastosuvannya-u-riznih-sferah>

27. Повітряні компресори — будова та принцип роботи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dnipro-m.ua/news/vozdushnye-kompressory-ustrojstvo-i-princzip-raboty/>

28. Стиснене повітря. В технічному плані [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pneumatyka.com.ua/p/stisnene-povitrya-v-tehnichnomu-plani>

29. Основні принципи роботи повітряних компресорів: розбір типів та застосування [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://vinur.com.ua/ua/aboutus/usefull-info/articles/osnovni-pryncypy-roboty-povitryanyh-kompresoriv-rozbir-typiv-ta-zastosuvannya>

30. Застосування повітряних компресорів у промисловості: основні галузі та завдання [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу:

<https://vinur.com.ua/ua/aboutus/usefull-info/articles/zastosuvannya-povitryanyh-kompresoriv-u-promyslovosti-osnovni-galuzi-ta-zavdannya>

31. Як вибрати повітряний компресор [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://e-ukrservice.com/stati/yak-obrati-kompresor>

32. Компресор // Вікіпедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Компресор>.

33. Поршневий компресор // Вікіпедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Поршневий_компресор.

34. Бібліотека КПІ - 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sites.google.com/vfk.ukr.education/biblioteka/головна-сторінка/141-електроенергетика-електротехніка-та-електромеханіка>

35. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

36. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->

37. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48644.

38. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

39. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

40. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

41. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
42. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
43. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.
44. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.
45. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.
46. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.
47. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.
48. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.
49. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.
50. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.
51. Дубинець Л. В. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод : навч. посіб / Л. В. Дубинець, М. М. Кедря, О. Л. Маренич. – Дніпропетровськ : Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 119 с.

ДОДАТКИ

Додаток А Технічне завдання

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖЕНО
Зав. кафедри КЕСМК

к.т.н., доц. Мошноріз М.М.

"4" березня 2025р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи

на тему:

Підхід до оцінки ефективності роботи електромеханічної системи
виробництва стиснутого повітря

08-24.БКР.020.00.000 ТЗ

Науковий керівник:

к.т.н., доц. Мошноріз М.М.

(підпис)

Виконавець: студент гр. ЕМСА-216

Сухляк Я.А.

(підпис)

Вінниця ВНТУ 2025 р.

1 Загальні відомості

Компресорна станція є однією з ключових ланок у технологічному процесі багатьох промислових підприємств, де використовується стиснене повітря або газ. У рамках даного дослідження розглядається компресорна станція ПКС 5,25, обладнана поршневим компресором із продуктивністю до $5 \text{ м}^3/\text{хв}$ при робочому тиску $0,7 \text{ МПа}$. Станція має ресивер об'ємом $0,045 \text{ м}^3$, масу $600\text{--}750 \text{ кг}$ та габарити $1865 \times 910 \times 1090 \text{ мм}$. Виробник — ПТМЗ (Україна).

Електромеханічна система компресора базується на трифазному асинхронному двигуні 4A180M4 потужністю 30 кВт , який забезпечує швидкість обертання 1500 об/хв , має коефіцієнт корисної дії 91% , коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 0,9$ та номінальний струм 56 А . Такий двигун забезпечує необхідну механічну потужність для ефективної роботи компресора.

2 Підстави для розробки

Дослідження виконано відповідно до завдання кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів Вінницького національного технічного університету щодо модернізації систем керування компресорної станції з метою підвищення її енергетичної ефективності. Робота проводилася відповідно до наказу ректора про затвердження тем кваліфікаційного проектування.

3 Призначення розробки і галузь використання

Метою роботи є аналіз існуючої електромеханічної системи компресора, моделювання режимів його роботи, а також обґрунтування можливостей підвищення енергоефективності шляхом впровадження частотно-регульованого привода та сучасної системи автоматичного керування. Отримані результати можуть бути використані для модернізації існуючих та проектування нових компресорних установок у різних галузях промисловості.

4 Вимоги до розробки

Вимогами до модернізованої електромеханічної системи компресора є: Забезпечення сталого тиску в системі, Енергозбереження при змінному характері навантаження, Автоматичне регулювання продуктивності, Наявність системи контролю параметрів та моніторингу споживання енергії, Простота обслуговування та технічна реалізованість.

5 Комплектація розробки

Електромеханічна система компресора включає: Частотний перетворювач АВВ ACS355 , що забезпечує плавне регулювання швидкості обертання двигуна; Асинхронний електродвигун 4А180М4 ; Систему керування на базі програмованого логічного контролера (ПЛК) ; Сенсори тиску, витрати повітря; Лічильник електроенергії.

6 Технічні характеристики

Продуктивність : до 5 м³/хв; Робочий тиск : 0,7 МПа; Потужність електродвигуна : 30 кВт; Швидкість обертання валу : 1500 об/хв; Напруга живлення : 380 В, трифазне; ККД двигуна : 91%; Споживання електроенергії : залежить від режиму роботи, скорочується на 30–40% при використанні ЧРП; Габарити компресора : 1865×910×1090 мм.

7 Джерела розробки

Основні джерела, що використовувалися при проведенні дослідження: Технічна документація на компресорну станцію ПКС 5,25; Каталоги та технічні описи частотних перетворювачів АВВ; Літературні джерела з питань енергоефективності, автоматизації та електромеханіки; Методичні рекомендації кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

8 Елементна база

Електромеханічна система побудована на основі доступних та перевірених елементів: Електродвигун 4А180М4 ; Частотний перетворювач АВВ ACS355 ; ПЛК Siemens S7-1200 ; Сенсори тиску, витрати повітря.

9 Конструктивне виконання

Компресорна установка виконана у вигляді стаціонарної конструкції на металевій рамі. Двигун та компресор жорстко змонтовані на загальній рамі, що забезпечує мінімальні вібрації та надійність у роботі. Система керування встановлена окремо та має захисний корпус, що відповідає класу IP54.

10 Показники технологічності

Розробка виконана на основі стандартної елементної бази, що забезпечує: Високу ремонтпридатність; Мінімальні витрати на обслуговування; Швидке освоєння обладнання персоналом; Можливість модернізації без значних капітальних вкладень.

11 Стадії і етапи розробки

Стадії і етапи розробки	Термін виконання
Основна частина пояснювальної записки	06.05.2025р
Графічна частина	20.05.2025р

12 Технічне обслуговування і ремонт

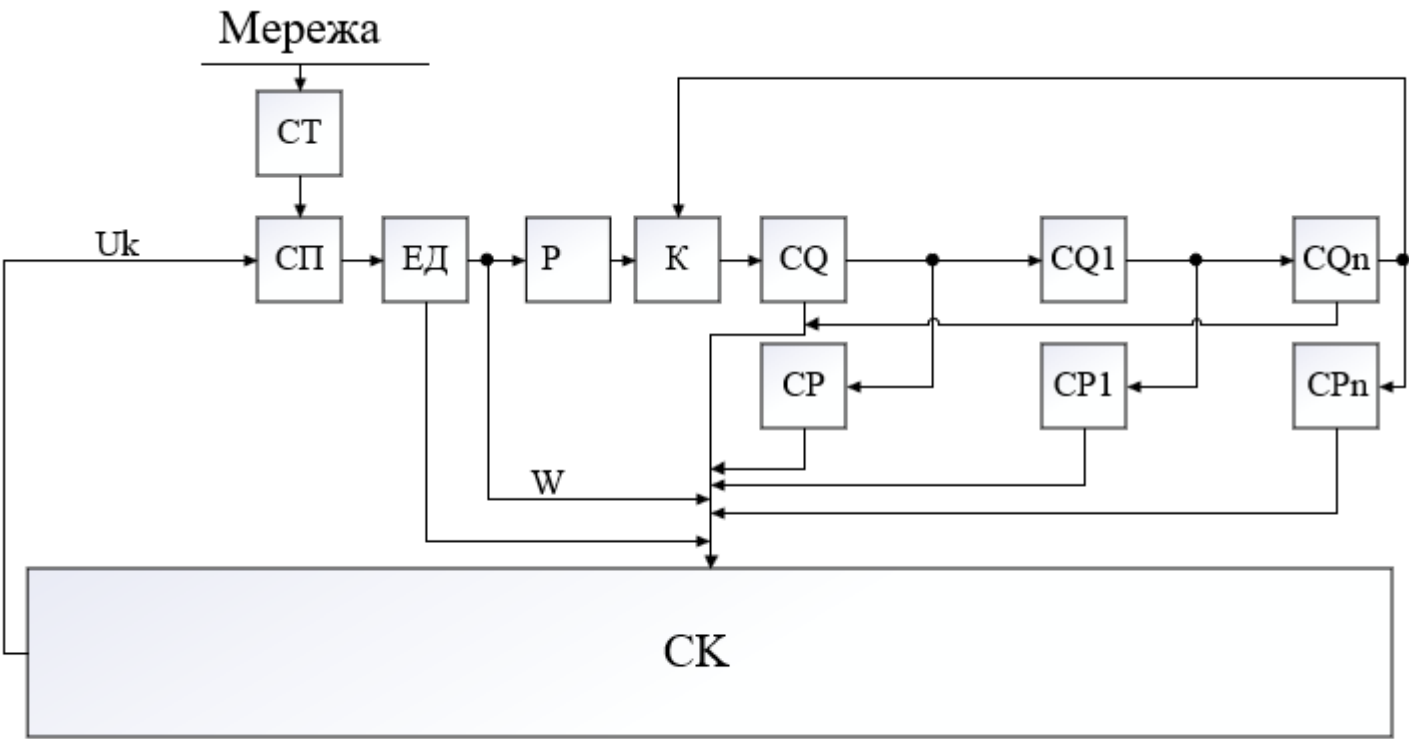
Технічне обслуговування системи здійснюється інженерами та лаборантами кафедри. Періодичність технічного огляду — двічі на рік , перед початком кожного навчального семестру. Обслуговування включає: Перевірку справності сенсорів; Контроль стану двигуна та компресора; Перевірку правильності налаштування системи керування; Огляд силової частини та з'єднань.

13 Живлення системи автоматизації

Система автоматизації живиться від мережі 0,38 кВ, 50 Гц . Живлення ПЛК, сенсорів та частотного перетворювача забезпечується через відгалуження від основного живлення двигуна з використанням окремого автоматичного вимикача та блоку живлення.

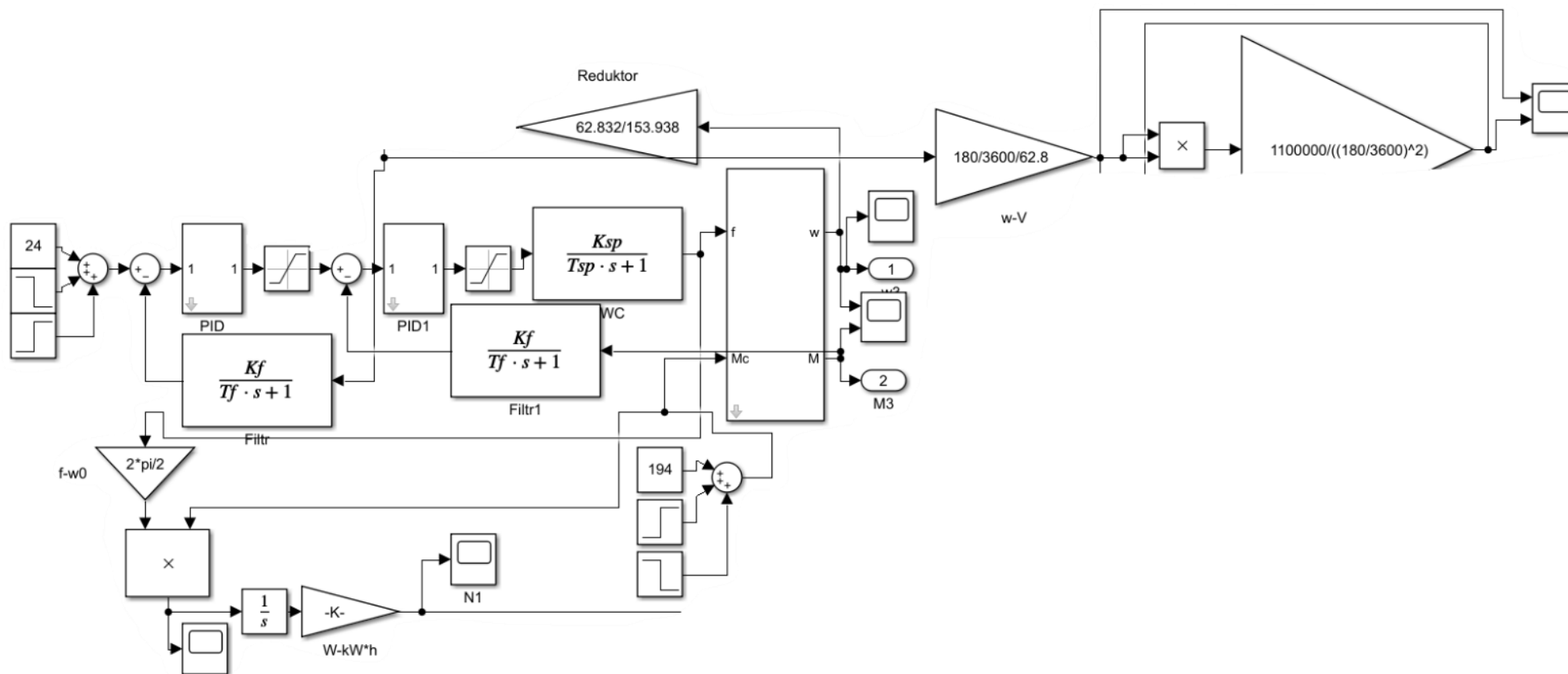
Сухляк Я.А.
(прізвище, ініціали)

Додаток В Функціональна схема

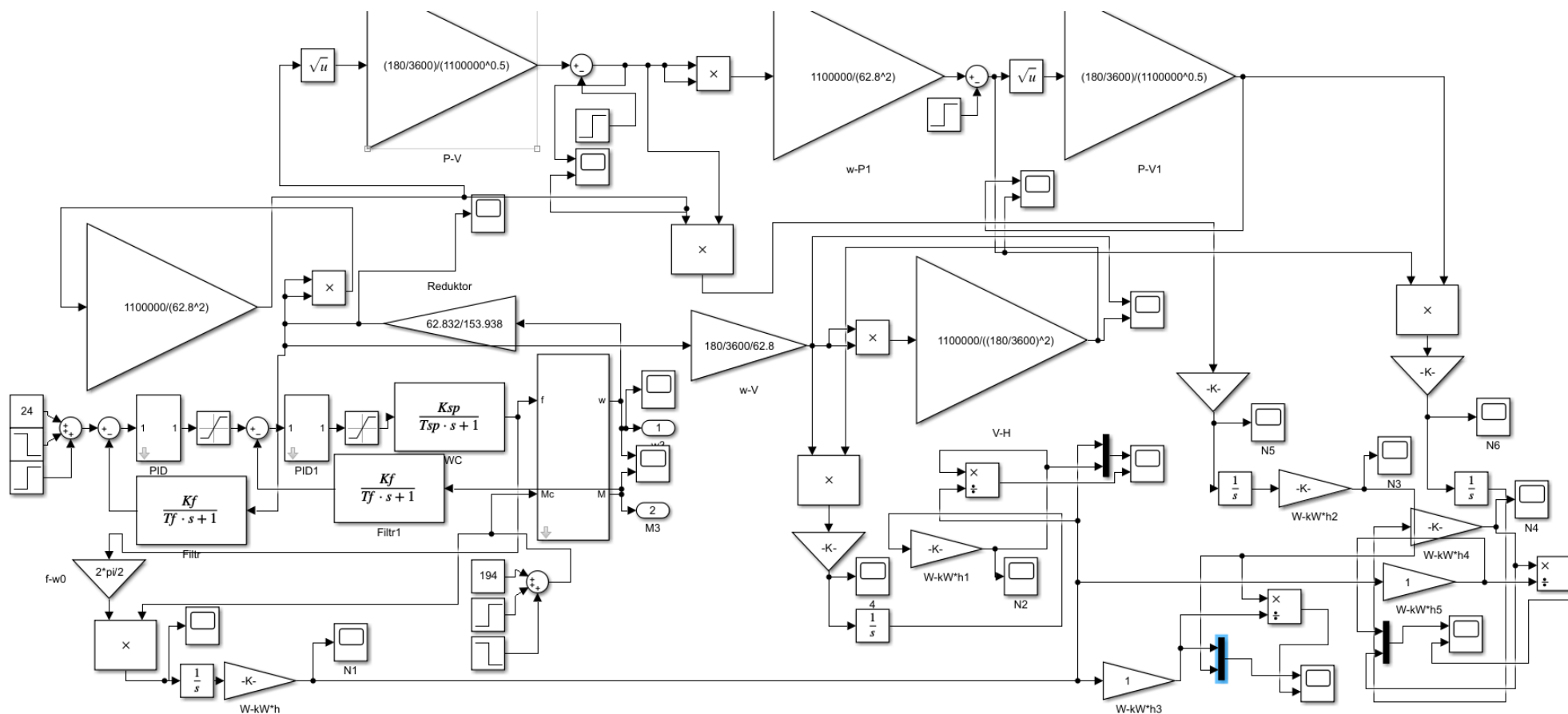


					08-24.БКР.020.00.000 ТЗ						
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Функціональна схема			Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.		Сухляк Я.А.								2	
Перевір.		Мошноріз М.М									
Реценз.								ВНТУ			
Н. Контр.											
Затверд.											

Додаток Г Схема моделювання



					08-24.БКР.020.00.000 ТЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Схема моделювання		Літ.	Арк.	Акрушив
Розроб.		Сухляк Я.А.							
Перевір.		Мошноріз М.М						3	
Реценз.							ВНТУ		
Н. Контр.									
Затверд.									



Додаток Д Модернізована схема моделювання

					08-24.БКР.020.00.000 ТЗ				
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Сухляк Я.А.			Модернізована схема моделювання		Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Мошноріз М.М						4	
Реценз.				ВНТУ					
Н. Контр.									
Затверд.									

Додаток К Ілюстративні матеріали

Підхід до оцінки ефективності роботи електромеханічної системи виробництва стиснутого повітря

Доповідач: ст. гр. ЕМСА-216

Ярослав СУХЛЯК

Керівник:

к.т.н., доц. Микола МОШНОРІЗ

Мета, задачі та об'єкт дослідження

Мета дослідження:

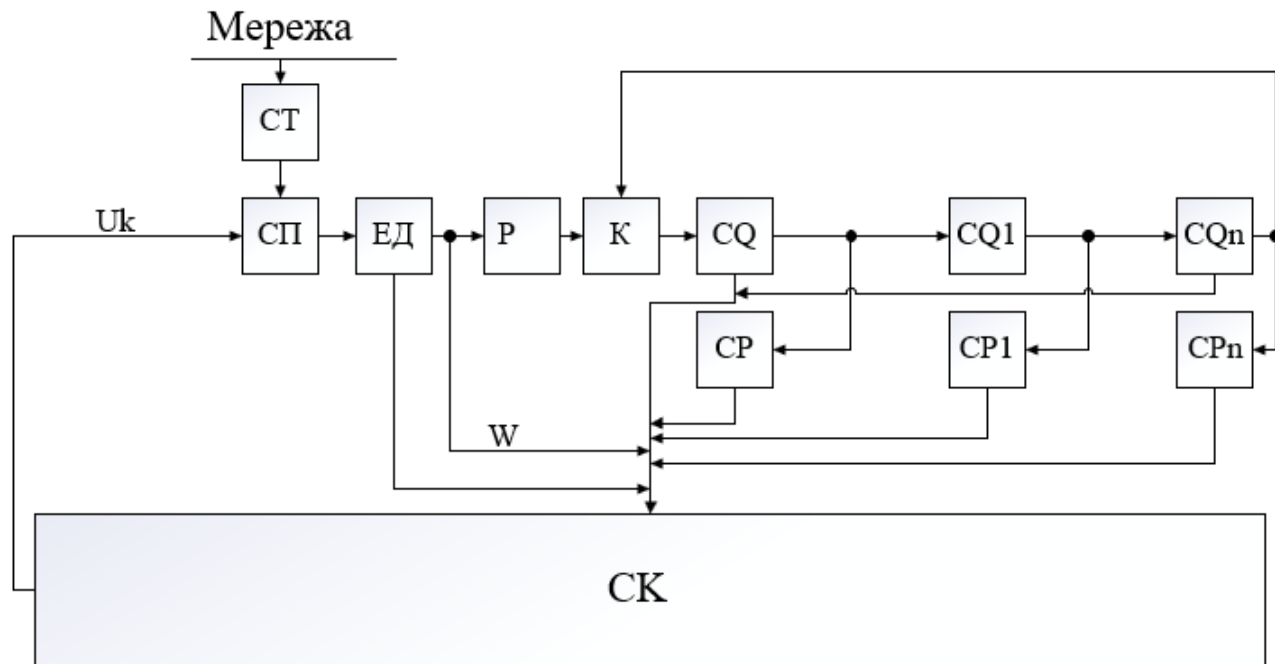
Метою дипломної роботи є: Підвищення надійності роботи системи виробництва стиснутого повітря за рахунок вчасного виявлення несправностей у роботі пневматичної системи.

Предмет дослідження: математичний апарат та комп'ютерна модель для імітації роботи системи виробництва та транспортування стиснутого повітря.

Об'єкт дослідження: процес передачі корисної роботи від електромеханічної частини компресорної установки до кінцевого споживача.

Завдання дослідження:

Енергоефективні електромеханічні системи компресорів. Класифікація , аналіз, та методи регулювання продуктивності. Розробка функціональної схеми, розрахунок і вибір елементів. Розрахунок регуляторів, контурів струму та швидкості. Математичне моделювання електромеханічної системи компресора. Підхід до оцінки ефективності роботи електромеханічної системи виробництва стиснутого повітря. Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності впровадження частотного перетворювача. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.



Функціональна схема системи компресорної установки.

Ця схема представляє сучасну систему електроприводу компресора з використанням силового перетворювача та системи керування. Вона має ряд переваг, таких як гнучке керування, автоматизацію процесу та високу точність. Однак для покращення енергоефективності слід враховувати недоліки, такі як надлишкове споживання енергії при неправильній налаштуванні та втрати енергії в силовому перетворювачі. Для покращення можна ввести механізми рекуперації енергії, оптимізовані алгоритми керування та енергозберігаючі технології.

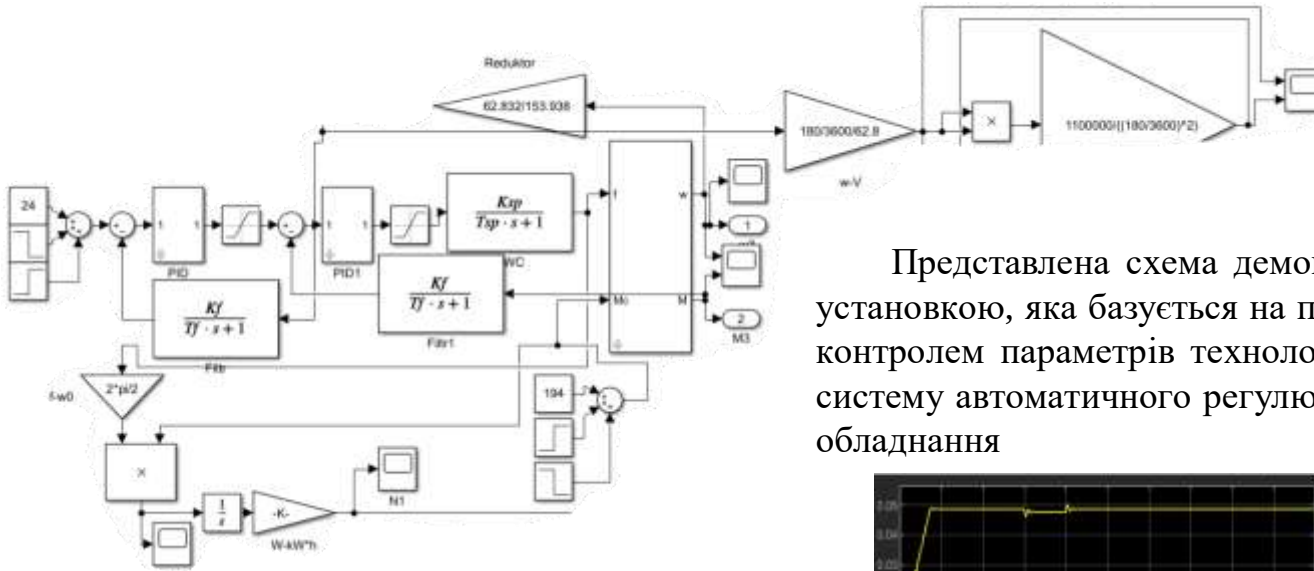
Пояснення роботи функціональної схеми. Живлення : На вході встановлений лічильник електроенергії СТ. Після лічильника мережа подає живлення силовому перетворювачу (СП). Керування електродвигуном : Силовий перетворювач (СП) підсилює напругу та регулює частоту живлення електродвигуна (ЕД) за командами системи керування (СК). Передача потужності : Електродвигун (ЕД) обертає редуктор (Р), який передає потужність до компресора (К). Контроль швидкості двигуна, продуктивності та тиску : Сенсори продуктивності (CQ) вимірюють об'єм повітря, що компресується. Сенсори тиску (CP) контролюють тиск у системі. Зворотний зв'язок : Дані з сенсорів (CQ і CP) і швидкості двигуна (W) передаються системі керування (СК). СК аналізує ці дані і коригує параметри роботи електродвигуна (ЕД) через силовий перетворювач (СП). Управління споживачами : Система керування (СК) також контролює декількох споживачів (CQ1, CQn, CP1, CPn), забезпечуючи оптимальне живлення та роботу всієї системи.

Розрахунок і підбір усіх елементів для функціональної схеми.

Були вибрані і розраховані такі елементи схеми: Компресорна станція ПКС 5,25. Асинхронний двигун 4A180M4. Частотний перетворювач Danfoss VLT AQUA Drive FC 202. Лічильник електроенергії ABB B23 112-100. Циліндричний редуктор Bonfiglioli серії С серії С 41 2. Термально-масовий витратомір Siemens SITRANS FP230 MASS 6000. Сенсор тиску: Endress+Hauser Cerabar PMC71. Інкрементальний енкодер Kübler Sendix 5020. Система керування: ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C.

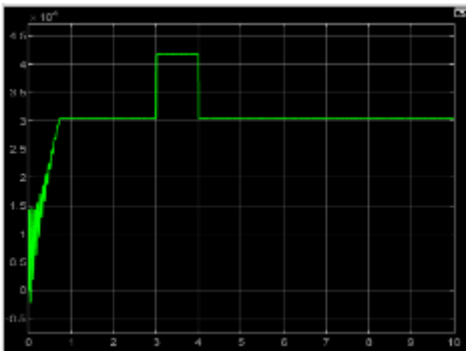


МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНО СИСТЕМИ КОМПРЕСОРА

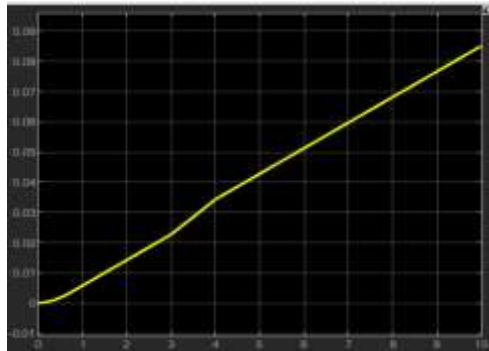


Представлена схема демонструє сучасну систему автоматичного керування компресорною установкою, яка базується на принципах частотного регулювання електродвигуна з комплексним контролем параметрів технологічного процесу. Дана конфігурація являє собою багатоконтурну систему автоматичного регулювання, що забезпечує оптимальне функціонування компресорного обладнання

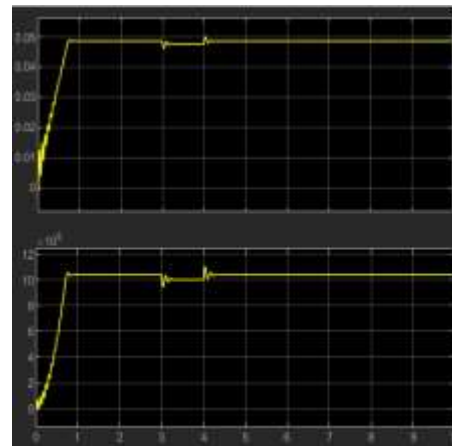
Моделювання електромеханічної схеми



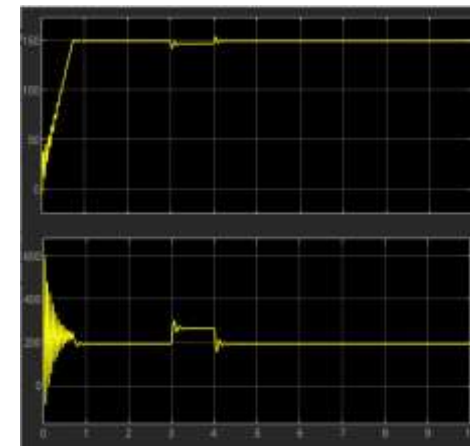
Графік споживання електроенергії
на вході системи.



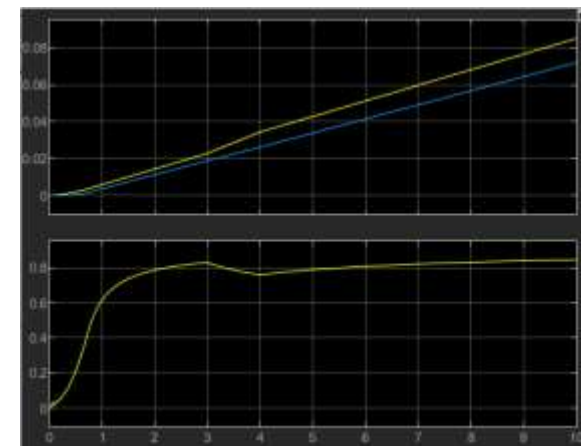
Графік енергоспоживання у Вт системи на вході.



Графік значень
продуктивності і тиску.



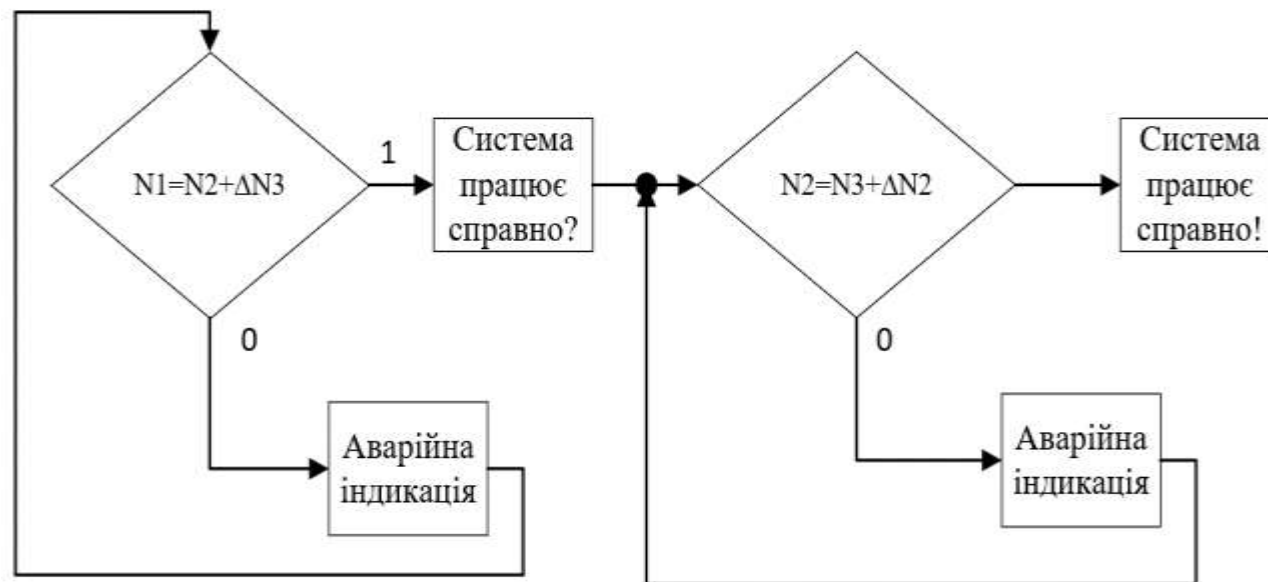
Графік швидкості і моменту двигуна



Графік порівняння енергоспоживання системи на вході і на виході із представленням ККД

Розробка структурної схеми

Представлена структурна схема демонструє алгоритм діагностики втрат стисненого повітря в сегментованій системі розподілу електромеханічної компресорної установки, що базується на принципі енергетичного балансу між потужністю подачі та споживання в кожній окремій секції трубопроводу.



Система включає трубопровід стисненого повітря, розділений на три незалежні секції, кожна з яких обладнана датчиками тиску та продуктивності для безперервного моніторингу параметрів потоку стисненого повітря, що дозволяє обчислювати миттєву потужність транспортування через добуток тиску на об'ємну витрату в кожній секції. Одночасно кожна секція містить споживач стисненого повітря, оснащений аналогічною системою сенсорів для визначення фактичної потужності споживання, що створює можливість для порівняльного аналізу енергетичних потоків на вході та виході кожної секції системи розподілу

Алгоритм функціонує через послідовну перевірку енергетичного балансу в кожній секції, порівнюючи розрахункові значення потужності транспортування стисненого повітря з фактичними значеннями потужності споживання відповідного обладнання. Логічна структура алгоритму передбачає два основні сценарії: коли різниця потужностей $N1-N2+\Delta N3$ та $N2-N3+\Delta N2$ дорівнює нулю, система генерує сигнал про нормальну роботу без втрат стисненого повітря, а коли виявляється енергетичний дисбаланс, активується аварійна індикація, що сигналізує про наявність витоків або несправностей у відповідній секції трубопроводу

Розробка алгоритму моніторингу і модернізація електромеханічної схеми

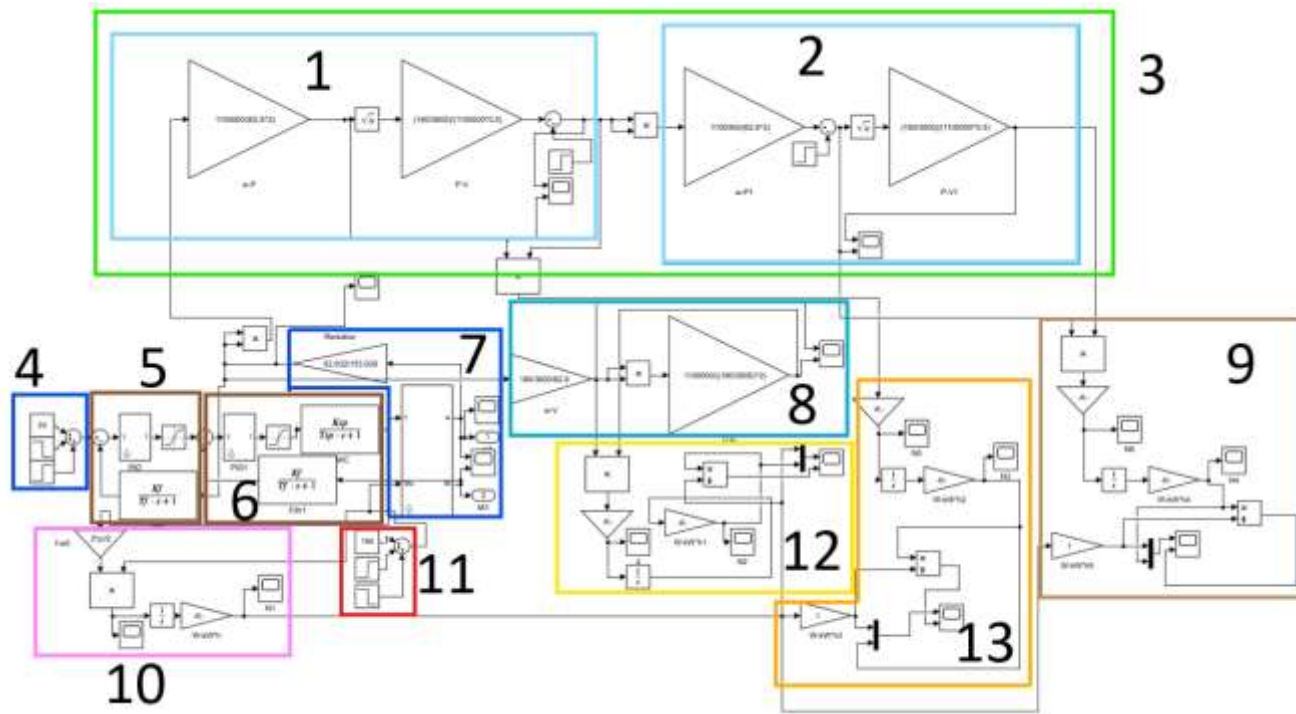
Агоритм

Розширений алгоритм аналізу енергоефективності електромеханічної системи компресора з інтегрованим контуром моніторингу мережі розподілу стисненого повітря представляє комплексну систему діагностики, що поєднує енергетичний аналіз компресорної установки з детальним контролем споживання стисненого повітря в розгалуженій мережі споживачів. Фундаментальною особливістю даного алгоритму є одночасний аналіз енергетичних характеристик на рівні генерації стисненого повітря та його розподілу між множинними споживачами, що дозволяє отримати цілісну картину енергоефективності всієї пневматичної системи.

Діагностичний модуль алгоритму використовує методи топологічного аналізу для локалізації місць втрат стисненого повітря через порівняння енергетичних балансів у різних сегментах розподільчої мережі. Система здатна ідентифікувати конкретні ділянки трубопроводу або з'єднання, де відбуваються втрати, через аналіз градієнтів тиску та невідповідностей між очікуваними та фактичними значеннями продуктивності в суміжних точках моніторингу. Алгоритм враховує гідродинамічні характеристики потоку стисненого повітря, включаючи втрати тиску на тертя в трубопроводах та місцевих опорах, що дозволяє відрізнити нормальні експлуатаційні втрати від аварійних витоків.

Алгоритм функціонує через послідовну перевірку енергетичного балансу в кожній секції, порівнюючи розрахункові значення потужності транспортування стисненого повітря з фактичними значеннями потужності споживання відповідного обладнання. Логічна структура алгоритму передбачає два основні сценарії: коли різниця потужностей $N1-N2+\Delta N3$ та $N2-N3+\Delta N2$ дорівнює нулю, система генерує сигнал про нормальну роботу без втрат стисненого повітря, а коли виявляється енергетичний дисбаланс, активується аварійна індикація, що сигналізує про наявність витоків або несправностей у відповідній секції трубопроводу

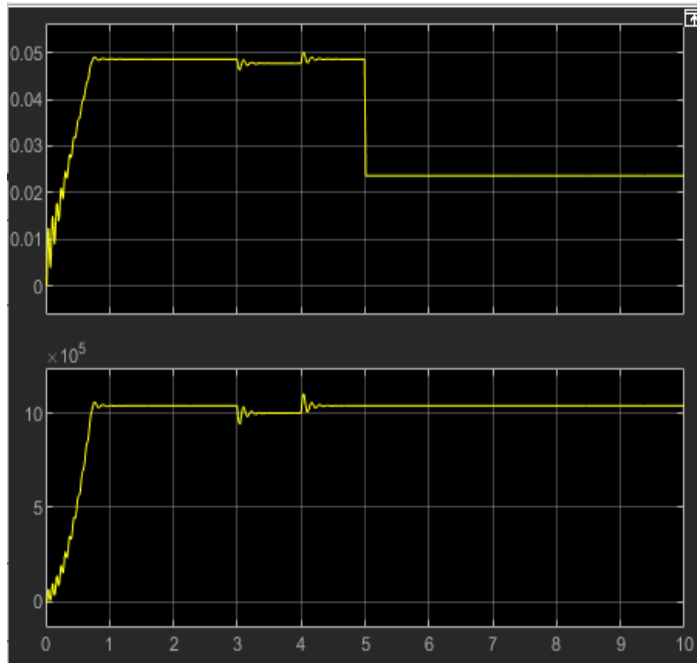
Алгоритм базується на принципі енергетичного балансу, де загальна потужність, що витрачається компресорною установкою на створення стисненого повітря, має відповідати сумарній потужності, що споживається всіма підключеними споживачами з урахуванням втрат у системі розподілу. Кожен споживач обладнаний високоточними сенсорами тиску та витратоміром продуктивності, що забезпечує безперервний моніторинг локальних параметрів споживання. Потужність споживання кожного окремого споживача обчислюється як добуток миттєвого значення тиску на об'ємну продуктивність, що дає можливість отримати енергетичний еквівалент споживання стисненого повітря в кожній точці системи.



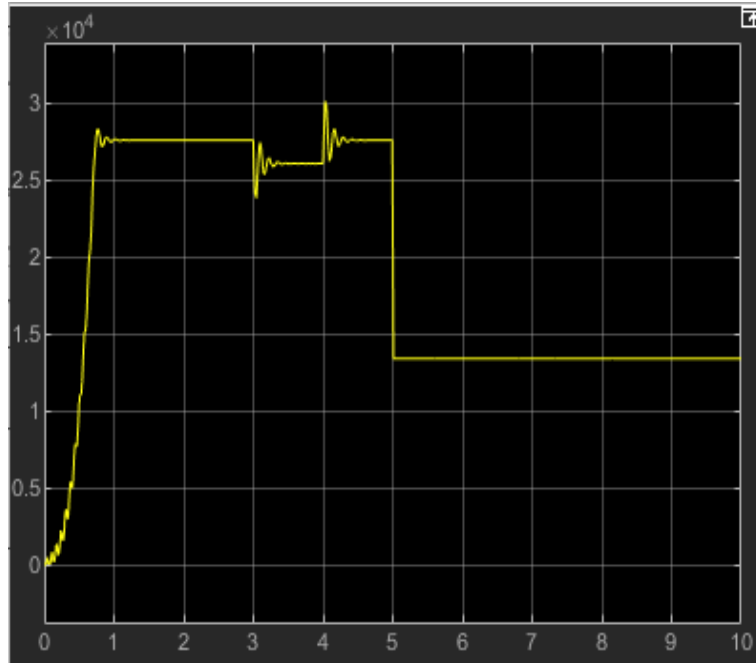
На рисунку представлена структурна схема електромеханічної системи компресора, що включає основні функціональні елементи, необхідні для забезпечення ефективного керування, контролю та моніторингу параметрів

У лівій частині схеми позначено джерело живлення (4, 7) та двигун постійного струму, з'єднаний із черв'ячним редуктором. Обертальний рух від двигуна через редуктор передається на компресор. Навантаження системи (11) моделює взаємодію між механічною частиною привода і технологічним навантаженням, забезпечуючи реалістичне уявлення про роботу системи в експлуатації. Лічильник електроенергії (10) фіксує сумарне споживання кіловат-годин, що важливо для оцінки енергоефективності. Блоки зворотніх зв'язків (5–6): один — за струмом, другий — за швидкістю. Вони забезпечують контроль за споживаним струмом, регулювання потужності, підтримку заданих обертів двигуна. Сенсори продуктивності та тиску (8) вимірюють об'ємну подачу повітря та робочий тиск, що є ключовими параметрами для оцінки ефективності роботи компресора. Блок моніторингу (12) аналізує дані від сенсорів і формує сигнали управління для підтримки заданих режимів роботи. Контроль параметрів стисненого повітря здійснюється окремо для кожного споживача: перший (13), другий (9). Це забезпечує роздільний контроль якості подачі. Сенсори (1–2) на трубопроводі безперервно контролюють стан середовища (тиск, продуктивність), що дозволяє оперативно виявляти відхилення. Трубопровід (3) призначений для транспортування стисненого повітря від компресора до споживачів, оснащений послідовно встановленими сенсорами для моніторингу параметрів у різних точках системи.

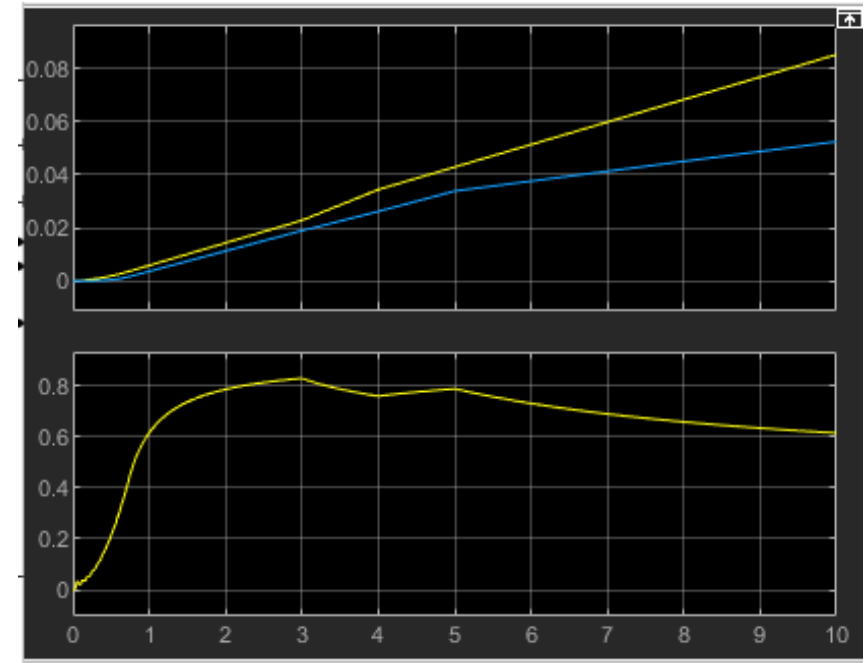
Ілюстрація графічних даних модернізованої системи при навантаженні із розробленим алгоритмом



Графік тиску і
продуктивності першого
споживача

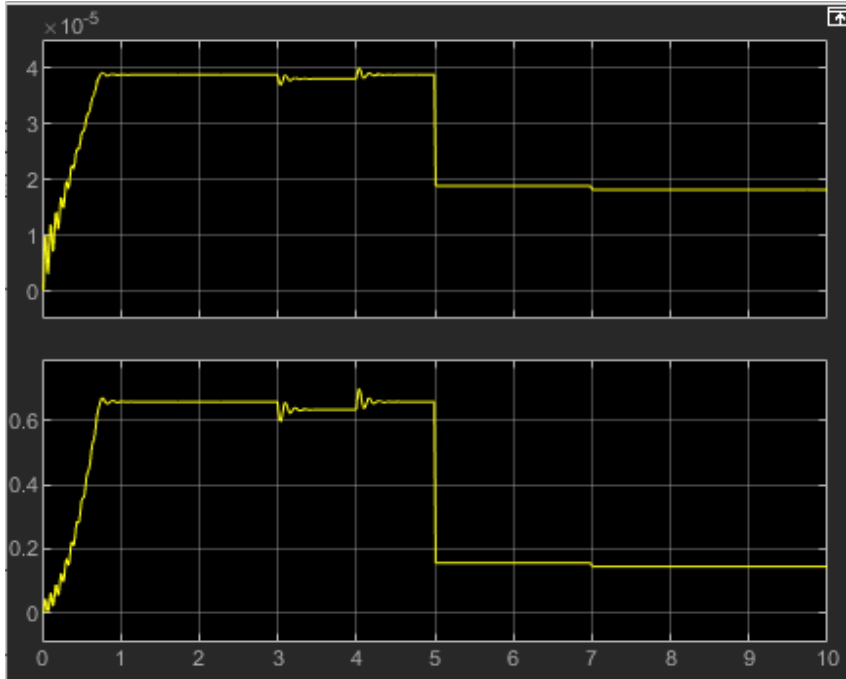


Графік енергоспоживання системи
при втратах першого споживача

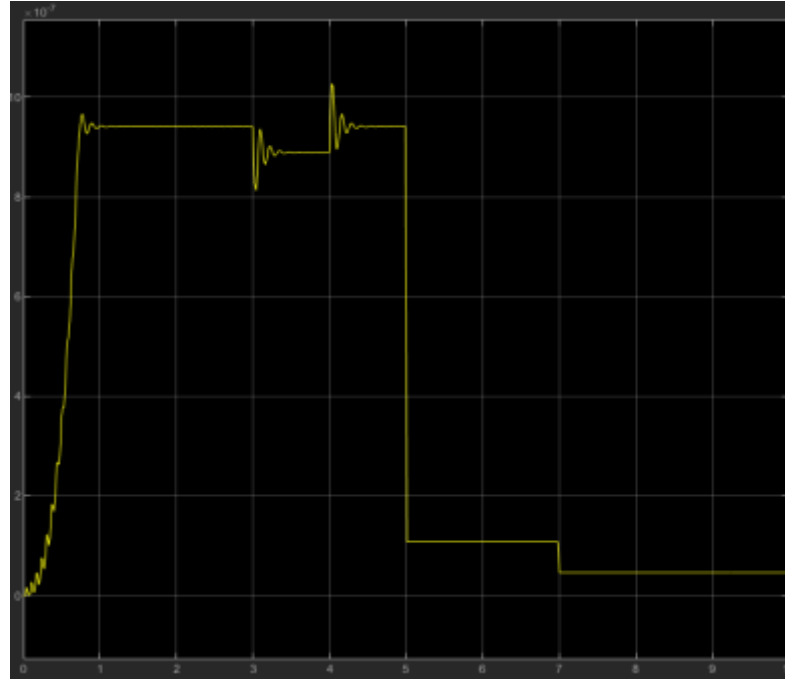


Графік порівняння
енергоспоживання між
нормальним режимом роботи
системи і втратою на першому
споживачі

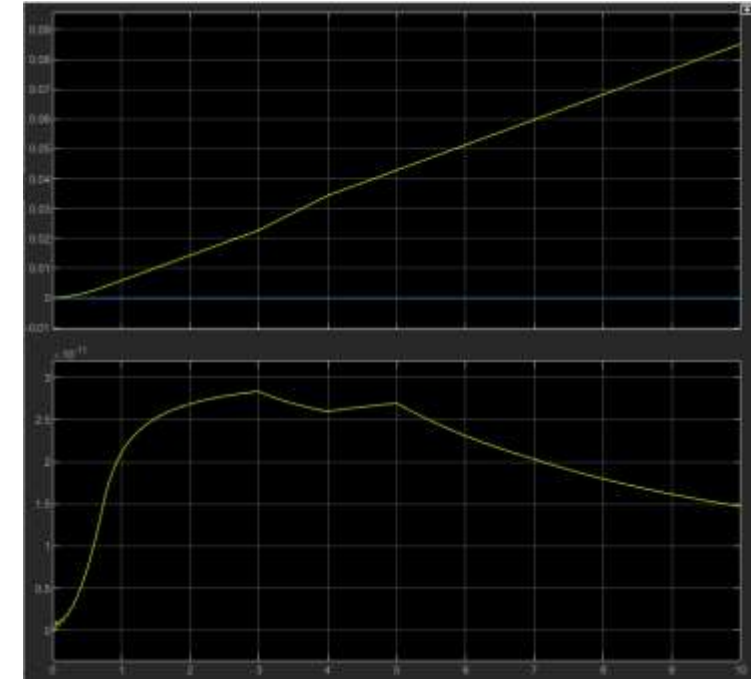
Ілюстрація графічних даних модернізованої системи при навантаженні із розробленим алгоритмом



Графік тиску і продуктивності з
втратою на 2 споживачі



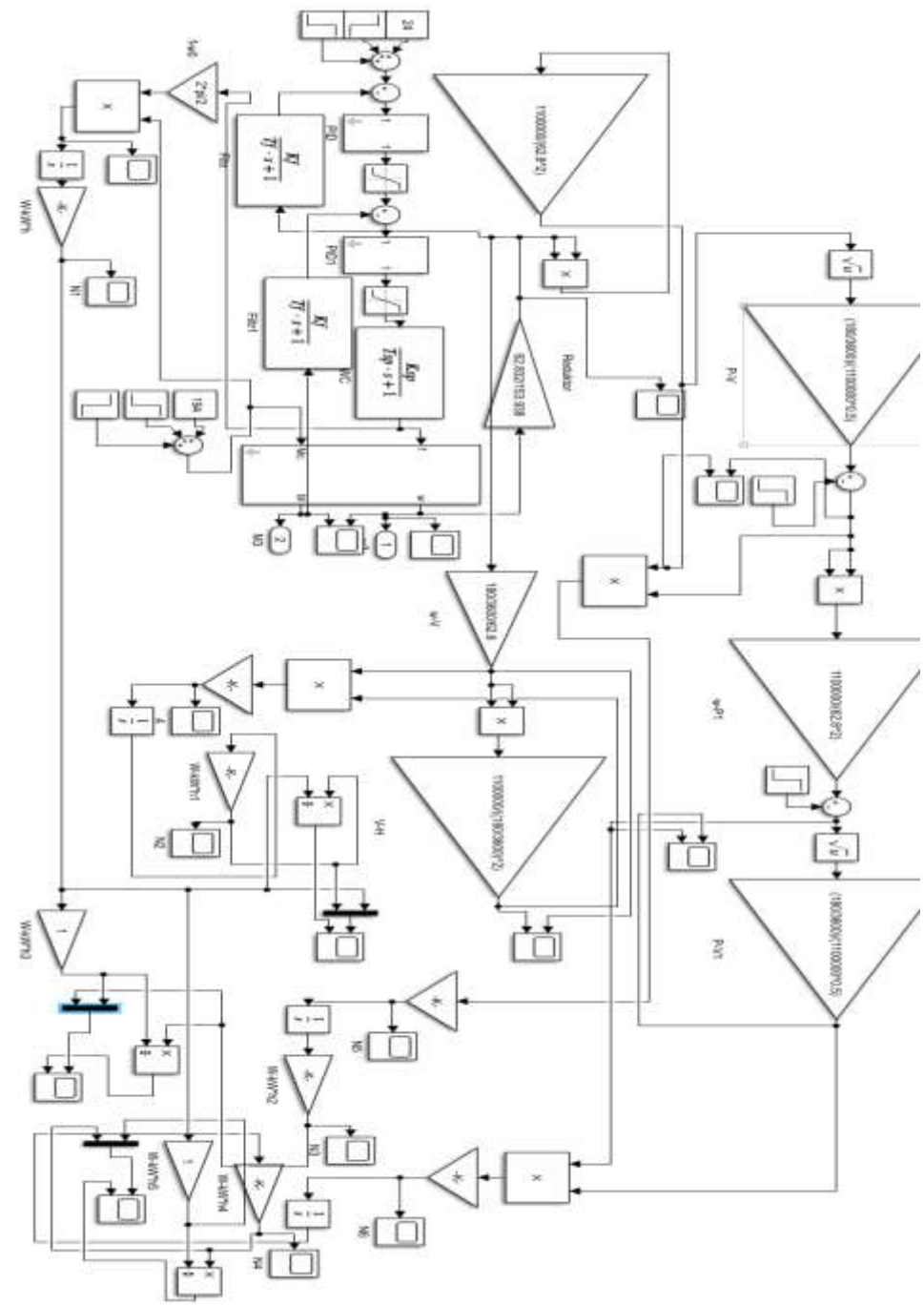
Графік енергоспоживання на
2 споживачі



Графік порівняння
енергоспоживання між 1
споживачем системи і другим

Запропонований комплексний алгоритм аналізу енергоефективності електромеханічної системи компресора з інтегрованим контуром моніторингу мережі розподілу стисненого повітря представляє інноваційний підхід до оптимізації енергетичних процесів у пневматичних системах промислового призначення. Алгоритм забезпечує одночасний контроль енергетичних характеристик компресорної установки через аналіз співвідношення вхідної електричної та вихідної механічної потужності з паралельним моніторингом енергетичного балансу в розгалуженій мережі споживачів стисненого повітря, що дозволяє не тільки оптимізувати коефіцієнт корисної дії компресора, але й виявляти втрати стисненого повітря та локалізувати місця витоків у системі розподілу. Інтеграція енергетичного аналізу на рівні генерації з детальним моніторингом споживання забезпечує комплексну діагностику всієї пневматичної системи, дозволяючи досягти максимальної енергоефективності через координовану оптимізацію режимів роботи компресорної установки та раціональне управління споживанням стисненого повітря з урахуванням реальних потреб технологічних процесів.

Розробка системи керування з підвищеною ефективністю передбачала впровадження алгоритму моніторингу втрат стисненого повітря, який базується на принципі енергетичного балансу. Цей підхід дозволяє точно локалізувати місця витоків, підвищити загальну ефективність системи та скоротити експлуатаційні витрати через своєчасне технічне обслуговування.



Обґрунтування вибору частотного перетворювача

Показник	Без чп	з чп
Споживана потужність при 100% навантаженні, кВт	32,9 7	—
Споживана потужність при 75% навантаженні, кВт	24,0 3	16,87
Річне споживання при 75% навантаженні, МВт·год	61,7 1	26,33
Вартість енергії, тис. грн/рік (при 2,5 грн/кВт·год)	154, 28	65,83
ККД системи (%)	0,75 8	0,905
Коливання тиску (%)	±15 %	±2%
Пусковий струм (А)	392 А	61,6 А
Енергія пуску, кВт·год	~0,1 5–0,2	~0,08–0,1
Втрати енергії при пуску (%)	—	Зниження на 40–50%
Механічні навантаження	Висо кі	Знижені на 70–80%
Термін служби механічної частини	Базо вий	+30–40%
Реактивна потужність, кВАр	14,5 3	4,71

Загальні вхідні дані для порівняння значень

Пок азник	Значення
Річ на економія енергії	35 380 кВт·год
Річ на економія коштів	88,45 тис. грн
Вар тість ЧП	~150 тис. грн
Тер мін окупності	~1,7 року
До даткові переваги	Зменшення зносу, стабільність тиску, менша реактивна потужність, м'який пуск

Загальні вхідні дані для порівняння значень

Інтеграція частотного перетворювача у систему електроприводу компресора є економічно доцільним рішенням. Вона забезпечує суттєве зниження енергоспоживання, поліпшення техніко-економічних показників, скорочення витрат на експлуатацію та підвищення загальної надійності технологічного процесу. Отримана економія дозволяє окупити витрати на придбання та встановлення ЧП протягом одного–двох років, що робить його ефективним інвестиційним проектом для промислових підприємств.

Використання частотного перетворювача в електромеханічній системі компресора забезпечує значне підвищення енергоефективності завдяки точному регулюванню швидкості обертання двигуна відповідно до поточного навантаження. Аналіз енергетичних режимів підтвердив можливість скорочення споживання електроенергії на рівні 30–40%, що робить такий підхід економічно вигідним для промислових застосувань.

ВИСНОВКИ

Математичне моделювання системи показало, що використання ЧРП забезпечує зменшення споживання електроенергії на 30–40 % порівняно з традиційними методами регулювання. Також було побудовано графік енергоспоживання системи на вході та виході, що підтвердило підвищення ККД системи. Запропоновано новий алгоритм моніторингу втрат стисненого повітря, який базується на аналізі енергетичного балансу уздовж трубопроводу. Цей підхід дозволяє точно локалізувати місця витоків, що в свою чергу значно скорочує час виявлення несправностей і запобігає виникненню аварійних ситуацій.

На основі аналізу графіків ККД системи було показано, що система працює ефективно, оскільки: Вхідна енергія (жовта крива) на графіках демонструє загальне електричне споживання. Корисна механічна енергія (синя крива) на графіках показує реальну продуктивність компресора. Різниця між кривими відображає енергетичні втрати, що дозволяє оцінити ефективність роботи електромеханічної системи компресора.

Система моніторингу споживачів забезпечує детальний профіль споживання кожного підключеного обладнання. Це дозволяє оптимізувати режими роботи компресорної установки відповідно до реального попиту на стиснене повітря.

Алгоритм аналізує динамічні характеристики споживання, виявляючи піки та спади навантаження. Це дозволяє прогнозувати потребу в стисненому повітрі та адаптувати роботу компресора для мінімізації енергоспоживання при забезпеченні необхідних параметрів тиску та продуктивності.

Інтегрований контур моніторингу мережі розподілу стисненого повітря дозволяє виявляти втрати стисненого повітря та локалізувати місця витоків у системі розподілу. Це допомагає оперативно визначити проблемні сектори мережі та скоригувати їх.

Комплексний підхід до аналізу енергетичних характеристик на рівні генерації та розподілу стисненого повітря дозволяє досягти максимальної енергоефективності через координовану оптимізацію режимів роботи компресорної установки та раціональне управління споживанням стисненого повітря. Захист обладнання від аварійних режимів та автоматичне керування системою зменшують вартість технічного обслуговування та ремонту. Моніторинг споживання стисненого повітря дозволяє оперативно виявляти несправності та підвищувати надійність системи. Таким чином, результати дослідження підтверджують, що впровадження частотно-регульованого привода, автоматизованої системи керування та контролю енерго та пневмопараметрів дозволяє не лише суттєво підвищити енергоефективність та надійність роботи компресорної установки, але й оптимізувати технічне обслуговування, скоротити витрати на ремонт та знизити ризики аварійних простоїв.

Отримані результати можуть бути використані для модернізації існуючих та проектування нових компресорних станцій у різних галузях промисловості.

Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Підхід до оцінки ефективності роботи електромеханічної системи виробництва стиснутого повітря

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕМСА-216

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 03.86%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Гарант ОП

Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Сухляк Я.А.

(прізвище, ініціали)

					08-24.БКР.020.00.000			
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підхід до оцінки ефективності роботи електромеханічної системи виробництва стиснутого повітря	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив:		Сухляк Я.А.		03.06				
Перевірив:		Мошноріз М.М.		03.06				
Т. контр.								
						Аркуш	Аркушів	
Норм.кон.		Б.К.С.С.С.С.		03.06		ВНТУ, гр. ЕМСА-216		
Затверд.		Мошноріз М.М.		03.06				