

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

Кафедра: «Електрообладнання і автоматики суден»

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ У ЕЛЕКТРОПРИВОДІ
СУДНОВОГО КОМПРЕСОРА ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ ТА ОЦІНКА
ЙОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

Виконав: здобувач другого (магістерського) рівня
вищої освіти, групи 3601

Спеціальність:

271 – Морський та внутрішній водний транспорт
(цифр і назва спеціальності)

Спеціалізація: «Експлуатація суднового
електрообладнання і засобів автоматики»

КОЛЬЦОВ ГЛІБ СЕРГІЙОВИЧ

(підпис, прізвище та ініціали)

допущений до захисту 10.12.2025
(дата)

Завідувач кафедри Ірина ГВОЗДЕВА

(підпис, прізвище та ініціали)

Керівник Ірина ГВОЗДЕВА

(підпис, прізвище та ініціали)

Нормоконтролер В. М. Михайленко

(підпис, прізвище та ініціали)

Рецензент Григорук

(підпис, прізвище та ініціали)

Одеса – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки

Спеціалізація: Експлуатація суднового електрообладнання і засобів
автоматики

Кафедра «Електрообладнання і автоматики суден»

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

Ірина ГВОЗДЕВА



«10» 12 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу магістра

КОЛЬЦОВА ГЛІБА СЕРГІЙОВИЧА

(прізвище та ініціали)

1. Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ У ЕЛЕКТРОПРИВОДІ
СУДНОВОГО КОМПРЕСОРА ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ ТА ОЦІНКА
ЙОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

затверджена наказом ректора №1503 від «10» 12 2025 року

2. Термін закінчення роботи: «8» грудня 2025 року

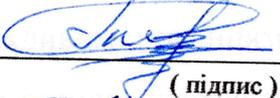
3. Вихідні дані до роботи: параметри та схеми системи управління
електроприводом суднового компресора пускового повітря, параметри
основних елементів системи управління електроприводом суднового
компресора пускового повітря

4. Зміст дипломної роботи магістра:

1. Класифікація компресорів та аналіз методів та пристроїв плавного пуску асинхронних електроприводів.
2. Аналіз енергетичних процесів в компресорі пускового повітря HV2/285A.
3. Дослідження пускових режимів електропривода компресора пускового повітря головного двигуна.
4. Розробка нечіткої експертної системи.
5. Перелік ілюстрацій до презентації дипломної роботи магістра: системи управління електроприводом суднового компресора пускового повітря; комп'ютерна модель електроприводу суднового компресора пускового повітря; результати моделювання для різних режимів пуску.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи магістра	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання до ДРМ	24.10.2024	Виконано
2	Ознайомлення з електроприводом суднового компресора пускового повітря	28.11.2024-27.12.2024	Виконано
3	Вивчення та огляд методів управління електроприводом суднового компресора пускового повітря	28.12.2024-03.02.2025	Виконано
4	Розробка комп'ютерної моделі електропривода суднового компресора пускового повітря	04.02.2025-26.03.2025	Виконано
5	Проведення комп'ютерного моделювання процесів у електроприводі суднового компресора пускового повітря	27.03.2025-30.04.2025	Виконано
6	Розробка нечіткої експертної системи	01.05.2025-30.06.2025	Виконано
7	Створення пояснювальної записки та графічного матеріалу	01.09.2025-28.11.2025	Виконано

Курсант (студент) _____  (підпис)

Гліб КОЛЬЦОВ
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____  (підпис)

Ірина ГВОЗДЕВА
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 92 с., 49 рис., 2 табл., 31 джерело.

Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ СУДНОВОГО КОМПРЕСОРА ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ ТА ОЦІНКА ЙОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

Актуальність теми. Сучасні вимоги до рівня досконалості технічних рішень автоматизації суднових систем потребують віднайдення таких засобів автоматизації, які мають найкращі техніко-економічні показники та забезпечують вирішення поставлених завдань найбільш досконалими методами. Однією із важливих складових суднових систем є сукупність пристроїв запуску головного двигуна за допомогою компресору пускового повітря. Такий компресор є складним технічним пристроєм і його рух забезпечується відповідним електроприводом, керування яким потребує специфічних особливостей, зумовлених особливостями руху об'єкту. Найбільш важливим питанням є забезпечення відповідних процесів пуску електроприводу із урахуванням вимог до динамічних процесів у компресорі пускового повітря для забезпечення головного завдання – пуску головного двигуна. Запуск головного двигуна за допомогою компресора пускового повітря, який виконується за допомогою керованого електроприводу, супроводжується значними моментами статичного та динамічного навантаження, що потребує обґрунтування відповідних методів пуску електроприводу.

Найбільш важливою проблемою обґрунтування таких методів є забезпечення допустимого перенавантаження електроприводу по пусковому струму.

Експлуатаційний період функціонування компресору пускового повітря потребує відповідних програмно-алгоритмічних рішень, які зумовлені невизначеністю деяких умов вихідних даних. Тому забезпечення експлуатаційного періоду є важливим питанням, яке потребує вирішення за допомогою сучасних технологій штучного інтелекту.

Звідси, удосконалення процесів управління у електроприводі суднового компресора пускового повітря та оцінки його технічного стану на протязі довготривалої експлуатації, є актуальною науково-технічною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами: тематика магістерської роботи співпадає з науковими дослідженнями кафедри електрообладнання і автоматики суден Національного університету «Одеська морська академія».

Метою роботи є вирішення протиріччя між затребуваними практикою вимогами до систем управління електроприводом компресора пускового повітря і його експлуатації та можливостями таких систем, що використовуються в судновому обладнанні, шляхом встановлення методів та засобів удосконалення пускових режимів та інтелектуальних технологій обслуговування експлуатаційних режимів.

Для досягнення вказаної мети вирішені наступні *завдання*:

1. Класифікація компресорів пускового повітря, критичний огляд та порівняння відомих підходів та методів, присвячених проблемі плавного пуску електроприводів компресорів пускового повітря та сучасним методам вирішення проблеми такого пуску.
2. Аналіз енергетичних процесів в компресорі пускового повітря HV2/285A та пропонованих технічних рішень плавного пуску електроприводу.
3. Дослідження та комп'ютерне моделювання пускових режимів електроприводу компресора пускового повітря головного двигуна за різними методами.
4. Розробка експертної системи нечіткої логіки для забезпечення експлуатації компресора пускового повітря головного двигуна

Об'єктом дослідження дипломної роботи магістра є процеси перетворення енергії у суднових електроенергетичних системах, зокрема, процеси в системі управління та діагностики суднового компресора пускового повітря.

Предметом дослідження є моделі та методи дослідження процесів

перетворення енергії у суднових електроенергетичних системах, моделі і методи дослідження процесів в системі управління та діагностики суднового компресора пускового повітря.

Методи досліджень: математичні методи моделювання, методи теорії електроприводу, методи системного аналізу, методи штучного інтелекту.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що на основі побудови математичних моделей досліджуваних процесів у електроприводі суднового компресора пускового повітря є можливість удосконалення процесів його пуску та оцінки технічного стану.

Наукова новизна отриманих результатів:

- На основі огляду і аналізу існуючих рішень, розглянута можливість удосконалення алгоритмів пуску електроприводу компресору пускового повітря головного двигуна.
- Встановлено, що плавний пуск електроприводу компресору пускового повітря головного двигуна може бути забезпечений різними технічними засобами, зокрема зміною тільки напруги достатньо нескладними схемо-технічними рішеннями або одночасною зміною напруги і частоти за допомогою відповідного перетворювача.
- Запропоновані алгоритми інтелектуального управління у судновій системі управління та діагностики суднового компресора пускового повітря.

Практичне значення отриманих результатів складається у наступному: на основі аналітичних обґрунтувань, комп'ютерного моделювання та аналізу досліджень процесів перетворення енергії у суднових електроенергетичних системах, зокрема, процесів в системі управління та діагностики суднового компресора пускового повітря встановлено, що застосування сучасних підходів та технічних рішень забезпечення плавного пуску електроприводу забезпечує зменшення пускового струму і, тим самим, підвищення надійності та покращення ресурсних показників системи, алгоритми діагностування із застосуванням інтелектуальних методів забезпечують надійне визначення технічного стану.

Розроблені пропозиції дозволяють підвищити експлуатаційні характеристики вказаної системи та можуть бути застосовані на суднах широкого призначення.

Апробація результатів магістерського дослідження: доповідь з тематики даної роботи обговорювалась на XV міжнародній науково-технічній конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика» (СЕЕА-2025), яка проходила у Національному Університеті «Одеська морська академія», місто Одеса.

Публікації: Наукова стаття **«Моделювання перехідних режимів електроприводу компресора пускового повітря головного двигуна та проблеми реалізації»** із зв'язаною тематикою дипломної роботи опубліковано у матеріалах XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика» (СЕЕА-2025).

ПРОЦЕСИ УПРАВЛІННЯ, СУДНОВИЙ КОМПРЕСОР ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ,
ЕЛЕКТРОПРИВОД, ТЕХНІЧНИЙ СТАН, ДІАГНОСТИКА, НЕЧІТКА
ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА

ABSTRACT

Master's thesis: 92 pp., 49 figures, 2 tables, 31 sources.

Topic: RESEARCH OF CONTROL PROCESSES IN THE ELECTRIC DRIVE OF A SHIP STARTING AIR COMPRESSOR AND ASSESSMENT OF ITS TECHNICAL CONDITION

Relevance of the topic: Modern requirements for the level of perfection of technical solutions for automation of ship systems require the discovery of such automation tools that have the best technical and economic indicators and provide the solution to the tasks set by the most advanced methods. One of the important components of ship systems is a set of devices for starting the main engine using a starting air compressor. Such a compressor is a complex technical device and its movement is provided by an appropriate electric drive, the control of which requires specific features due to the characteristics of the object's movement. The most important issue is to ensure the appropriate processes of starting the electric drive, taking into account the requirements for dynamic processes in the starting air compressor to ensure the main task - starting the main engine. Starting the main engine using a starting air compressor, which is performed using a controlled electric drive, is accompanied by significant moments of static and dynamic load, which requires substantiation of the appropriate methods of starting the electric drive.

The most important problem of substantiation of such methods is to ensure the permissible overload of the electric drive by the starting current.

The operational period of the starting air compressor requires appropriate software and algorithmic solutions, which are due to the uncertainty of some initial data conditions. Therefore, ensuring the operational period is an important issue that needs to be resolved using modern artificial intelligence technologies.

Hence, improving the control processes in the electric drive of a ship's starting air compressor and assessing its technical condition during long-term operation is a relevant scientific and technical problem.

Connection of the work with scientific programs, topics, plans: the topic of the master's thesis coincides with the scientific research of the Department of Electrical

Equipment and Automation of Ships of the National University "Odesa Maritime Academy".

The purpose of the master's thesis is to study: The purpose of the work is to resolve the contradiction between the requirements for the control systems of the electric drive of the starting air compressor and its operation demanded by practice and the capabilities of such systems used in ship equipment, by establishing methods and means of improving starting modes and intelligent technologies for servicing operating modes.

To achieve this purpose, *the following tasks* were set and solved:

1. Classification of starting air compressors, critical review and comparison of known approaches and methods dedicated to the problem of soft start of electric drives of starting air compressors and modern methods for solving the problem of such start.
2. Analysis of energy processes in the starting air compressor HV2/285A and the proposed technical solutions for soft start of the electric drive.
3. Research and computer modeling of starting modes of the electric drive of the starting air compressor of the main engine using various methods.
4. Development of an expert system of fuzzy logic to ensure the operation of the starting air compressor of the main engine

Object of research: The object of the master's thesis is the processes of energy conversion in ship electrical power systems, in particular, the processes in the intelligent control system and diagnostics of the ship starting air compressor.

The subject of research: The subject of the research is models and methods of research of energy conversion processes in ship electrical power systems, models and methods of research of processes in the intelligent control system and diagnostics of the ship starting air compressor.

Research methods: mathematical modeling methods, methods of electric drive theory, methods of system analysis, methods of artificial intelligence.

Hypothesis: The hypothesis of the study is that based on the construction of mathematical models of the studied processes in the electric drive of a ship's starting air compressor, it is possible to improve its starting processes and assess its technical condition.

Scientific novelty of the obtained results:

- Based on the review and analysis of existing solutions, the possibility of improving the start-up algorithms of the electric drive of the starting air compressor of the main engine was considered.

- It was established that the smooth start-up of the electric drive of the starting air compressor of the main engine can be ensured by various technical means, in particular by changing only the voltage with fairly simple circuit and technical solutions or by simultaneously changing the voltage and frequency using the appropriate converter.

- Intelligent control algorithms in the ship's control system and diagnostics of the ship's starting air compressor are proposed.

The practical significance of the obtained results: The practical significance of the results obtained is as follows: based on analytical justifications, computer modeling and analysis of research into energy conversion processes in ship electrical power systems, in particular, processes in the control and diagnostic system of the ship's starting air compressor, it was established that the use of modern approaches and technical solutions to ensure smooth start-up of the electric drive provides a reduction in the starting current and, thereby, increased reliability and improved resource indicators of the system, diagnostic algorithms using intelligent methods provide a reliable determination of the technical condition.

Approbation of the results of the thesis: Approbation of the results of the master's research: a report on the topic of this work was discussed at the XV international scientific and technical conference "Ship electrical engineering, electronics and automation" (CEEA-2025), which was held at the National University "Odesa Maritime Academy", the city of Odesa.

Publications: The scientific article “Modeling of transient modes of the electric drive of the main engine starting air compressor and implementation problems” with the related topic of the thesis was published in the materials of the XV international scientific and technical conference “Marine electrical engineering, electronics and automation” (CEEA-2025).

CONTROL PROCESSES, SHIP STARTING AIR COMPRESSOR, ELECTRIC DRIVE, TECHNICAL CONDITION, DIAGNOSTICS, FUZZY EXPERT SYSTEM

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	14
ВСТУП.....	15
1 КЛАСИФІКАЦІЯ СУДНОВИХ КОМПРЕСОРІВ. ПОРІВНЯННЯ ВІДОМИХ ПІДХОДІВ ТА МЕТОДІВ, ПРИСВЯЧЕНИХ ВИРІШЕННЮ ПРОБЛЕМИ ПЛАВНОГО ПУСКУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ КОМПРЕСОРІВ ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ	16
1.1 Класифікація суднових компресорів	16
1.2 Опис конструкції суднового поршневого компресора	19
1.3 Методи та пристрої плавного пуску асинхронних електроприводів суднових компресорів	21
1.4 Аналіз літературних джерел, присвячених методам плавного пуску електроприводів суднових компресорів	27
Висновки до розділу 1	29
2 АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В КОМПРЕСОРІ ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ ТА ПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПЛАВНОГО ПУСКУ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	30
2.1 Основна інформація про судно	30
2.2 Судновий поршневий компресор пускового повітря. Загальні відомості	33
2.3 Електропривод суднового компресора пускового повітря HV2/285A та опис програми керування	37
2.4 Пристрій плавного пуску SIRIUS 3RW4056-6BB44 фірми SIEMENS та принцип його роботи	39
2.5 Принцип роботи пристрою плавного пуску з 2-фазним керуванням	42
2.6 Види запуску	44
Висновки до розділу 2	47
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	

ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОМПРЕСОРА ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА	48
3.1 Розрахунок енергетичних та механічних характеристик електроприводу компресора пускового повітря головного двигуна	48
3.2 Дослідження системи векторного керування	52
3.3 Моделювання процесів у електроприводі компресора пускового повітря	60
Висновки до розділу 3	69
4. РОЗРОБКА ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОМПРЕСОРА ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА	70
4.1 Технічне обслуговування компресора пускового повітря	70
4.2 Розробка програми для нечіткої системи порад оператору суднового компресора пускового повітря	74
Висновки до розділу 4	83
ВИСНОВКИ.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	88
ДОДАТОК А.	92
ДОДАТОК Б.	94

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун;
ГД – головний двигун;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
ПК – персональний комп'ютер;
ПЛК – програмований логічний контролер;
ППП – пристрій плавного пуску;
САР – система автоматичного регулювання;
ТО – технічне обслуговування;
ЦПК – центральний пункт керування;
ЧП – частотний перетворювач;
ЧРП – частотно-регульований пуск;
АВ – Автоматичний вимикач,
ГРЩ – Головний розподільний щит,
ДАУ – Дистанційне автоматизоване управління,
СЕЕС – Суднова електроенергетична система,
ДГУ – дизель-генераторна установка;
ОД – об'єкт діагностування;
ПНВТ – паливний насос високого тиску;
СЕЕС – суднова електроенергетична система;
СТД – система технічного діагностування;
ТС – технічний стан;
ТУ – технічні умови;
ШІ – штучний інтелект;

ВСТУП

Сучасні вимоги до рівня досконалості технічних рішень автоматизації суднових систем потребують віднайдення таких засобів автоматизації, які мають найкращі техніко-економічні показники та забезпечують вирішення поставлених завдань найбільш досконалими методами. Однією із важливих складових суднових систем є сукупність пристроїв запуску головного двигуна за допомогою компресору пускового повітря. Такий компресор є складним технічним пристроєм і його рух забезпечується відповідним електроприводом, керування яким потребує специфічних особливостей, зумовлених особливостями руху об'єкту. Найбільш важливим питанням є забезпечення відповідних процесів пуску електроприводу із урахуванням вимог до динамічних процесів у компресорі пускового повітря для забезпечення головного завдання – пуску головного двигуна. Запуск головного двигуна за допомогою компресора пускового повітря, який виконується за допомогою керованого електроприводу, супроводжується значними моментами статичного та динамічного навантаження, що потребує обґрунтування відповідних методів пуску електроприводу.

Найбільш важливою проблемою обґрунтування таких методів є забезпечення допустимого перенавантаження електроприводу по пусковому струму.

Експлуатаційний період функціонування компресору пускового повітря потребує відповідних програмно-алгоритмічних рішень, які зумовлені невизначеністю деяких умов вихідних даних. Тому забезпечення експлуатаційного періоду є важливим питанням, яке потребує вирішення за допомогою сучасних технологій штучного інтелекту. Інтенсивний розвиток інформаційних і комп'ютерних технологій, зокрема, методів штучного інтелекту, дозволяє використовувати більш досконалі методи і алгоритми контролю і діагностування технічного стану об'єктів

Звідси, удосконалення процесів управління у електроприводі суднового компресора пускового повітря та оцінки його технічного стану на протязі довготривалої експлуатації, є актуальною науково-технічною проблемою..

1 КЛАСИФІКАЦІЯ СУДНОВИХ КОМПРЕСОРІВ. ПОРІВНЯННЯ ВІДОМИХ ПІДХОДІВ ТА МЕТОДІВ, ПРИСВЯЧЕНИХ ВИРШЕННЮ ПРОБЛЕМИ ПЛАВНОГО ПУСКУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ КОМПРЕСОРІВ ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ

1.1 Класифікація суднових компресорів

Компресор (від латів. *compressio* — стиск) — механізм (пристрій) підвищення тиску (стиснення) і переміщення газоподібних речовин.

Компресори є на будь-якому судні. Області їх застосування у судових умовах дуже різноманітні. Компресори є обов'язковим елементом судових систем стисненого повітря, холодильних установок та ін.

Основне призначення стисненого повітря на судні – це пуск та реверсування головних та запуск допоміжних двигунів дизельної енергетичної установки. Крім того, стиснене повітря використовується для очищення поверхонь нагрівання котлів, теплообмінників, у засобах пневматичного контролю, у системах автоматики та господарсько-побутових потреб.

У холодильних установках компресори забезпечують стиск холодоагентів до певних тисків та забезпечення їхньої циркуляції по замкнутому контуру. Компресор холодильної машини є, як правило, найбільш складним і дорогим елементом парокомпресійної холодильної машини.

Компресорний механізм використовує ряд фізичних явищ, що ведуть до збільшення енергії газу, тобто підвищення його тиску.

У залежності від фізичних явищ, які використовуються для збільшення тиску робочого середовища, виділяють дві основні групи компресорів:

1. Машини, у яких тиск підвищується шляхом зменшення об'єму, що займає газ, називаються компресорами об'ємної дії. Іноді зустрічаються компресори витіснення чи статичної дії. Для таких компресорів характерно пряме перетворення механічної енергії двигуна на потенційну енергію газу і робочий процес є

уривчастим (періодичним). До них відносяться компресори: поршневі, мембранні, ротаційні, водокільцеві, гвинтові, пластинчасті, спіральні (з обертальним переміщенням робочого об'єму, що змінюється) і ряд інших різновидів.

2. Машина, в яких підвищення тиску здійснюється шляхом перетворення механічної енергії в кінетичну енергію спрямованого руху газу з подальшим перетворенням її на потенційну (енергію тиску), називають компресорами динамічної дії. У цих компресорах процес перетворення енергії безперервний.

Динамічні компресори, де потік газу подається на лопатки, що обертаються, називаються турбокомпресорами.

Крім того, існують компресори струменеві, що базуються на обміні кількістю руху між газовими потоками. У деяких класифікаціях вони включаються до групи компресорів динамічної дії. Серед них є компресори ежектори та інжектори.

За принципом дії усі компресори (окрім струминних) поділяються за принципом дії на три основні групи: поршневі, роторні та лопатеві.

1) Поршневі компресори. Принцип дії поршневих компресорів ґрунтується на стисканні газу в замкненому об'ємі за рахунок зменшення його простору.

Для поршневих компресорів характерними є періодичність робочого процесу та невелика швидкість потоку газу ($1,5 \div 6,0$ м/с) у процесах всмоктування, стискання та нагнітання.

Існують різні варіанти механізмів передавання енергії від вала до поршня. Найпоширенішим є кривошипно-шатунний механізм (КШМ). Крім нього, застосовуються компресори з кулісним, кулачковим приводом, приводом типу "хитна шайба", аксіально-поршневі модифікації та інші конструктивні варіанти. У мембранних компресорах функцію поршня виконує гнучка мембрана, що забезпечує герметичне розділення робочого середовища від механічних елементів.

2) Роторні компресори. До групи роторних компресорів, які здійснюють об'ємну дію на газ за рахунок обертального руху робочого органу, належить найбільша кількість різновидів: гвинтові, пластинчасті (шиберні), зубчато-роторні, спіральні, кулачкові, рідинно-кільцеві та інші типи.

У технічній літературі компресори цієї групи можуть позначатися як “роторні” або “ротаційні”. У деяких класифікаціях ці терміни розділяють, а гвинтові компресори навіть виділяють в окрему підгрупу.

За способом передавання енергії поршневі та роторні компресори належать до компресорів об’ємної дії, тому іноді роторні модифікації розглядають як різновид поршневих.

3) Компресори динамічної дії (лопатові). До компресорів динамічного принципу дії, конструктивно лопатевого типу (турбокомпресорів), належать дві основні підгрупи: відцентрові та осьові (іноді також діагональні або відцентрово-осьові). Їхні назви відображають орієнтацію поверхонь, що спрямовують потік рухомого газу.

Окремо виділяють підгрупу вихрових компресорів, у яких рух газу подібний до процесів у відцентрових машинах, проте характеризується багаторазовою циркуляцією (вихром) робочого середовища через робоче колесо та нерухомі елементи ступеня.

Кожен лопатевий компресор складається з робочих коліс і направляючих апаратів. У відцентрових компресорах переважає радіальний напрям руху частинок газу, тоді як в осьових — рух здійснюється переважно вздовж циліндричних поверхонь, паралельних осі обертання вала.

На суднах компресори динамічного типу застосовуються переважно у таких випадках:

- відцентрові компресори — у системах наддуву дизелів, а також як кріогенні турбокомпресори на газовозах;
- осьові компресори — у системах керування креном (антикренових системах) суден типу Ro–Ro з апарелями; іноді встановлюються на контейнеровозах, суднах із важковаговими стрілами, а також у складі протиобледенювальних систем суден криголамного класу;
- вихрові компресори — застосовуються у промисловості як вакуумні агрегати або для перекачування повітря й газів; на суднах використовуються рідко.

За виконанням механізму компресори розрізняються:

- 1) За кількістю ступенів стиску компресори бувають одно-, дво- і багатоступінчасті.
- 2) Компресори з повітряним чи водяним охолодженням.
- 3) З приводом від електродвигуна або від внутрішнього двигуна згоряння, парової або газової турбіни, або з ручним приводом.
- 4) За типом з'єднання з приводом: муфтове, клинопасове або пряме.
- 5) Компресори можуть бути масляні та безмасляні.

За призначенням компресори поділяються на:

1) компресори пускового повітря, компресори автоматики, компресори повітря господарчих потреб, компресори аварійні, компресори для заправлення аквалангів та інших призначень;

2) Окремі типи – це компресори, що експлуатуються у складі установок, призначених для охолодження, до яких належать: - холодильні або рефрижераторні компресори; кріогенні компресори - спеціальні машини, в яких газ хоча б на одній із стадій циклу має кріогенну температуру ($-153\text{ }^{\circ}\text{C}$ - температури конденсації природного газу).

У якості компресорів стислого повітря на суднах широко застосовуються поршневі компресори.

1.2 Опис конструкції суднового поршневого компресора

Поршневий компресор відноситься до нагнітачів об'ємної дії [2]. Робота таких машин основана на всмоктуванні і витісненні повітря робочим органом компресора (рис. 1.1).

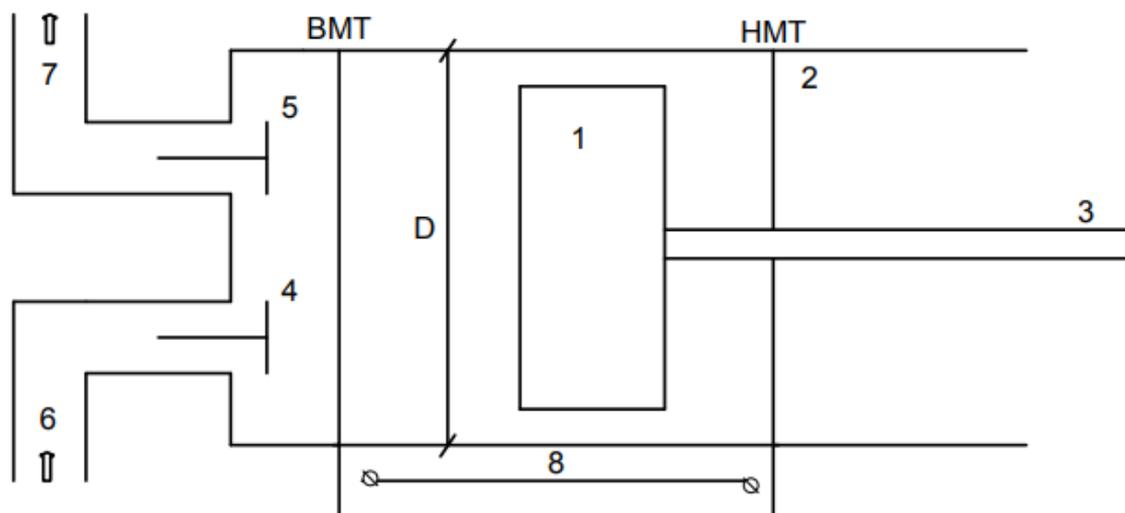


Рисунок 1.1 – Схема поршневого компресора

Крутний момент передається від джерела механічної енергії через кривошипно-шатунний механізм 3 на поршень 1. При русі поршня в циліндрі 2 з крайнього лівого положення в крайнє праве положення (такт всмоктування) відкривається впускний клапан 4 і робоче тіло через впускний патрубок 6 надходить в циліндр в порожнину над поршнем. В цей час нагнітальний клапан 5 закритий. Зворотний рух поршня відбувається при закритому впускному клапані і викликає зростання тиску в циліндрі (такт стиснення). В момент відкриття випускного клапана робоче тіло починає надходити в нагнітальний патрубок 7 (такт виштовхування). Цикл завершується розширенням тиску, що залишився в порожнині над поршнем (такт розширення). Теоретично процеси стиснення і розширення повітря в компресорі можуть бути описані рівнянням політропи $p + V^n = const$, а процеси виштовхування і всмоктування - рівнянням ізобари $p = const$. В реальних компресорах протікання процесів стиснення і розширення в значній мірі визначаються умовами теплообміну між газом і навколишнім середовищем. Зазвичай поршневі компресори виготовляються з водяним охолодженням циліндра і кришки компресора. Для них показники політропи для процесів стиснення і розширення в середньому можуть бути прийняті $n_p = 1,35$ і $n_p = 1,2$ відповідно. Щоб уникнути удару поршня об кришку компресора в

положенні верхньої мертвої точки (ВМТ), циліндри виготовляються з “мертвим” (шкідливим) простором, заповненим газом. Наявність “мертвого” простору призводить до того, що не весь робочий об’єм заповнюється свіжим зарядом робочого тіла. Оцінюється об’єм “мертвого простору” зазвичай в частках від робочого об’єму циліндра

$$a = V_M / V_h,$$

де V_M – об’єм “мертвого” простору. V_h – робочий об’єм компресора.

У зв'язку з наявністю “мертвого” простору об’єм всмоктуваного газу менш робочого об’єму. Відношення цих величин визначає об’ємний коефіцієнт подачі компресора λ_o [2]. Крім цього, на об’єм газу, що подається, негативно впливають нагрів робочого тіла, що надходить, при контакті з нагрітими деталями компресора (коефіцієнт λ_r); негерметичність деталей (коефіцієнт λ_{yr}); дроселювання при русі робочого тіла через клапани (коефіцієнт $\lambda_{др}$).

З урахуванням сказаного подача поршневого компресора односторонньої дії може бути визначена

$$Q = \lambda + V_h + n,$$

де λ – коефіцієнт подачі, n – число подвійних ходів поршня за одиницю часу. Зворотно-поступальний рух поршня пов'язаний з виникненням великих величин інерції, тому середня швидкість поршня не перевищує, як правило, 5 м/с. Це дещо обмежує подачу поршневих компресорів. Разом з тим, конструкція нагнітачів такого типу дозволяє досягати великих значень ступеня підвищення тиску, навіть при незначних швидкостях руху поршня.

1.3 Методи та пристрої плавного пуску асинхронних електроприводів судових компресорів

Найбільше поширення на судах торгового флоту як головні компресори пускового повітря отримали поршневі компресори, що створюють ефект компресії за рахунок зменшення об’єму хладагенту при русі поршня в циліндрі. Для підвищення ефективності роботи судової компресорної станції необхідно

досліджувати пускові режими електроприводу, що працює на поршневий компресор.

Нині, у якості електроприводу компресорів пускового повітря на судах торгового флоту широко застосовуються асинхронні електроприводи, основною частиною яких є асинхронні двигуни (АД).

При прямому пуску потужного АД великий початковий пусковий струм може викликати значні термічні навантаження обмотки, наслідком чого може бути прискорене старіння ізоляції, її пошкодження і, як наслідок, коротке міжвиткове замикання. Значні коливання моменту двигуна на початковому етапі запуску, які можуть перевищувати 4-5 кратно значення номінального моменту, створюють несприятливі умови до роботи механіки.

На практиці широко застосовується автотрансформаторний пуск (для потужних двигунів) чи пуск “зірка - трикутник” [3]. Такі рішення дозволяють обмежити величину початкових кидків пускового струму, проте повною мірою не усувають проблему коливань пускового моменту і не вирішують завдання формування необхідної для конкретного механізму пускової характеристики (формування кривої швидкості при пуску).

Повністю усунути перераховані вище проблеми можна, якщо здійснювати плавний пуск асинхронного двигуна. Сучасні засоби перетворювальної техніки дозволяють використовувати наступні методи керування двигуном при його пуску:

- плавне наростання напруги при фіксованій частоті живлення та формування необхідної кривої швидкості, що забезпечується плавними пускачами на базі тиристорних регуляторів напруги;

- частотне регулювання: (зміна) швидкості із застосуванням перетворювача частоти.

Вказані пристрої, крім виконання основного завдання, а саме, забезпечення плавного пуску, реалізують у повній мірі завдання захисту двигуна і механізму, а також проведення моніторингу електроприводу. Економічна доцільність застосування того чи іншого пристрою полягає у підвищенні надійності, збільшенні терміну служби обладнання та збільшення міжремонтного періоду.

Проте застосування дорогих перетворювачів частоти не завжди економічно і технічно обґрунтовано, оскільки більшість їх функцій реалізують більш дешеві та зручні в експлуатації пристрої плавного пуску.

Пристрій плавного пуску (ППП) краще застосовувати для вирішення завдань, коли відсутня необхідність регулювання швидкості обертання електроприводу. Пристрій плавного пуску має в 4 - 5 більші переважувальні характеристики. Такий пристрій дозволяє плавно збільшувати струм та зміну обертів двигуна з нульового значення, зняти обмеження за кількістю включень за годину.

Пристрій плавного пуску Altistart 48 за принципом роботи є тиристорним регулятором напруги [3]. Для реалізації плавного пуску асинхронного двигуна повинна формуватися крива наростання напруги, що прикладається до обмотки статора. Для вирішення цього завдання більшість виробників пристроїв плавного пуску застосовують задавачі лінійного наростання напруги з можливістю завдання та регулювання темпу наростання, та/або здійснюють обмеження пускового струму двигуна на заданому рівні (2-5-кратне значення). Такий підхід не дозволяє отримати плавне та інтенсивне наростання швидкості двигуна під час розгону. Пристрій Altistart 48 використовує, крім вище наведеного принципу, інший підхід: регулювання пускового моменту шляхом створення замкнутої системи автоматичного регулювання (САР) моменту двигуна та формування від задавача інтенсивності необхідної кривої зміни моменту. Тому вдається реалізувати лінійний характер наростання швидкості широкого класу механізмів, у тому числі – компресорів пускового повітря. Пристрій Altistart 48 також дозволяє реалізувати контрольований процес гальмування (зупинки) механізму.

Основний недолік пристроїв плавного пуску на основі тиристорних регуляторів напруги – низьке значення початкового пускового моменту двигуна ($0,1 - 1,0 M_n$). Це може створити проблеми для забезпечення пуску механізмів із значним моментом опору під час рушання з місця.

Головною перевагою застосування ППП є забезпечення граничної швидкодії при відключенні в аварійній ситуації. При впровадженні таких виробів у системах із сучасними контролерами захисту забезпечується час відключення, навіть при

короткому замиканні, трохи більше 30 мс (з урахуванням реакції контролера трохи більше 10 мс). За такої швидкодії ризик пошкодження обладнання від дуги є мінімальним. Процес відключення носить природний характер виключення тиристора на нулі синусоїди; при цьому відсутні перенапруги, що виникають при відключенні контакторів і особливо вакуумних вимикачів через неможливість забезпечити нульове значення струму зрізу. Всі пристрої плавного пуску мають систему стеження за набором обертів електродвигуна з автоматичним вимкненням функції плавного пуску при досягненні обертів, близьких до номінального значення. Це дозволяє уникнути биття двигуна на завершальній стадії плавного пуску, причому, незалежно від навантаження двигуна.

Таким чином, застосування пристроїв плавного пуску в електроприводах з асинхронним електродвигуном дає велику кількість переваг, що дозволяє організувати ефективний пуск двигуна та зменшити кількість виходів з ладу таких систем.

Широке застосування у світовій практиці отримав частотно-регульований електропривод із асинхронним двигуном. Частотне регулювання швидкості обертання валу асинхронного двигуна здійснюється за допомогою електронного пристрою, який називається частотним перетворювачем. Вищевказаний ефект досягається шляхом зміни частоти та амплітуди трифазної напруги, що надходить на електродвигун. Таким чином, змінюючи параметри напруги живлення (частотне управління), можна робити швидкість обертання двигуна, як нижче, так і вище номінального значення. Застосування частотних перетворювачів дозволяє отримати високу точність регулювання частоти обертання електричного двигуна, економію електроенергії у разі змінного навантаження (тобто роботи електричного двигуна з неповним навантаженням), зробити плавний пуск двигуна, що значно зменшує його зношування і дозволяє підвищити ресурс обладнання, мати максимальний пусковий момент на валу електричного двигуна, отримати можливість дистанційної діагностики приводу по промисловій мережі. Частотний перетворювач забезпечує кероване гальмування та автоматичний перезапуск при

зникненні напруги, стабілізацію швидкості обертання при зміні навантаження, розпізнавання випадання фази для вхідний і вихідний ланцюгів, облік мотогодин.

Сучасний перетворювач частоти типу Altivar виконується зі ланкою постійного струму та вихідним інвертором на базі IGBT транзисторів [http://www.ems.org.ua/articles_3.shtml]. Він є завершеним комплектним пристроєм, призначеним для створення регульованого асинхронного електроприводу та вирішення завдань плавного пуску та гальмування, регулювання моменту, швидкості двигуна та технологічних параметрів. Поряд із завданнями регулювання пристрій вирішує завдання захисту, блокування та діагностики електроприводу. Застосування сучасних силових модулів, мікропроцесорної техніки та складного програмного забезпечення робить пристрій досить дорогим продуктом. Основна перевага Altivar перед Alristart – це високий пусковий момент (1,5 – 1,8 M_n) і можливість формування плавного наростання і спадання швидкості за наперед обраним законом (лінійне наростання, S-, U-подібні криві швидкості).

При використанні частотних перетворювачів та пристроїв плавного пуску відбувається скорочення пускових струмів у 1,5 – 3 рази, знижується ризик механічного руйнування приводу та валу електродвигуна, зменшується електромеханічна напруга в обмотках двигуна.

Пристрій плавного пуску виробництва НВО “Перетворювальна техніка”, крім перерахованих вище методів пуску, використовує алгоритм “квазічастотного” регулювання [4], завдяки чому вдається підвищити початковий пусковий момент двигуна без необхідності додаткового початкового форсування струму двигуна. Також пристрій дозволяє реалізувати реверсування і контрольований процес гальмування (зупинки) механізму, як власними засобами, так і шляхом керування зовнішніми джерелами динамічного гальмування та механічними гальмівними пристроями.

У найпоширеніших частотних перетворювачах (ЧП), що використовуються для керування асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором, застосовується скалярне та векторне частотне керування.

При скалярному управлінні за певним законом змінюють амплітуду та частоту доданої до двигуна напруги. Причому, не можна змінювати тільки частоту напруги живлення, так як це призведе до відхилення від розрахункових значень максимального, пускового моментів двигуна, ККД та коефіцієнта потужності. Тому для підтримки необхідних робочих характеристик двигуна необхідно, відповідно, змінити амплітуду напруги. У існуючих частотних перетворювачах, використовуючи метод скалярного управління, при зміні частоти амплітуда напруги змінюється таким чином, що відношення максимального моменту двигуна до поточного моменту навантаження залишається незмінним. Таке відношення називається перевантажувальною здатністю двигуна. При незмінності перевантажувальної здатності номінальні коефіцієнт потужності та ККД двигуна у всьому діапазоні регулювання частоти обертання мало змінюються. Водночас на малих частотах максимальний момент електродвигуна починає падати. Для вирішення цієї проблеми та для збільшення пускового моменту використовується підвищення рівня напруги живлення.

Скалярне керування зазвичай використовується, коли немає необхідності швидкого реагування на зміни завдання крутного моменту та швидкості. Воно має важливу позитивну рису: одним перетворювачем можна регулювати швидкість обертання кількох підключених до нього електродвигунів.

При векторному керуванні струм двигуна поділяють на два вектори: один із них виробляє потік намагнічування, а інший утворює крутний момент, кожен з яких регулюється окремо. Обертальний момент визначається струмом статора, який створює збуджуюче магнітне поле. При безпосередньому управлінні моментом необхідно змінювати не тільки амплітуду, але і вектор струму, яким є фаза статорного струму. Для управління вектором струму та положенням магнітного потоку статора відносно ротора, що обертається, потрібно знати точне положення ротора в будь-який момент часу. Завдання вирішується або за допомогою датчика положення ротора, або визначенням положення ротора шляхом обчислень по струмах та напруги статорних обмоток.

Векторне управління забезпечує високу швидкодію та точність управління швидкістю електродвигуна та крутного моменту. Також воно дозволяє суттєво збільшити діапазон управління, точність регулювання та підвищити швидкодію електроприводу. Цей метод забезпечує безпосереднє керування крутним моментом двигуна.

Основна відмінність між цими двома типами управління полягає в тому, що скалярне управління враховує тільки величини миттєвих електричних величин (магнітного потоку, струму та напруги), прикладених до статора, з рівняннями стаціонарного стану на основі еквівалентного електричного ланцюга електродвигуна. При векторному управлінні асинхронний двигун розглядається як двигун постійного струму з окремо керованими моментом та потоком. При цьому типі управління розраховуються миттєві електричні величини, що впливають на потокозчеплення ротора як векторів, та його рівняння ґрунтуються на просторовій динамічній моделі двигуна.

1.4 Аналіз літературних джерел, присвячених методам плавного пуску електроприводів суднових компресорів

Існує низка публікацій, присвячених розгляду пускових режимів та методів плавного пуску асинхронних електроприводів поршневих компресорів. У статті [5] проведено оцінку навантаження електроприводу поршневого компресора суднової установки рефрижератора. Навантаження розраховане за допомогою індикаторної діаграми поршневого компресора потужністю 10,3 кВт [6]. Отримано графік зміни моменту навантаження на валу компресора залежно від кута повороту.

У статті [7] зроблено побудову та дослідження пускових характеристик електроприводу поршневого компресора суднової холодильної установки з використанням математичної моделі нерівномірного моменту навантаження. Залежність моменту навантаження на валу електроприводу поршневого компресора від кута повороту представлена у вигляді математичної моделі. Побудовано графіки перехідних процесів за швидкістю і струмом при різних

значеннях моменту інерції двигуна і маховика. Чисельне моделювання показало, що при періодичному змінному навантаженні без маховика, пуск асинхронного електродвигуна виконується в рамках номінальних значень, але в режимі роботи спостерігаються значні пульсації струму більше 10%. Визначено, що при додаванні моменту інерції маховика в модель, що створює додатковий момент інерції, пульсації швидкості обертання та струму зменшуються, але збільшується час пуску електроприводу.

Стаття [8] присвячена аналізу існуючих принципів частотного управління та обґрунтування вибору скалярного принципу управління трифазним асинхронним електродвигуном компресора. Визначено регламентовані значення пульсацій частоти обертання електродвигуна компресора при різних діапазонах регулювання швидкості, і на основі цього запропоновано використання замкненої двоконтурної системи підпорядкованого регулювання координат під час роботи перетворювача частоти як джерела струму та системи частотного управління. Також запропоновано ефективний бездатчиковий спосіб визначення частоти обертання та моменту опору електродвигуна компресора на основі теорії спостерігачів Люенбергера.

Але відомі підходи щодо забезпечення оптимальних режимів суднового компресора пускового повітря не повністю враховують особливості його застосування в реальних умовах експлуатації, технічні вимоги та техніко-економічні показники різних пропонованих рішень.

Висновки до розділу 1

1. На основі розгляду принципів дії та класифікації суднових компресорів і досвіду застосування обґрунтовано, що суднові компресори поршневого типу мають переваги щодо застосування їх в системах пуску головного двигуна на морських судах.

2. Встановлено, що для суднових компресорів пускового повітря головного двигуна асинхронні електроприводи практично не мають альтернативи щодо вимог та умов застосування.

3. Враховуючи короткочасний напружений режим суднового компресору пускового повітря головного двигуна, основним проблемним питанням є забезпечення плавного пуску асинхронного електроприводу для уникнення перенавантажень по пусковому струму, що є принциповою особливістю асинхронного електроприводу.

4. На основі проведеного аналізу методів та пристроїв плавного пуску асинхронних електроприводів суднових компресорів пускового повітря головного двигуна виявлені альтернативні та конкуруючі підходи щодо вирішення поставленого завдання: використання достатньо простих спеціалізованих пристроїв плавного пуску та застосування універсальних, але достатньо складних, засобів частотного регульованого електроприводу.

5. Встановлено, що для пом'якшення пуску АД застосовуються частотні перетворювачі і пристрої плавного пуску в залежності від спектру поставлених завдань і забезпечення стійкості роботи електродвигуна. Забезпечення плавного пуску дозволяє продовжити ресурс двигуна та електроприводу. При використанні частотних перетворювачів та пристроїв плавного пуску відбувається скорочення пускових струмів у 1,5–3 рази, знижується ризик механічного руйнування приводу та валу електродвигуна, зменшується електромеханічна напруга в обмотках двигуна.

2 АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В КОМПРЕСОРИ ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ ТА ПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПЛАВНОГО ПУСКУ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1 Основна інформація про судно

У дипломній роботі розглядається судно типу Ro-Ro – спеціалізоване судно-автоперевізник (автомобілевоз), призначене для оперативної доставки автомобілів, обраних клієнтами безпосередньо від виробника. Такий спосіб транспортування є найекономічнішим і найшвидшим варіантом доставки автомобілів до покупця. Звісно, розвиток технологій не обійшов стороною й будівництво автомобілевозів, які постійно вдосконалюються. Зовнішній вигляд судна наведено на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд судна з лівого борту

Архітектурно-конструктивний тип судна – тринадцятипалубне, із надбудовою, розташованою на тринадцятій палубі ближче до носової частини. Навігаційний місток і машинне відділення зміщені до корми. Носова частина має

похилу форму, а корма виконана за типом крейсерської. Судно обладнане двома вантажними рампами — кормовою та бічною, обидві з гідравлічним приводом. Максимальна швидкість становить 18 вузлів.

Підводна частина корпусу має загострену форму, що сприяє зменшенню опору води та, відповідно, підвищенню швидкості руху автомобілевоза. Основне призначення судна — перевезення легкових і вантажних автомобілів, а також гусеничної техніки. Клас Регістру — Vehicles Car Carrier. Основні характеристики судна наведено у табл. 2.1, а основні показники суднової енергетичної установки — у табл. 2.2.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики судна

Довжина найбільша, м	167
Ширина, м	28
Висота борту до головної палуби, м	16,94
Осідання до літньої вантажної марки	8,6
Водотоннажність порожнього судна, тонн	
У порожньому стані	12744,9
навантаженого судна, тонн	39362
дедвейт, тонн	12588
Швидкість ходу судна, вузли: у повному вантажу	18
Район плавання	Необмежений

Таблиця 2.2 – Основні показники суднової енергетичної установки

Параметр	Величина
<i>I</i>	2
Основна напруга	
Напруга, В	440
Частота, Гц	60
Головний двигун	
Тип	Дизель
Марка	MAN B&MW 7S50 ME-C MK 7
Потужність, кВт	11060
Частота обертання валу, об/хв	128
Питома витрата палива, кг/(кВт•год)	181,24
Рушій	
Кількість	Один
Тип	Гребний гвинт регулюючого кроку
Кількість лопатей	4
Діаметр, м	5,9
Крок, м	5,320
Матеріал	NI-AL-Bronze
Маса, кг	18040
Котли	
Допоміжний	
Тип	Thermooil
Модель	30179A07
Кількість, од	Один
Паливо для котла	Дизельне/важке
Виробник	GESAB
Допоміжні двигуни	
Кількість	3
Тип	Дизель
Потужність, кВт	970

Марка	HYUNDAI, HIMESEN 6H21/32
Частота обертання валу, об/хв	720
Генератор, кВт	910
Аварійний двигун	
Кількість	1
Марка	MAN D 2866 TE (SHPD)
Потужність, кВт	235
Частота обертання валу, об/хв	1800
Генератор, кВт	210
Компресори пускового повітря	
Кількість	2
Тип	HV2/285A
Продуктивність, м ³ /год	358
Швидкість обертання, об/хв	875
Потужність, що споживається, кВт	64
Робочий тиск, бар	30
Аварійний компресор	
Кількість	1
Тип	HL2/77
Продуктивність, м ³ /год	28
Швидкість обертання, об/хв	1750
Потужність, що споживається, кВт	7,8
Робочий тиск, бар	30

2.2 Судновий поршневий компресор пускового повітря. Загальні відомості

Компресори пускового повітря [9] призначені для поповнення запасів стисненого повітря, необхідного для пуску та реверсування судових дизелів та інших судових потреб. За конструкцією судові компресори пускового повітря

бувають поршневі та гвинтові, одно-, дво- та багатоступінчасті, а за типом приводу - електроприводні та навішані на дизель.

Компресор пускового повітря HV2/285A, встановлений на досліджуємому судні, є компресором поршневого типу. Загальний вигляд компресора представлений на рис. 2.2, принцип його будови розкриває рис. 2.3.



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд компресора пускового повітря HV2/285A

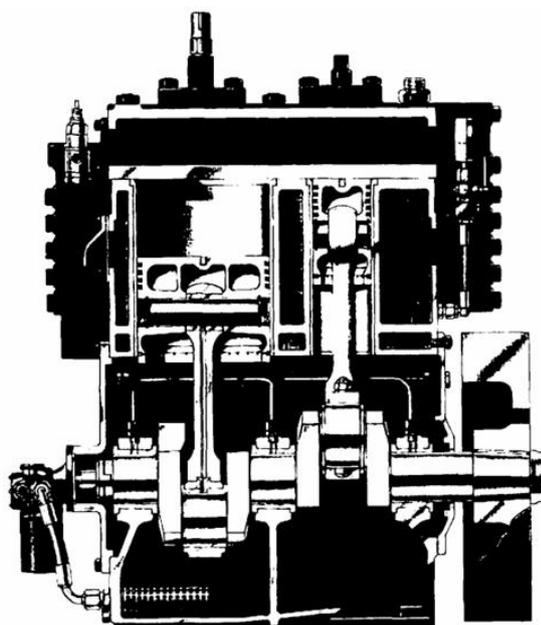


Рисунок 2.3 – Принцип будови компресора пускового повітря HV2/285A

Перший ступінь компресора часто називають ступенем низького тиску (НТ), а другий ступінь – ступенем високого тиску (ВТ). Циркуляція повітря через компресор показана на рисунку 2.4.

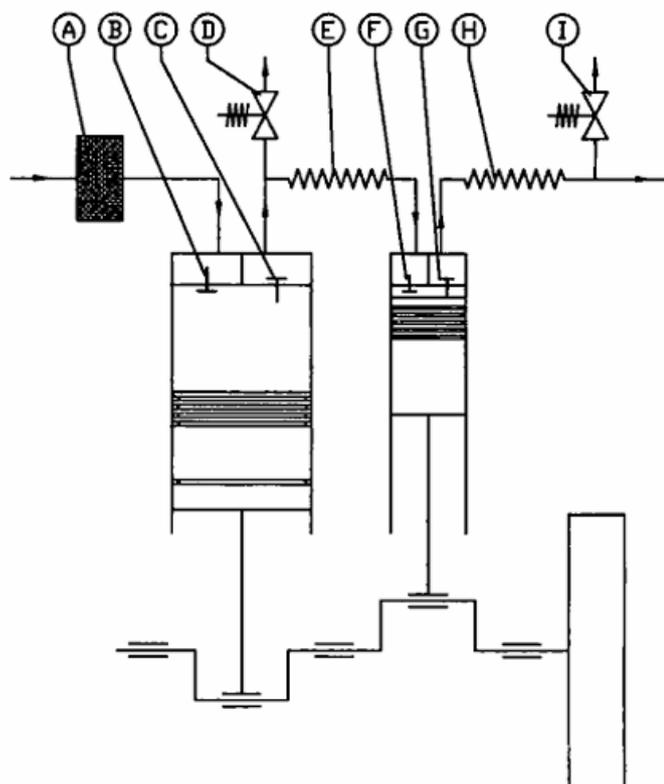


Рисунок 2.4 – Циркуляція повітря через компресор пускового повітря HV2/285A

На рисунку 2.3 застосовані наступні позначення:

- A – Впускний фільтр
- B – Впускний клапан низького тиску
- C – Нагнітальний клапан низького тиску
- D – Запобіжний клапан низького тиску
- E – Охолоджувач низького тиску (інтеркулер)
- F – Впускний клапан високого тиску
- G – Нагнітальний клапан високого тиску
- H – Охолоджувач високого тиску (додатковий охолоджувач)
- I – Запобіжний клапан високого тиску

Усі підшипники в компресорі змащуються під тиском за допомогою шестеренного насоса, підключеного безпосередньо до колінчастого вала.

У блоці циліндрів компресора встановлені два змінні трубчасті охолоджувачі, один з яких охолоджує стиснене повітря після першого ступеня стиснення, а інший – після другого ступеня стиснення.

Впуск і випуск охолоджувальної води розташовані таким чином, що вона циркулює через блок циліндрів, забезпечуючи ефективне охолодження повітря та стінок циліндра компресора. Компресор підвищує тиск повітря з атмосферного до заданого тиску (максимум 35 бар). Компресор оснащений електродвигуном або іншим джерелом рушійної сили на добре закріпленій опорній плиті з гнучким з'єднанням між компресором і двигуном.

Компресор оснащений запобіжними клапанами після першого та другого ступенів стиснення. Ці запобіжні клапани попередньо налаштовуються під час доставки компресора відповідно до робочого тиску, зазначеного замовником, що гарантує, що тиск не перевищує межу, на яку розраховані компресор та система стиснення. Розривна мембрана встановлена на манжеті охолоджувальної рідини блоку циліндрів, яка розривається, якщо камера охолоджувальної рідини піддається аномально високому тиску.

Основні технічні характеристики суднового компресора пускового повітря HV2/285A наведені у додатку А.

Судновий компресор пускового повітря слід розташовувати у тому місці, де навколишнє повітря якомога холодніше, тому, що теплий внутрішній блок зменшує потужність компресора та збільшує ризик закоксування. Температура навколишнього середовища t , електричних компонентів зазвичай не повинна перевищувати 45°C . Труби охолоджувальної води повинні бути встановлені таким чином, щоб не утворювалися повітряні кишеньки. Установка компресора не повинна бути оточена близько іншим обладнанням, яке могло б зашкодити проведенню технічного обслуговування.

2.3 Електропривод суднового компресора пускового повітря HV2/285A та опис програми керування

Основною частиною електропривода компресора HV2/285A є асинхронний електродвигун фірми-виробника SIEMENS модель I LG4 310-8AB60-Z. Основні технічні характеристики електродвигуна:

Номинальна напруга: 440 V,

Частота: 60 Hz,

Номинальний струм: 116 A,

Кратність пускового струму: 6.0,

Номинальна потужність: 66.0 kW,

Коефіцієнт потужності: 0.82,

ККД 92.5 %

Швидкість синхронна 900/888 RPM,

Спосіб запуску: прямий, переключенням “зірка – трикутник”.

Керування електроприводом компресора пускового повітря може здійснюватися у двох режимах: ручному MAN та автоматичному AUT. Пускач оснащений перемикачем MAN/AUT.

У режимі MAN компресор працюватиме незалежно від тиску пуску/зупинки. У режимі MAN не рекомендується залишати компресор працюючим без нагляду, хоча параметри температури, тиску та перевантаження двигуна контролюються.

У режимі 0 mxhte компресор ВИМКНЕНО, але стартер все ще живиться.

В автоматичному режимі AUT компресор керується тиском пуску/зупинки. Пускач оснащений загальною лампою сигналізації та загальним виходом сигналу тривоги. “Сигнал тривоги” – це безпотенційний контакт, запрограмований на дозування, коли стан компресора нормальний. Це означає, що контакт “Сигнал тривоги” розімкнутий, якщо ПЛК не працює, або виявлено несправність.

Сигнал тривоги видається у наступних випадках.

Температура перевищує налаштування перемикача температури. Якщо температура перевищує налаштування перемикача температури, компресор

зупиниться і спрацює “Сигнал тривоги”. “Сигнал тривоги” залишатиметься на екрані, доки не буде натиснута кнопка скидання. Текст “ВИСОКА ТЕМПЕРАТУРА” відобразатиметься на ПЛК і залишатиметься на дисплеї, доки не буде натиснута кнопка скидання.

Аварійна зупинка. Якщо тиск мастила рівня I падає нижче налаштування перемикача температури, компресор зупиниться і спрацює сигнал тривоги. Сигнал тривоги залишатиметься на екрані, доки не буде натиснута кнопка скидання. Текст “ВІДМОВ МАСЛА” відобразатиметься на ПЛК і залишатиметься на дисплеї, доки не буде натиснута кнопка скидання.

Перевантаження двигуна. Якщо спрацює теплове реле перевантаження, компресор зупиниться і спрацює сигнал тривоги. Сигнал тривоги залишатиметься на екрані, доки не буде скинуто теплове реле. Текст “ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ДВИГУНА” відобразатиметься на ПЛК і залишатиметься на дисплеї, доки не буде скинуто теплове реле.

Аварійна зупинка. Якщо кнопка аварійної зупинки активована, компресор зупиниться і пролунає сигнал тривоги. Сигналізація залишатиметься увімкненою, поки кнопку аварійної зупинки не буде відпущено, а кнопка скидання не буде натиснута. На ПЛК відобразатиметься текст “АВАРІЙНА ЗУПИНКА АКТИВОВАНА” та залишатиметься на дисплеї, доки не буде натиснута кнопка скидання. Програма розроблена для автоматичного запуску після відключення електроенергії. Якщо компресор встановлено в режим AUT (АВТОМАТИЧНИЙ), таймер В2 затримає запуск. Якщо компресор знаходиться в режимі MAN (РУЧНИЙ) і відбулося відключення електроенергії, компресор не перезапуститься після відновлення живлення, а його потрібно буде перемкнути на 0 та повернутися до режиму MAN (або AUT).

Стартер розроблений з аварійним вимикачем. Коли цей вимикач спрацює, ПЛК перемикається, і функції сигналізації не активні. Цей вимикач призначений лише для аварійного запуску, і компресор не можна залишати працюючим без нагляду.

Програма містить лічильник годин з функцією часу обслуговування. Коли компресор працює, лічильник годин відображається на екрані. Коли таймер обслуговування досягне 0, індикатор сигналізації почне блимати, показуючи час обслуговування. Щоб скинути налаштування обслуговування, необхідно натиснути кнопку скидання.

Логічна схема управління електроприводом компресора наведена у додатку Б.

2.4 Пристрій плавного пуску SIRIUS 3RW4056-6BB44 фірми SIEMENS та принцип його роботи

Для забезпечення плавного пуску електропривода компресора пускового повітря компресора HV2/285A на розглядаємому судні можливо застосування пристрою плавного пуску SIRIUS 3RW4056-6BB44 фірми SIEMENS. Номінальні значення струму 162 А та потужності 90 kW при напрузі 400 V.

Пристрій плавного пуску SIRIUS 3RW4056-6BB44 фірми SIEMENS працює за принципом поступового збільшення напруги, що подається на двигун, від початкового (нижчого за номінальне) до повного номінального значення. Цей процес знижує пусковий струм і механічне навантаження на двигун і мережу, після чого, при досягненні повної напруги, електроніка пристрою шунтується або відключається, і двигун працює в нормальному режимі.

Принцип роботи пристрою плавного пуску SIRIUS 3RW4056-6BB44 полягає у наступному.

Плавний старт: на початку пуску пристрій подає на двигун знижену початкову напругу (зазвичай на 40-60% меншу за номінальну).

Поступове збільшення напруги: електроніка пристрою поступово збільшує цю напругу до повної номінальної, поки двигун не досягне заданої швидкості обертання.

Зниження пускового струму: внаслідок поступового збільшення напруги, пусковий струм двигуна значно знижується, а також зменшується швидкість його наростання.

Шунтування: коли двигун досягає номінальної швидкості, а напруга стає повною, електроніка пристрою плавно відключається або шунтується, дозволяючи двигуну працювати на повній потужності без участі пристрою.

У першій та третій фазах пристрою плавного пуску SIRIUS 3RW40 інтегровані по два зустрічно включених тиристора: один тиристор – для позитивного та один тиристор – для негативного напівперіоду. Струм у третій, некерованій фазі є сумою струмів із двох керованих фаз.

За допомогою відсічення, чинне значення напруги на двигуні підвищується від початкового значення, що встановлюється, до номінального значення за час пуску, що встановлюється. Струм двигуна змінюється пропорційно до напруги на двигуні. Тим самим, пусковий струм знижується в стільки ж разів, у скільки разів менше пускова напруга, встановлена на пристрої. Пусковий момент змінюється пропорційно квадрату напруги на двигуні. Пусковий момент, тим самим, зменшується у квадратичному відношенні до напруги.

Рис. 2.5 та рис. 2.6 показують характеристику пускового струму та пускового моменту обертання асинхронного двигуна трифазного струму у поєднанні з пристроєм плавного пуску.

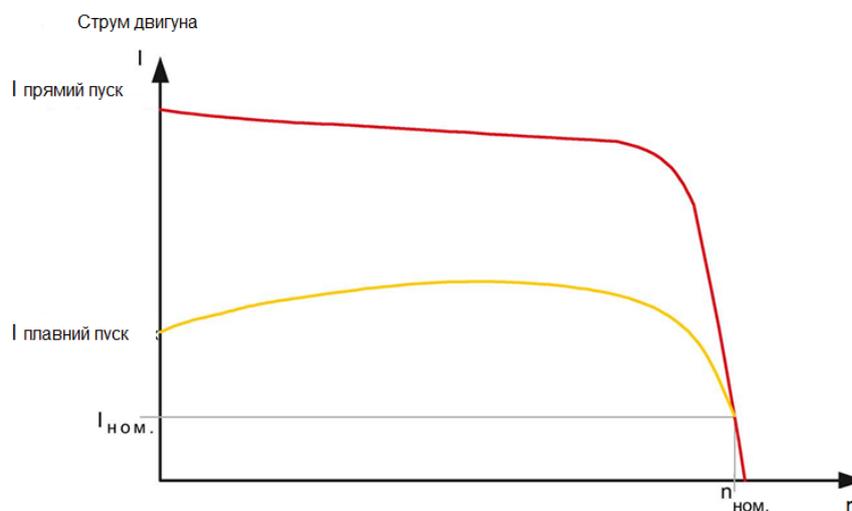


Рисунок 2.5 – Зменшення струму асинхронного двигуна трифазного струму при запуску з пристроєм плавного пуску SIRIUS 3RW40

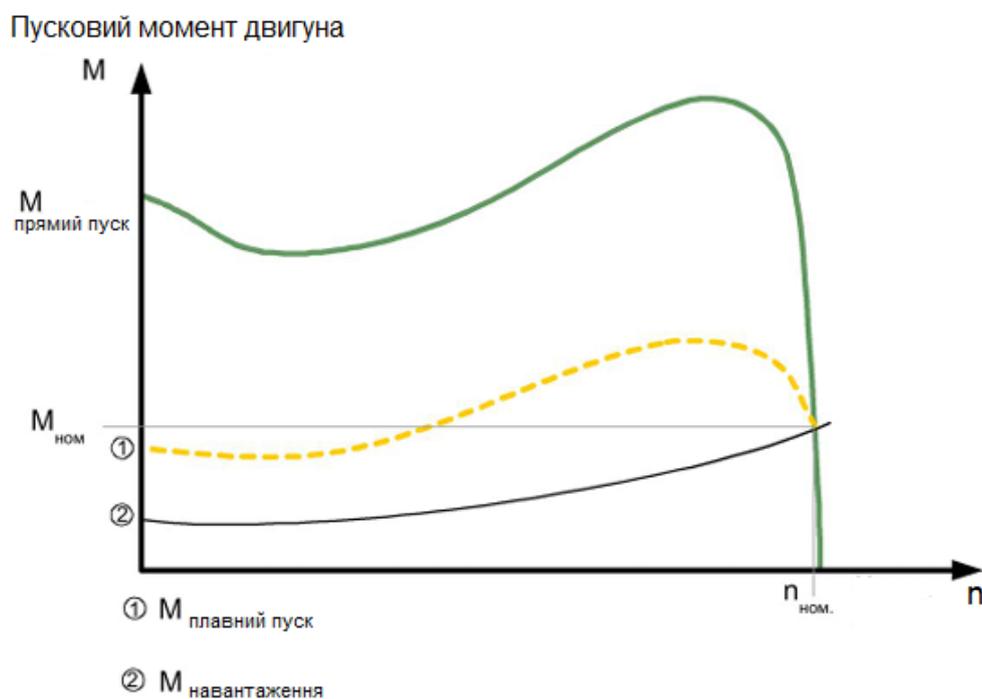


Рисунок 2.6 – Зменшення моменту обертання асинхронного двигуна трифазного струму при запуску з пристроєм плавного пуску SIRIUS 3RW40

При забезпеченні плавного пуску / плавної зупинки пусковий струм та момент двигуна контролюються за допомогою контролю рівня напруги. Момент двигуна зменшується повільно і цим відбувається плавна зупинка. Частота під час цих процесів залишається постійною і відповідає частоті мережі, на відміну від частотно-регульованого принципу управління перетворювачами частоти.

У байпасному режимі роботи після виконання розгону двигуна тиристори перебувають у повністю відкритому стані і тим самим на клеми двигуна подається вся мережева напруга. Так як у робочому режимі немає необхідності в регулюванні напруги двигуна, тиристори шунтуються за допомогою вбудованих (розрахованих для категорії AC1) байпасних контактів. Тим самим під час тривалого режиму роботи зменшуються теплові втрати через нагрівання тиристорів і, відповідно, знижується нагрівання самого пристрою та навколишнього середовища. Байпасні контакти захищаються в робочому режимі вбудованої електронної дугогасною системою. Це запобігає пошкодженню внаслідок розмикання шунтуючих контактів

у разі збою, як, наприклад, при короткочасному перериванні керуючої напруги, при механічних вібраціях або дефекті приводу котушок чи пружини головних контактів після закінчення терміну служби. Рисунок 2.7 показує принцип роботи пристрою плавного пуску SIRIUS 3RW40.

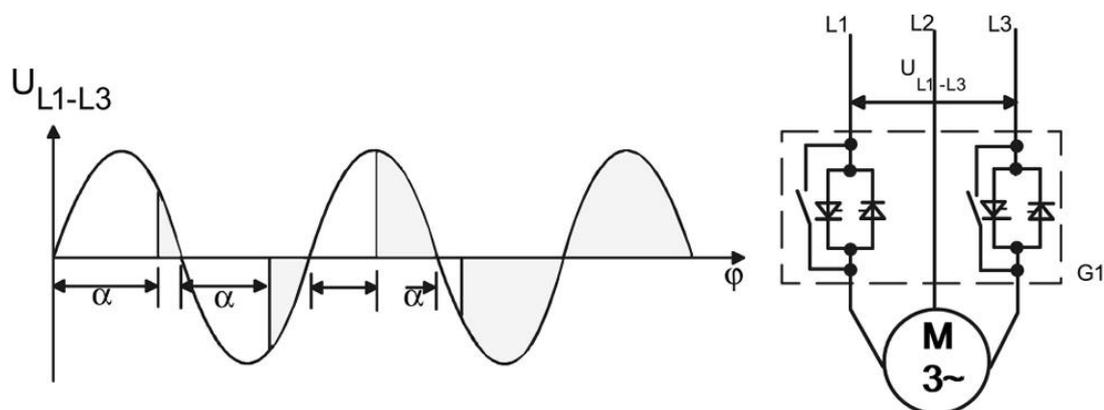


Рисунок 2.7 – Система керування фазовим відсіканням та структурна схема 3-фазного пристрою плавного пуску з 2 керованими фазами (з 2-х фазним управлінням)

2.5 Принцип роботи пристрою плавного пуску з 2-фазним керуванням

Принцип роботи пристрою плавного пуску з 2-фазним керуванням – особливий принцип роботи 3-фазного пристрою плавного пуску 3RW40 з 2-ма керованими фазами із запатентованим фірмою Siemens методом управління “Polarity Balancing” (Балансування полярності).

Пристрій плавного пуску SIRIUS 3RW40 є так званим пристроєм плавного пуску з 2-фазним керуванням. Це означає, що у фазах L1 та L3 відповідно розташовані 2 зустрічно-паралельно включених тиристора. Фаза L2 є некерованою і проводиться через пристрій наскрізь. При застосуванні пристрою плавного пуску з 2-фазним керуванням у некерованій фазі проходить струм, який отримується з накладання струмів двох керованих фаз.

Перевагами 2-фазного управління є компактніший розмір (у порівнянні, наприклад, з 3-фазним рішенням) та економія на вартості пристрою.

Негативним ефектом при застосуванні 2-фазного керування під час процесу запуску є поява компонент постійного струму, викликане фазовим відсіканням та накладенням фазних струмів, які можуть призвести до посиленого виділення двигуном акустичного шуму. Для запобігання впливу складових постійного струму під час процесу запуску фірмою SIEMENS було розроблено метод управління “Балансування полярності”.

Характеристики струму та поява компонентів постійного струму в 3 фазах, без методу управління “Балансування полярності” наведені на рис. 2.8.

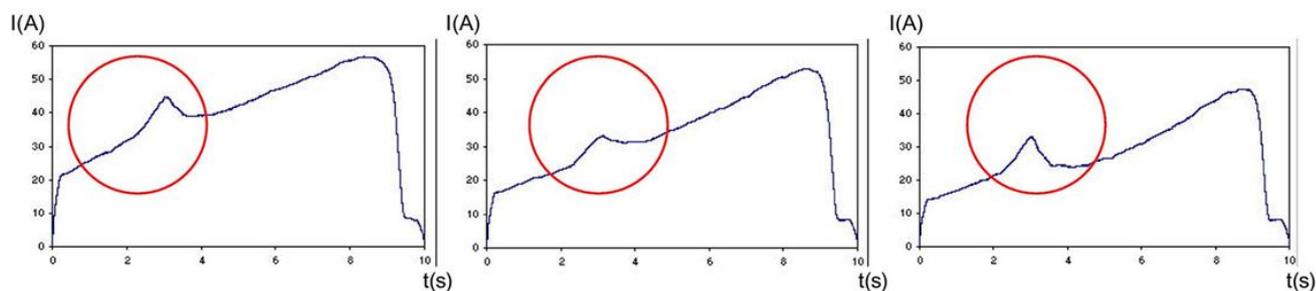


Рисунок 2.8 – Характеристика струму та поява компонентів постійного струму в 3 фазах, без методу управління “Балансування полярності”

Метод управління “Балансування полярності” дозволяє суттєво знизити вплив складових постійного струму під час етапу розгону. Цей метод дозволяє виконати більш рівномірний розгін двигуна за швидкістю, моментом обертання та струму. При цьому акустичні характеристики процесу запуску майже досягають 3 фазного керованого процесу запуску. Це стає можливо завдяки послідовному динамічному вирівнюванню (або балансуванню) напівхвиль струму різної полярності під час розгону двигуна (рис. 2.9).

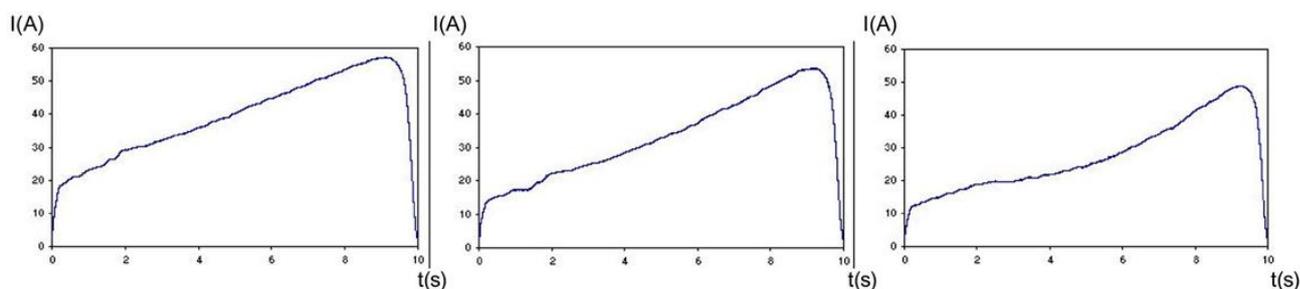


Рисунок 2.9 – Характеристика струму в 3 фазах завдяки методу управління “Балансування полярності”

При 2-фазному управлінні рівень фазних струмів при запуску може бути різним, оскільки струм у некерованій фазі виходить із суми струмів у 2 керованих фазах. При запуску асиметрія може становити приблизно 30 - 40% (співвідношення струмів: максимальне відхилення від середнього значення до середнього значення). Вплинути на це неможливо, але й критичним це явище, як правило, не є. Воно могло б, наприклад, призвести до спрацювання гранично розрахованого запобіжника у некерованій фазі.

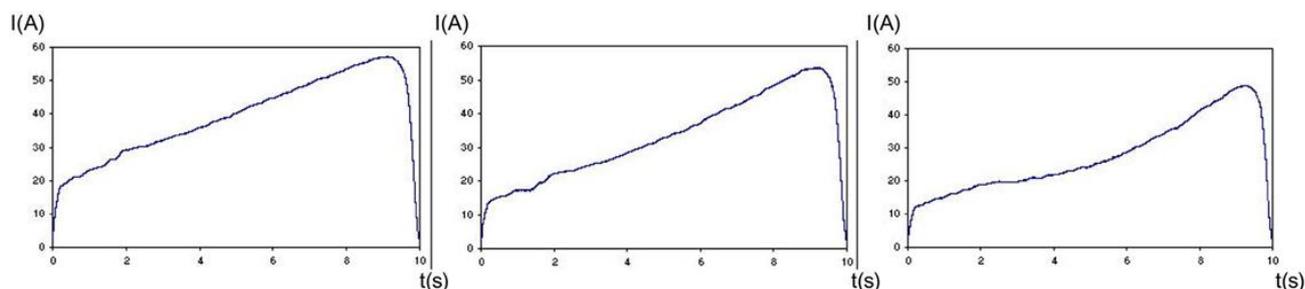


Рисунок 2.10 – Різний рівень пускових струмів

2.6 Види запуску

Плавний пуск із лінійним наростанням напруги (рис. 2.11). Плавний пуск у пристрої SIRIUS 3RW40 досягається завдяки поступовому наростанню напруги. Напруга на двигуні збільшується від встановленої пускової напруги до повної мережної напруги лінійно, протягом встановленого часу розгону електродвигуна.

Рівень пускової напруги визначає момент обертання двигуна при включенні. Найменша пускова напруга тягне за собою менший початковий пусковий момент та менший пусковий струм. Пускова напруга має вибиратися таким чином, щоб безпосередньо за командою запуску на пристрій двигун плавно запускався.

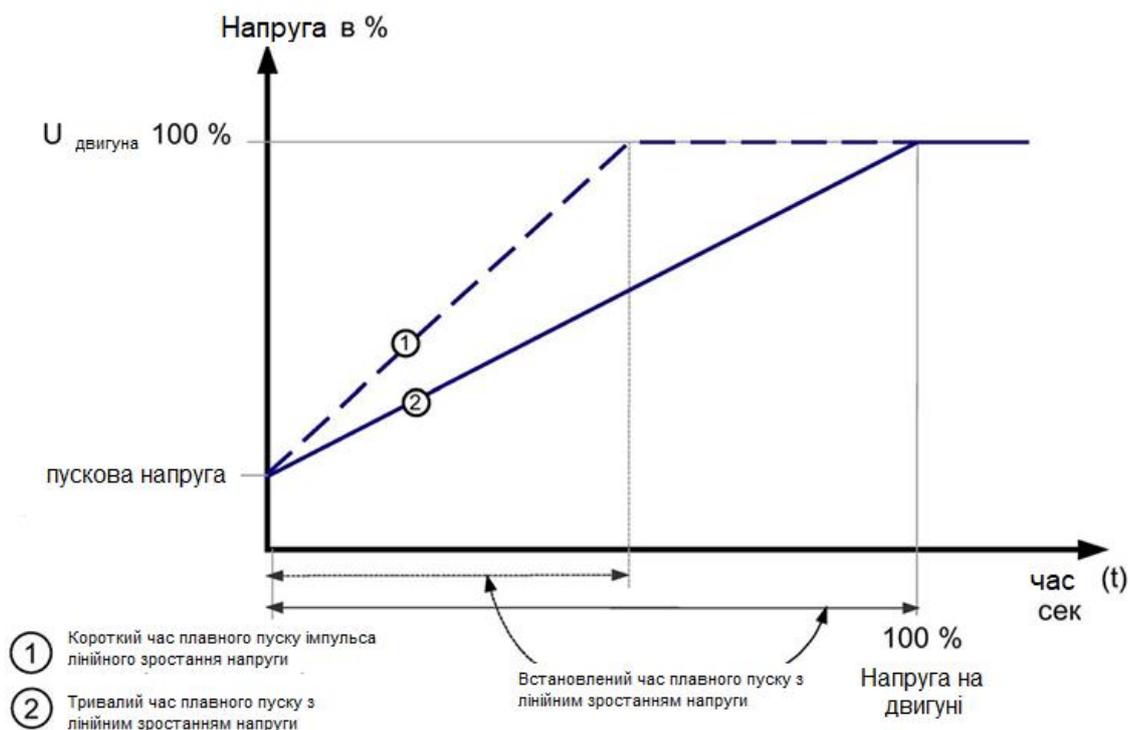


Рисунок 2.11 – Принцип дії плавного пуску з лінійним наростанням напруги

Тривалість встановленого часу запуску визначає, за який час напруга двигуна збільшується від встановленої пускової напруги до номінального значення напруги. Це впливає на момент прискорення двигуна та навантаження під час розгону. Більш тривалий час спричиняє менший момент прискорення. Тим самим здійснюється більш тривалий та плавніший розгін двигуна. Тривалість повинна вибиратися таким чином, щоб двигун в протягом цього часу досягав своєї номінальної частоти обертання. Якщо вибирається занадто короткий час або якщо він закінчується до закінчення розгону двигуна, з'являється високий пусковий струм, аж до значення прямого струму пуску. Пристрій плавного пуску SIRIUS 3RW40 може обмежувати струм до значення, обмеження струму, що налаштовується на потенціометрі.

Як тільки досягається значення обмеження струму, наростання напруги відбувається відповідно до значенням обмеження струму до розгону двигуна. У цьому випадку також час пуску двигуна може перевищити максимально встановлені 20 секунд.

Пристрої плавного пуску SIRIUS 3RW40 мають власний внутрішній захист, функцію обмеження струму та функцію розпізнавання розгону.

Таким чином пристрій плавного пуску SIRIUS 3RW40 пропонує альтернативу прямим пускачам та пускачам за схемою “зірка-трикутник”.

Найважливішими перевагами є:

- плавний пуск;
- плавна зупинка;
- безступінчастий пуск без піків струму, що навантажують мережу;
- простий монтаж та введення в експлуатацію
- компактний корпус.

У порівнянні з частотно-регульованим електроприводом пропонуване рішення має техніко-економічні переваги за рахунок спрощення технічних рішень і економічної доцільності за уваги до умов застосування: короткочасний режим роботи, відсутня необхідність регулювання обертів [10, 11].

Для більш широких умов застосування частотно-регульований електропривод може мати переваги за рахунок використання добре відпрацьованих та апробованих технічних рішень, що мають відпрацьований сервіс та підтверджені результати.

Висновки до розділу 2

1. Наведені відомості відносно судна та його енергетичної установки дозволяють обґрунтувати доцільний вибір компресору пускового повітря та його електроприводу.

2. Відповідно до умов експлуатації судна та техніко-економічних вимог до електроприводу суднового компресору пускового повітря обрано найбільш доцільне рішення пристрою керування електроприводом у вигляді пристрою плавного пуску.

3. Обґрунтовані алгоритми керування електроприводом компресору пускового повітря головного двигуна за допомогою пристрою плавного пуску у різних режимах та встановлені переваги його застосування і певні обмеження.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОМПРЕСОРА ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА

3.1 Розрахунок енергетичних та механічних характеристик електроприводу компресора пускового повітря головного двигуна

В пронованій магістерській роботі досліджуються процеси, які виникають під час пуску електропривода компресорної установки пускового повітря головного двигуна.

Встановлений в електроприводі електродвигун типу I LG4 310-8AB60-Z потужністю 66 кВт, живиться напругою змінного струму 440 В з частотою 60 Гц. Запуск двигуна відбувався прямим підключенням обмоток статора у мережу, переключенням зірка – трикутник, або за рахунок застосування пристрою плавного пуску (дивись розділ 2). Компресор пускового повітря поршневого типу, двоступеневий, потужністю 64 кВт, знаходиться на спільному валу з двигуном електроприводу.

Зробимо розрахунок пікових крутних моментів ($M_{\text{пуск}}$, $M_{\text{кр}}$, $M_{\text{н}}$) приводного електродвигуна й зрівняємо їх з моментом опору компресора пускового повітря головного двигуна, який приводиться в дію.

Технічні дані приводного електродвигуна взяті з каталогу та наведені у розділі 2:

- напруга живлення ($U_{\text{н}}$)	440 В
- частота живильного струму ($f_{\text{н}}$)	60 Гц
- потужність на валу ротора ($P_{\text{н}}$)	66 кВт
- номінальний струм статора ($I_{\text{н}}$)	116 А
- частота обертання ротора ($n_{\text{р}}$)	888 об/хв
- номінальний ККД ($\eta_{\text{н}}$)	92,5 %
- коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$)	0,82
- номінальне ковзання ($s_{\text{н}}$)	0,0208
- критичне ковзання ($s_{\text{к}}$)	0,1035

- активний опір фази обмотки статора (r_1) _____ 0,173 Ом

- активний опір фази обмотки ротора наведене до обмотки статора (r_2') _____ 0,082 Ом

- синхронний індуктивний опір фази обмотки статора (x_1) _____ 0,323 Ом

- синхронний індуктивний опір фази обмотки ротора, наведений до обмотки статора (x_2') _____ 0,442 Ом

- коефіцієнт кратності пускового моменту $K_{\text{пуск}} = \left(\frac{M_{\text{пуск}}}{M_H} \right) = 1,2$

- коефіцієнт кратності критичного моменту $K_{\text{кр}} = \left(\frac{M_{\text{кр}}}{M_H} \right) = 2,34$

Момент опору даного компресора потужністю 64 кВт узятий з каталожних даних і становить:

$$M_{\text{оп}} = 710 \text{ Нм.}$$

Зробимо розрахунок номінального (робочого) моменту. Номінальний механічний момент обчислюється за наступними співвідношеннями:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (3.1)$$

$$\omega_H = \frac{2\pi n}{60}. \quad (3.2)$$

Після підстановки $P_H=66\ 000$ Вт, $n \approx 888$ об/хв, отримуємо:

$$\omega_H = 2\pi \cdot 888 / 60 \approx 92,991 \text{ рад/с;}$$

$$T_H = 66\ 000 / 92,991 \approx 709,7 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Отже номінальний момент становить ≈ 710 Н•м.

Ковзання при номінальній швидкості має наступне значення:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{900 - 888}{900} = 0,0133 \quad (3.3)$$

Виконаємо практичну оцінку пускового моменту на основі типових характеристик і даних виробників.

У технічних матеріалах для типових низьковольтних асинхронних двигунів пусковий момент зазвичай $\approx 150\text{--}170\%$ від номінального.

За технічними характеристиками асинхронного двигуна пусковий струм дорівнює $I_{\text{пуск}} = 6 \cdot I_n = 6 \cdot 116 = 696 \text{ A}$ — це середньо-високе значення стартового струму. Електродвигун Siemens з такою кратністю зазвичай має пусковий момент наступного порядку

$$M_{\text{пуск}} \approx (1,5 - 2,5) \cdot M_H.$$

Звідси отримаємо значення пускового моменту:

$$M_{\text{пуск}} \approx 1,5 \cdot M_H = 1,5 \cdot 709,7 \approx 1065 \text{ Нм}.$$

Виконаємо оцінку максимального (критичного) моменту $M_{\text{кр}}$. Для багатьох промислових трифазних двигунів значення $M_{\text{кр}}$ зазвичай більше за номінальне значення у $2,0\text{--}3,5$ рази.

Звідси отримуємо:

$$M_{\text{кр}} = 2,5 \cdot M_H = 2,5 \cdot 709,7 \approx 1774 \text{ Нм}. \quad (3.4)$$

Типові значення ковзання s_{max} , при якому досягається $M_{\text{кр}}$ для промислових двигунів, складає $0.03 \dots 0.2$ (3%–20%).

Для розглядаємого двигуна $s_{\text{max}} \approx 0.05 \dots 0.15$. По отриманим даним будемо графік залежності моменту від ковзання $M = f(s)$.



Рисунок 3.1 – Залежність пускового моменту від ковзання

На основі результатів розрахунку побудуємо характеристики моментів електродвигуна й компресора в одній координатній площині (рис. 3.2)

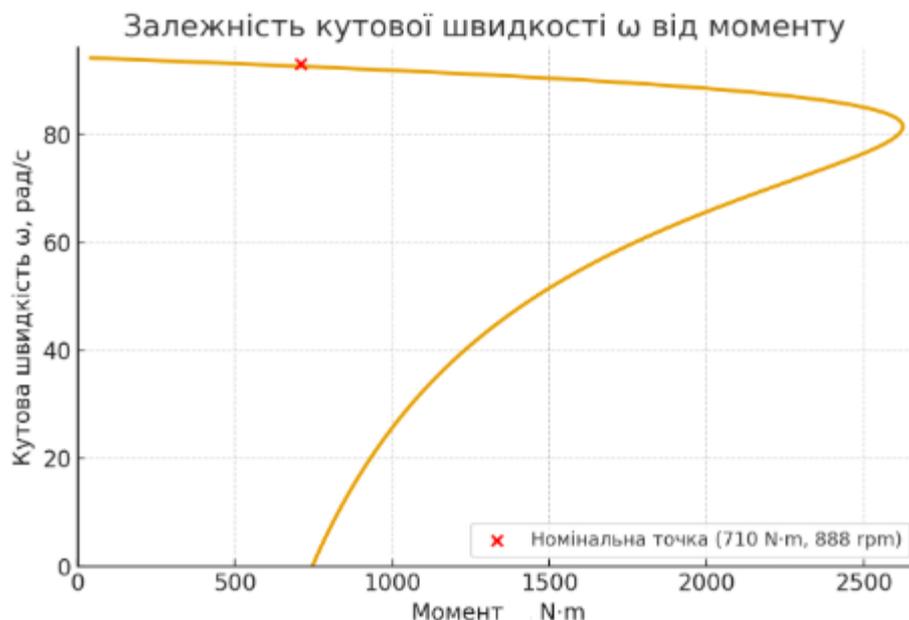


Рисунок 3.2 – Залежність кутової швидкості ω від моменту

Як видно з розрахунку й побудованих графіків, пусковий момент електродвигуна перевищує момент опору компресора в момент пуску майже у півтора рази, а в момент проходження критичного моменту різниця ще більше. Таким чином, динамічні навантаження на деталі компресора дуже великі, що спричиняє збільшену деформацію на скручування обертових деталей компресора, більше навантаження на розрив анкерних зав'язків, прискорений темп зношування корінних і головних підшипників тощо. Тому моторесурс компресора в цілому різко знижується, зменшується період між технічним обслуговуванням і капітальним ремонтом, збільшуються фінансові витрати на експлуатацію.

Щоб уникнути великої різниці між крутним моментом первинного електродвигуна й моментом опору компресора в процесі розгону необхідно зменшити пусковий момент та позбавитись критичного моменту електродвигуна.

Одним з раціональних методів вирішення вказаної проблеми, окрім уже розглянутого, буде застосування систем частотного та фазового регулювання, за

допомогою якої можливе зміна кутової швидкості ротора й крутного моменту. Але перш ніж застосувати систему частотного керування необхідно визначити, по якому закону буде проводитись регулювання [10].

3.2 Дослідження системи векторного керування

Електропривод системи стислого повітря являє собою конструктивну сукупність асинхронних двигунів, перетворювачів частоти, пристрою керування і приводних механізмів (в даному випадку поршневих компресорів). Зростання ступеня інтеграції в мікропроцесорній техніці привів до заміни аналогових систем керування електроприводами на системи безпосереднього цифрового керування. Перехід до широкодіапазонних та швидкодіючих електроприводів транспортних засобів, зажадав застосування більш складних структур управління, зокрема, на основі векторного управління.

При векторному управлінні, на відміну від суто частотного, управління швидкістю обертання приводного асинхронного двигуна здійснюється за допомогою регулювання амплітуди і фази вектору поля двигуна. Таке управління є найбільш точним у динаміці та статиці, а також більш економічним [12, 13].

Аналіз динамічних властивостей приводу компресора пускового повітря може бути проведено на базі диференційних рівнянь асинхронної машини в векторній формі запису в системі координат, що обертається зі швидкістю поля статора.

Математичний опис електричних та механічних властивостей асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором наводиться в ортогональній системі координат і обмежується врахуванням найбільш важливих взаємозв'язків. По цій причині для одержання зручного для аналізу опису двигуна приймаються деякі допущення, а саме:

- 1) магнітне коло машини має високу магнітну проникність і не насичується, відсутній ефект гістерезису, немає втрат у сталі. Іншими словами, припускається, що енергія магнітного поля зосереджена в повітряному зазорі;

2) приймається однорідний синусоїдальний розподіл по колу магнітного поля. Машина має симетричну будову і всі фази мають однакову кількість витків;

3) повітряний зазор машини постійний, відсутні зубцевий та крайовий ефекти, поверхні статора та ротора абсолютно гладкі і утворюють два концентричні кола;

4) не враховуються ємності всередині обмоток та між ними, а отже, і енергія електростатичного поля;

5) нехтують явищем витиснення струму у провідниках.

Для опису електромагнітних перехідних процесів в двигуні використовуються рівняння електричної та механічної рівноваги, а також рівняння перетворення електромагнітної енергії в механічну.

Математична модель електроприводу у нерухомій прямокутній системі координат у осях α і β описується системою диференціальних рівнянь (3.5), що приведені нижче [14, 15].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{\alpha 1}}{dt} = U_{\alpha} - a_s \Psi_{\alpha 1} + a_s k_r \Psi_{\alpha 2} = U_{\alpha} - r_1 i_{\alpha 1}, \\ \frac{d\Psi_{\beta 1}}{dt} = U_{\beta} - a_s \Psi_{\beta 1} + a_s k_r \Psi_{\beta 2} = U_{\beta} - r_1 i_{\beta 1}, \\ \frac{d\Psi_{\alpha 2}}{dt} = -a_r \Psi_{\alpha 2} + a_r k_s \Psi_{\alpha 1} - \omega \Psi_{\beta 2} = -r_2 i_{\alpha 2} - \omega \Psi_{\beta 2}, \\ \frac{d\Psi_{\beta 2}}{dt} = -a_r \Psi_{\beta 2} + a_r k_s \Psi_{\beta 1} - \omega \Psi_{\alpha 2} = -r_2 i_{\beta 2} + \omega \Psi_{\alpha 2}, \\ M = \frac{3}{2} p \frac{k_r}{\sigma L_s} (\Psi_{\alpha 2} \Psi_{\beta 1} - \Psi_{\alpha 1} \Psi_{\beta 2}), \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M - M_c), \end{array} \right. \quad (3.5)$$

де $\Psi_{\alpha 1}$, $\Psi_{\beta 1}$, U_{α} , U_{β} , $i_{\alpha 1}$, $i_{\beta 1}$ – відповідно проекції на осі координат α і β потокозчеплення, напруги та струму обмоток статора;

$\Psi_{\alpha 2}$, $\Psi_{\beta 2}$, $i_{\alpha 2}$, $i_{\beta 2}$ – відповідно проекції на осі координат α і β потокозчеплення та

струми обмоток ротора;

$$k_s = \frac{L_m}{L_s}, \quad k_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad \sigma = 1 - k_r k_s = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}, \quad T_s = \frac{L_s}{r_1}, \quad T_r = \frac{L_r}{r_2},$$

$a_s = \frac{1}{\sigma T_s}, \quad a_r = \frac{1}{\sigma T_r}; L_r, L_m, L_s, r_1, r_2, p$ – постійні коефіцієнти для даного типу двигуна.

Струм статора i_1 розкладається на поздовжню та поперечну складові відносно вектору струму намагнічування, що дозволяє за допомогою поздовжньої складової управляти потоком збудження, а за допомогою поперечної складової – обертаючим моментом двигуна. Особливо прості співвідношення одержуються, якщо миттєве направлення вектору магнітного потоку ротора або вектору струму намагнічування прийняти в якості змінної осі відліку ($\omega_k = \omega_1$).

Виразимо магнітний потік ротора через струм намагнічування i_μ , що задається в нерухомій, зв'язаній зі статором системі координат за допомогою куту приведення ρ , який відраховується від реальної осі. Вектор i_μ визначається наступним чином:

$$\bar{i}_\mu = \bar{i}_1 + (1 + \sigma_2) \bar{i}_2 e^{j\varphi_{\text{ел}}} = i_\mu e^{j\rho}. \quad (3.6)$$

Струм намагнічування може бути виражений через магнітний потік ротора:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_2 &= L_2 \bar{i}_2 + L_{12} \bar{i}_1 e^{-j\varphi_{\text{ел}}} = L_{12} \left(\bar{i}_1 + (1 + \sigma_2) \bar{i}_2 e^{j\varphi_{\text{ел}}} \right) e^{-j\varphi_{\text{ел}}} \\ \bar{i}_\mu &= \frac{\bar{\Psi}_2 e^{j\varphi_{\text{ел}}}}{L_{12}}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Для отримання математичного опису процесів у асинхронному двигуні з короткозамкненим ротором в координатах поля замінимо просторовий вектор виразивши його через струм намагнічування і струм статора:

$$\bar{i}_2 e^{j\varphi_{er}} = \frac{1}{1+\sigma_2} (\bar{i}_\mu - \bar{i}_1). \quad (3.8)$$

Діаграма струмів в системі координат, що обертається зі швидкістю поля наведена на рис. 3.3.

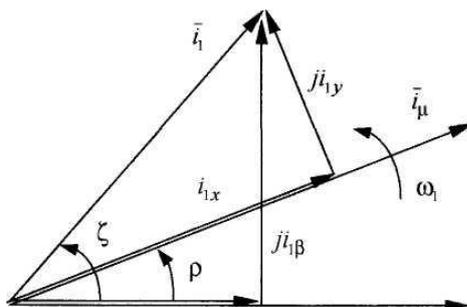


Рисунок 3.3 – Діаграма струмів в системі координат, що обертається зі швидкістю поля статора

Тоді рівняння статора і ротора можна переписати в наступному вигляді:

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{i}_1 + L_1 \frac{d\bar{i}_1}{dt} + \frac{L_{12}}{1+\sigma_2} \frac{d}{dt} (\bar{i}_\mu - \bar{i}_1) = R_1 \bar{i}_1 + \sigma L_1 \frac{d\bar{i}_1}{dt} + \frac{L_{12}}{1+\sigma_2} \frac{d\bar{i}_\mu}{dt} \quad (3.9)$$

$$0 = \frac{R_2}{(1+\sigma_2)^2} (\bar{i}_\mu - \bar{i}_1) + \frac{L_{12}}{1+\sigma_2} \frac{d\bar{i}_\mu}{dt} - j\omega \frac{L_{12}}{1+\sigma_2} \bar{i}_\mu, \quad (3.10)$$

Використовуючи сталу часу ротора

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2} = \frac{L_{12}(1+\sigma_2)}{R_2}, \quad (3.11)$$

Розв'яжемо рівняння електричної рівноваги ротора (3.10) відносно струму статора

$$\bar{i}_1 = \bar{i}_\mu (1 - j\omega T_2) + T_2 \frac{d\bar{i}_\mu}{dt} \quad (3.12)$$

Помноживши рівняння (3.9) та (3.10) на комплексний оператор повороту $e^{-j\theta}$, здійснимо перехід до системи координат, що обертається синхронно з полем:

$$\bar{U}_{1xy} = U_{1x} + jU_{1y} = R_1 \bar{i}_1 e^{-j\rho} + \sigma L_1 \frac{d\bar{i}_1}{dt} e^{-j\rho} + (1-\sigma)L_1 \frac{d\bar{i}_\mu}{dt} e^{-j\rho}$$

$$\bar{U}_{1xy} = R_1 \bar{i}_{1xy} + \sigma L_1 \left(\frac{d\bar{i}_{1xy}}{dt} + j\omega_1 \bar{i}_{1xy} \right) + (1-\sigma)L_1 \left(\frac{d\bar{i}_\mu}{dt} + j\omega_1 \bar{i}_\mu \right)$$

Шляхом розкладання на реальну та уявну частини, одержуємо два орієнтованих по полю ротора диференціальних рівняння статора:

$$\frac{U_{1x}}{R_1} = \sigma T_1 \frac{di_{1x}}{dt} + i_{1x} + (1-\sigma)T_1 \frac{di_\mu}{dt} - \sigma T_1 \omega_1 i_{1y}, \quad (3.13)$$

$$\frac{U_{1y}}{R_1} = \sigma T_1 \frac{di_{1y}}{dt} + i_{1y} + (1-\sigma)T_1 \omega_1 i_\mu + \sigma T_1 \omega_1 i_{1x} \quad (3.14)$$

Для ротора отримуємо наступне рівняння:

$$\bar{i}_{1xy} = i_{1x} + j i_{1y} = (1-j\omega T_2) \bar{i}_\mu + T_2 \frac{d\bar{i}_\mu}{dt} + j\omega_1 T_2 \bar{i}_\mu.$$

Розклавши на реальну та уявну частини останній вираз, одержуємо два орієнтованих по полю рівняння:

$$i_{1x} = T_2 \frac{di_\mu}{dt} + i_\mu \quad (3.15)$$

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega = \frac{i_{1y}}{T_2 i_\mu} \quad (3.16)$$

де ω_2 – частота обертання вектору струму намагнічування в системі координат, яка зв'язана з ротором.

Перетворимо рівняння електромагнітного моменту враховуючи, що дане рівняння є інваріантним по відношенню до перетворення координат між двома координатними системами, що обертаються одна відносно іншої.

$$m_{el} = \frac{2}{3} Z_p \frac{L_{12}}{1+\sigma_2} \cdot \text{Im} \left[\bar{i}_1 (\bar{i}_\mu - \bar{i}_1)^* \right] = \frac{2}{3} Z_p \frac{L_{12}}{1+\sigma_2} \cdot \text{Im} \left[\bar{i}_{1xy} (\bar{i}_{\mu xy} - \bar{i}_{1xy})^* \right],$$

$$m_{el} = \frac{2}{3} Z_p \frac{L_{12}}{(1+\sigma_2)} \cdot i_\mu \cdot i_{1y} \quad (3.17)$$

Орієнтоване по полю рівняння обертаючого моменту (3.17) наочно показує, що робочій момент виникає як результат взаємодії струму намагнічування ротора і поперечної складової струму статора.

Для дослідження ефектів, які мають найбільш значний вплив на процеси перетворення енергії у асинхронному двигуні, буде достатнім врахувати насичення по головному шляху намагнічування. Це стає можливим тому, що потоки розсіювання замикаються головним чином у повітряному зазорі і для них може бути прийнята лінійна залежність від струмів. Виходячи із наведених міркувань та розклавши потоки ротора і статора на відповідні потоки розсіювання та магнітного потоку у повітряному зазорі (ψ_{12}), отримуємо:

$$R_1 \bar{i}_1 + L_{1\sigma} \frac{d\bar{i}_1}{dt} + \frac{d\bar{\Psi}_{12}}{dt} = \bar{U}_1, \quad (3.18)$$

$$R_2 \bar{i}_2 + L_{2\sigma} \frac{d\bar{i}_2}{dt} + \frac{d}{dt} (\bar{\Psi}_{12} e^{-j\varphi_{ст}}) = 0. \quad (3.19)$$

У подальшому припускається, що машина має симетричну будову і взаємна індуктивність фаз машини залежить від робочої точки на кривій намагнічування, яка однозначно визначається модулем вектору струму намагнічування. Вектор струму намагнічування складається із векторів струмів статора та ротора:

$$\bar{i}_{12} = \bar{i}_1 + \bar{i}_2 e^{j\varphi_{ст}} \quad (3.20)$$

При обчислення електромагнітної індукції

$$\frac{d\bar{\Psi}_{12}}{dt} = \frac{d\bar{\Psi}_{12}}{d\bar{i}_{12}} \cdot \frac{d\bar{i}_{12}}{dt} \quad (3.21)$$

має сенс ввести нову умовну позначку для динамічної взаємної індуктивності

$$L_{12,\partial} = \frac{d\Psi_{12}(i_{12})}{di_{12}}. \quad (3.22)$$

У рівнянні утворення моменту використовується статична взаємна індуктивність

$$L_{12} = \frac{\Psi_{12}(i_{12})}{i_{12}} \quad (3.23)$$

$$m_{\text{евт}} = \frac{2}{3} \cdot Z_p \cdot L_{12}(i_{12}) \cdot \text{Im} \left[\bar{i}_1(t) \cdot (\bar{i}_2(t) \cdot e^{j\varphi_{\text{евт}}(t)})^* \right]. \quad (3.24)$$

Застосувавши L_{12} та $L_{12,\partial}$ отримуємо

$$R_1 \bar{i}_1 + L_{1\sigma} \frac{d\bar{i}_1}{dt} + L_{12,\partial} \frac{d}{dt} (\bar{i}_1 + \bar{i}_2 e^{j\varphi_{\text{евт}}}) = \bar{U}_1, \quad (3.25)$$

$$R_2 \bar{i}_2 + L_{2\sigma} \frac{d\bar{i}_2}{dt} + L_{12,\partial} e^{-j\varphi_{\text{евт}}} \frac{d}{dt} (\bar{i}_1 + \bar{i}_2 e^{j\varphi_{\text{евт}}}) - j\omega L_{12} e^{-j\varphi_{\text{евт}}} (\bar{i}_1 + \bar{i}_2 e^{j\varphi_{\text{евт}}}) = 0. \quad (3.26)$$

Щоб отримати можливість вивчати вплив ефекту насичення на властивості асинхронної машини та побудувати систему регулювання, адаптовану до діапазону послаблення поля, необхідно ввести фіктивний струм намагнічування ротора. При цьому коефіцієнт розсіювання ротора приймається постійним і визначається за допомогою наступного співвідношення:

$$\sigma_2 = \frac{L_{2\sigma}}{L_{12}}. \quad (3.27)$$

Виключивши струм ротора із рівнянь (3.25) а (3.26) та здійснивши перехід до системи координат, що обертається зі швидкістю поля, та розклавши на реальну та уявну частини, одержуємо наступні диференційні рівняння

$$\begin{aligned} \frac{L_{1\sigma} + \frac{\sigma_2}{1+\sigma_2} L_{12,\partial}}{R_1} \cdot \frac{di_{1x}}{dt} + i_{1x} &= \frac{U_{1x}}{R_1} - \frac{1}{(1+\sigma_2)} \frac{L_{12,\partial}}{R_1} \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} + \frac{L_{2\sigma} + \frac{\sigma_2}{1+\sigma_2} L_{12,\partial}}{R_1} \cdot \omega_1 \cdot i_{1y} \\ \frac{L_{1\sigma} + \frac{\sigma_2}{1+\sigma_2} L_{12,\partial}}{R_1} \cdot \frac{di_{1y}}{dt} + i_{1y} &= \frac{U_{1y}}{R_1} - \frac{1}{(1+\sigma_2)} \frac{L_{12,\partial}}{R_1} \cdot \omega_1 \cdot i_{\mu} - \frac{L_{2\sigma} + \frac{\sigma_2}{1+\sigma_2} L_{12,\partial}}{R_1} \cdot \omega_1 \cdot i_{1x}, \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\frac{L_{2\sigma} + L_{12,\partial}}{R_2} \cdot \frac{di_\mu}{dt} + i_\mu = i_{1x} + \frac{L_{2\sigma} - \sigma_2 L_{12,\partial}}{R_2} \cdot \frac{di_{1x}}{dt} + \frac{(\sigma_2 L_{12,\partial} - L_{2\sigma})\omega_1 + (L_{2\sigma} - \sigma_2 L_{12})\omega}{R_2} \cdot i_{1y} \quad (3.29)$$

$$\frac{\sigma_2 L_{12,\partial} - L_{2\sigma}}{R_2} \cdot \frac{di_{1y}}{dt} - i_{1y} + \frac{(L_{2\sigma} + L_{12,\partial})\omega_1 - (L_{2\sigma} + L_{12})\omega}{R_2} \cdot i_\mu + \frac{(\sigma_2 L_{12,\partial} - L_{2\sigma})\omega_1 + (L_{2\sigma} - \sigma_2 L_{12})\omega}{R_2} \cdot i_{1x} = 0 \quad (3.30)$$

Порівнюючи рівняння насиченої машини із рівняннями ненасиченої можливо зробити висновки, що у диференціальних рівняннях статора кількість складових частин не змінилась, а стали часу тепер є залежними від стану магнітного кола.

У диференціальних рівняннях ротора з'явилися додаткові складові частини, та крім цього, усі стали часу також тепер залежать від робочої точки на магнітній характеристиці. Вирази, які містять різницю між $L_2\sigma$, $\sigma_2 L_2\sigma$, та $\sigma_2 L_{12}\sigma$ мають досить незначний вплив на властивості насиченої машини. Врахування у математичному опису двигуна домінуючої сталої часу дозволяє побудувати систему регулювання, яка зможе працювати у діапазоні швидкостей вище за основної. На рис. 3.4 наведена структурна схема асинхронної машини з урахуванням насичення сталі по головному шляху намагнічування [15, 16].

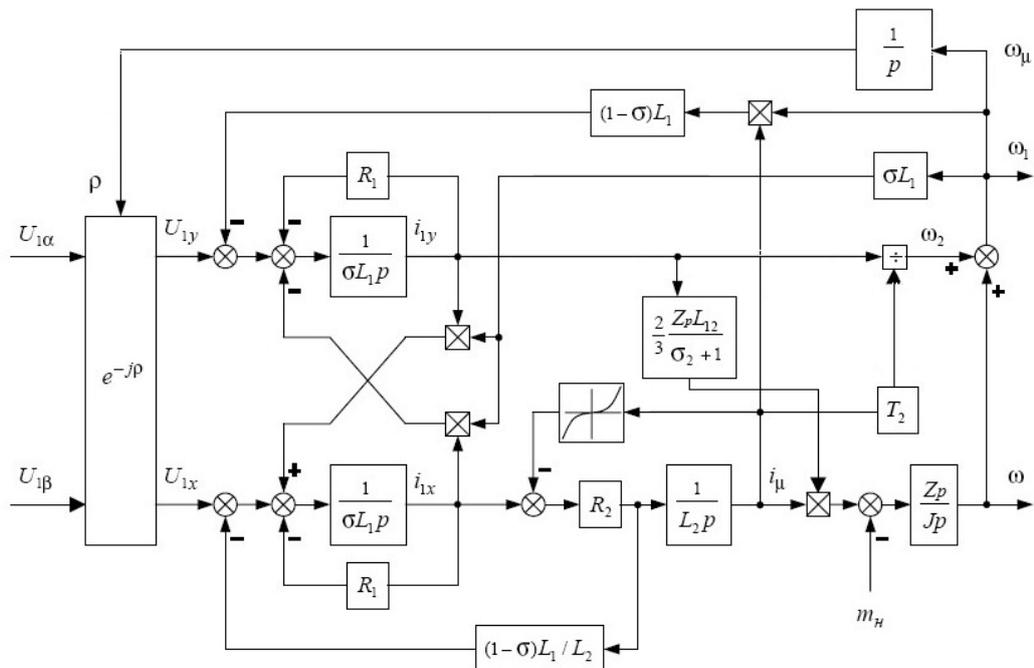


Рисунок 3.4 – Структурна схема АД з урахуванням насичення сталі по головному шляху намагнічування

3.3 Моделювання процесів у електроприводі компресора пускового повітря

Для моделювання процесів у електроприводі компресора пускового повітря було за допомогою візуально - орієнтовного додатку Simulink системи MATLAB створено комп'ютерні моделі (рис. 3.5, рис. 3.12, рис. 3.13). Проведення комп'ютерного моделювання за допомогою розроблених моделей дозволяє встановити можливості та обмеження при застосуванні скалярного частотно-регульованого пуску та векторного керування у порівнянні із прямим пуском [17].

Представлена на рис. 3.5 схема моделювання реалізує аналітичну, заздалегідь визначену, залежність зміни частоти та напруги при застосуванні скалярного частотно-регульованого пуску. Модель містить модель двигуна, системи його керованого живлення, навантаження та блоки візуалізації і документації результатів моделювання. Модель дозволяє дослідити процеси у електроприводі суднового компресора пускового повітря при здійсненні його прямого та частотно-регульованого пуску. Результати моделювання для вказаних режимів пуску представлені на рис. 3.6 – рис. 3.11.

Результати моделювання підтверджують аналітичні розрахунки щодо переваг частотно-регульованому пуску у порівнянні із прямим пуском за показниками зменшення пускового струму тощо.

Представлені на рис. 3.12 та рис. 3.13 схеми моделювання ілюструють процеси в електроприводі при застосуванні векторного керування. Модель містить модель двигуна, системи його векторного керованого живлення, навантаження та блоки візуалізації і документації результатів моделювання. Модель дозволяє дослідити процеси у електроприводі суднового компресора пускового повітря при здійсненні його векторно-регульованого пуску. Результати моделювання для вказаних режимів пуску представлені на рис. 3.14 – рис. 3.17.

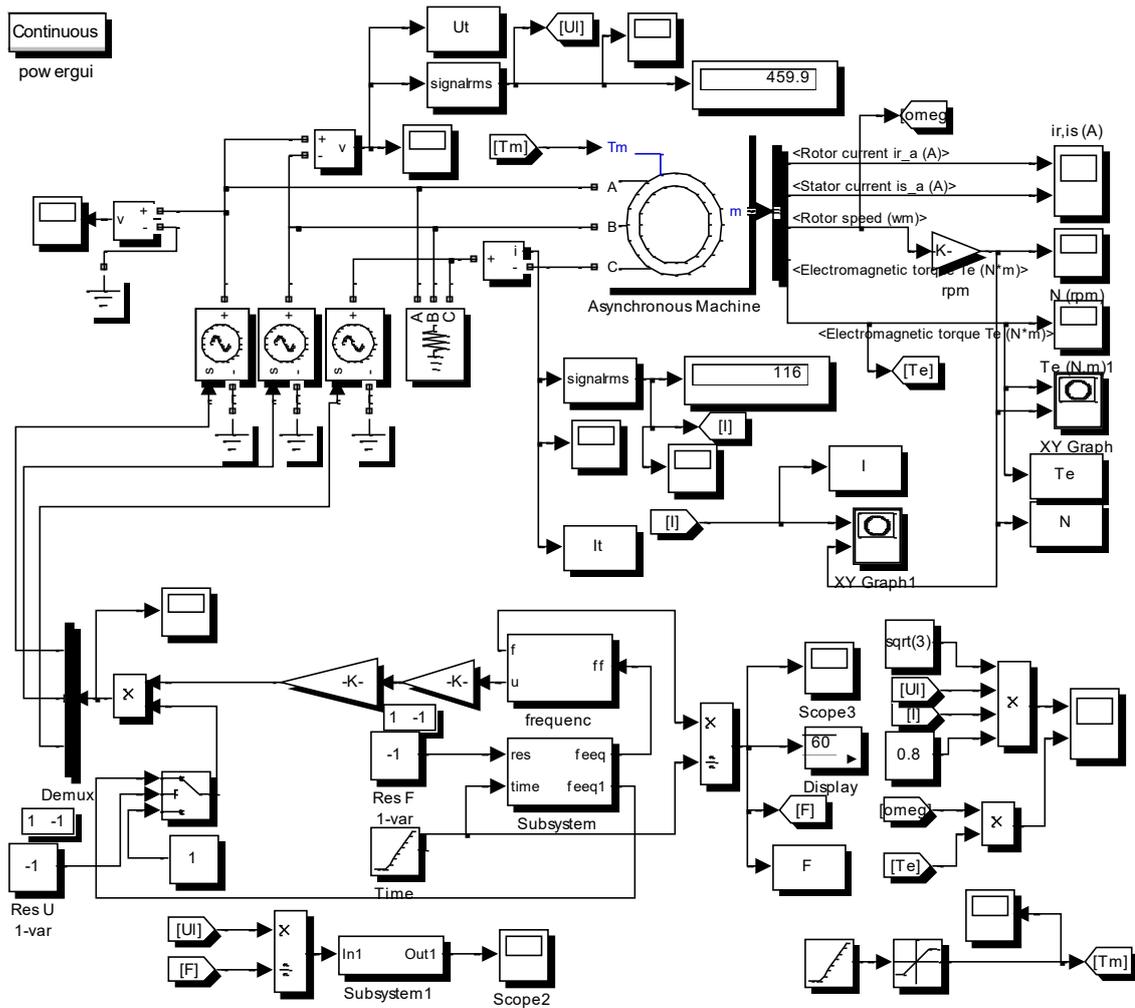


Рисунок 3.5 – Комп'ютерна модель електроприводу суднового компресора пускового повітря

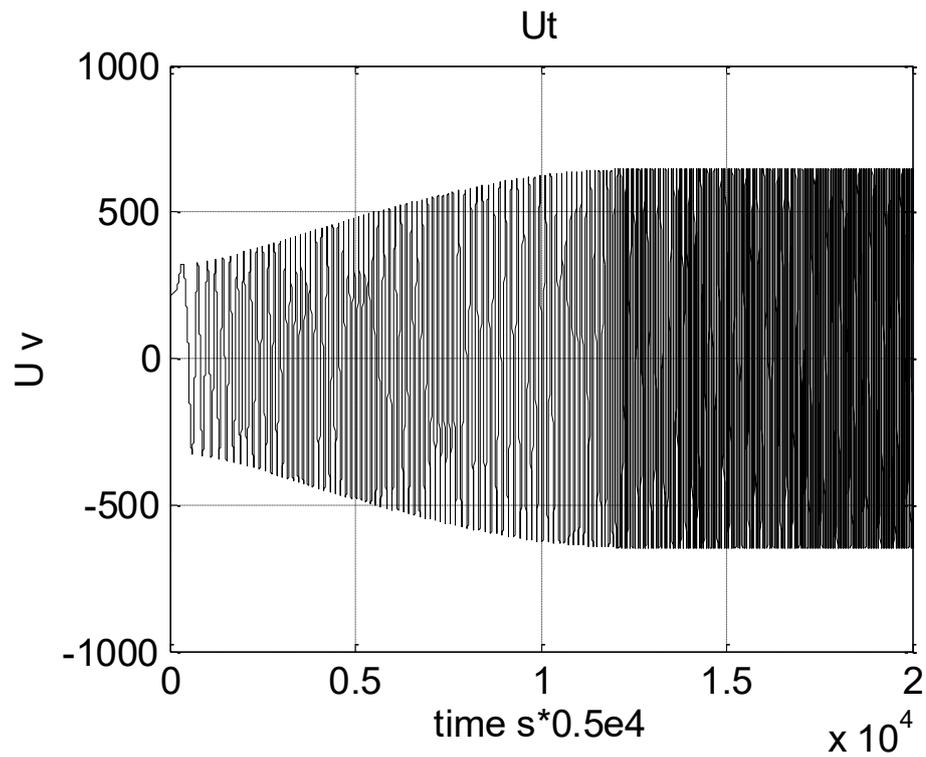


Рисунок 3.6 – Зміна миттєвого значення напруги при частотно-регульованому пуску

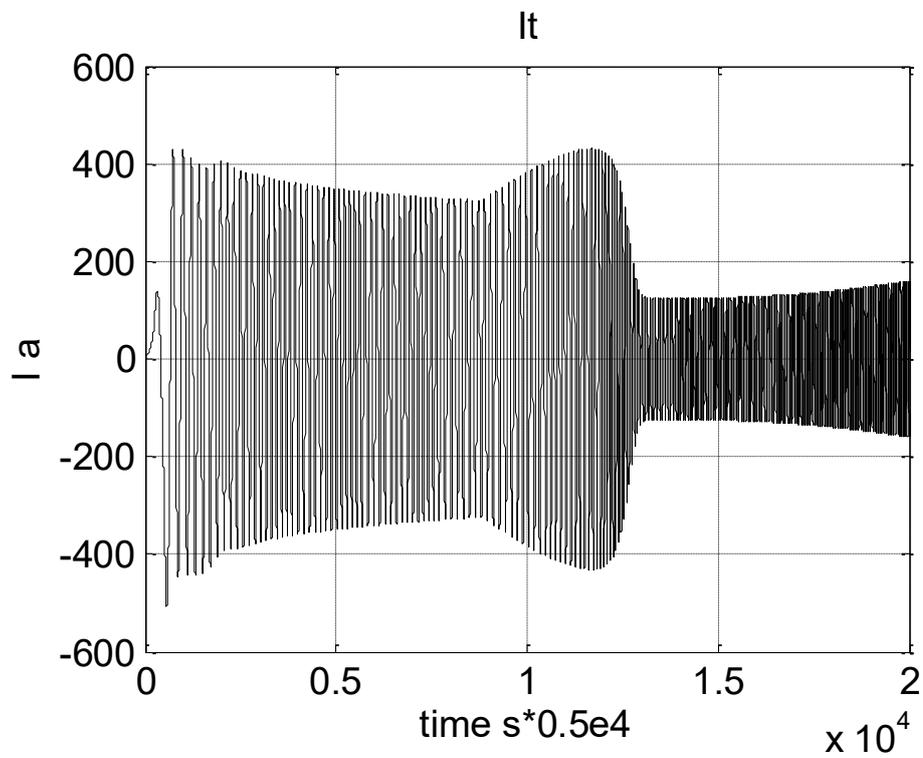


Рисунок 3.7 – Зміна миттєвого значення струму при частотно-регульованому пуску

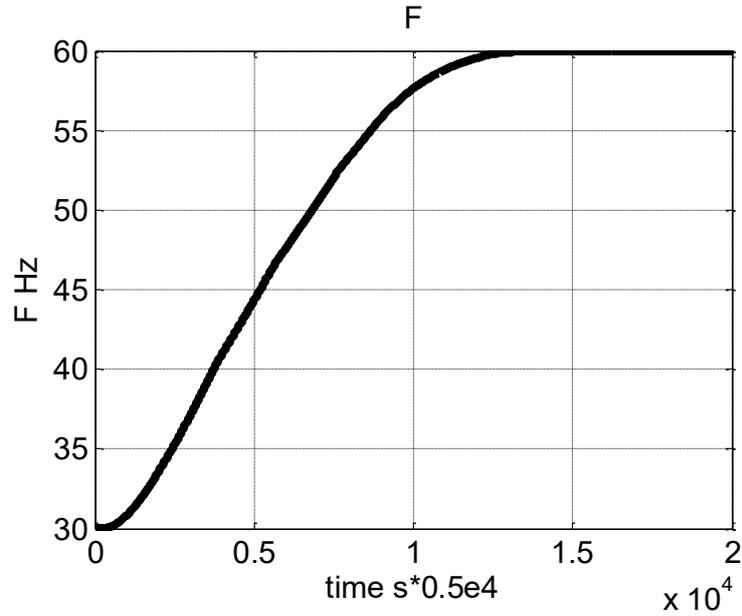


Рисунок 3.8 – Зміна частоти при частотно-регульованому пуску

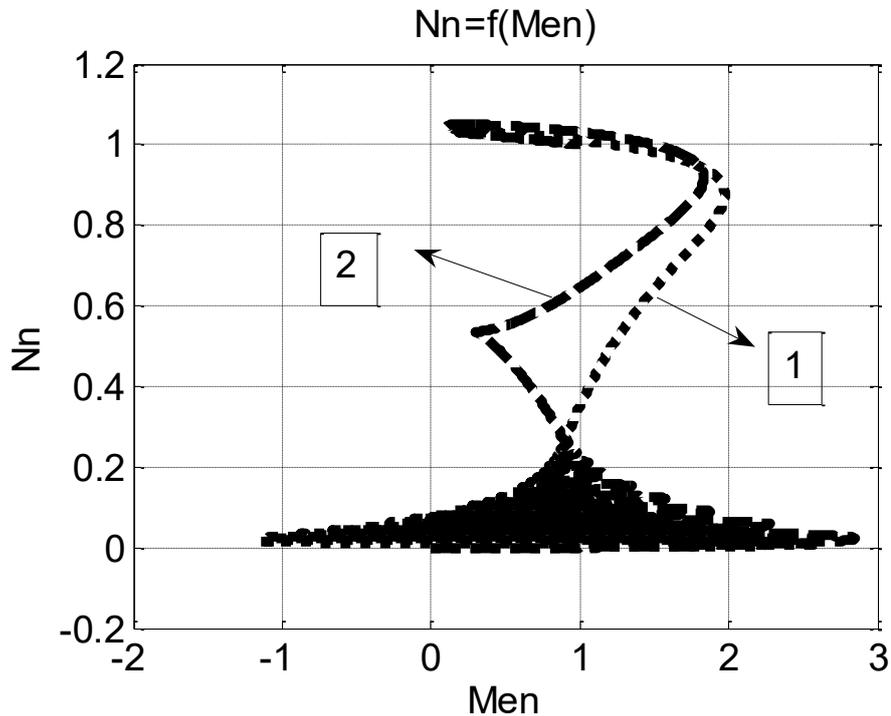


Рисунок 3.9 – Рух електроприводу компресора при прямому пуску (1) та частотно-регульованому пуску (2) в координатах нормовані оберти – нормований електромагнітний момент

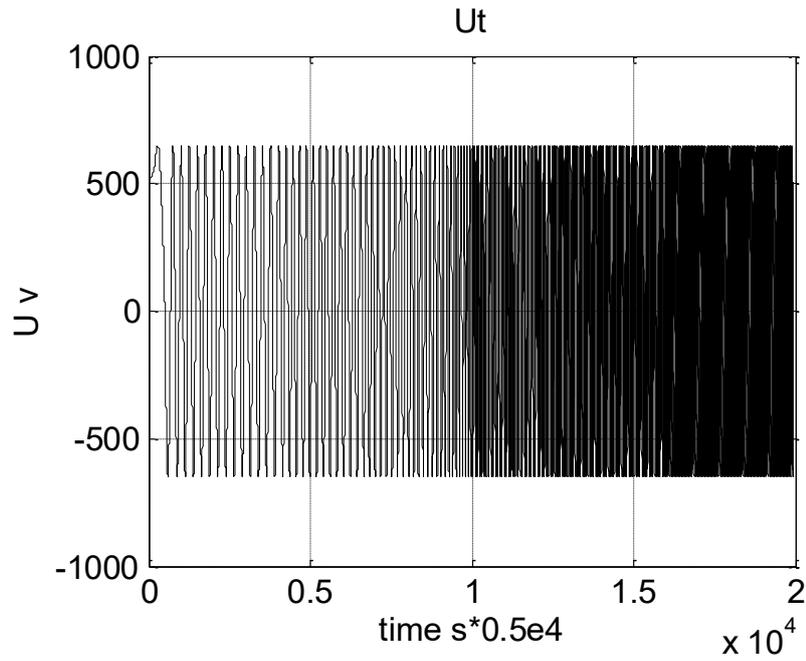


Рисунок 3.10 – Зміна миттєвого значення напруги при прямому пуску

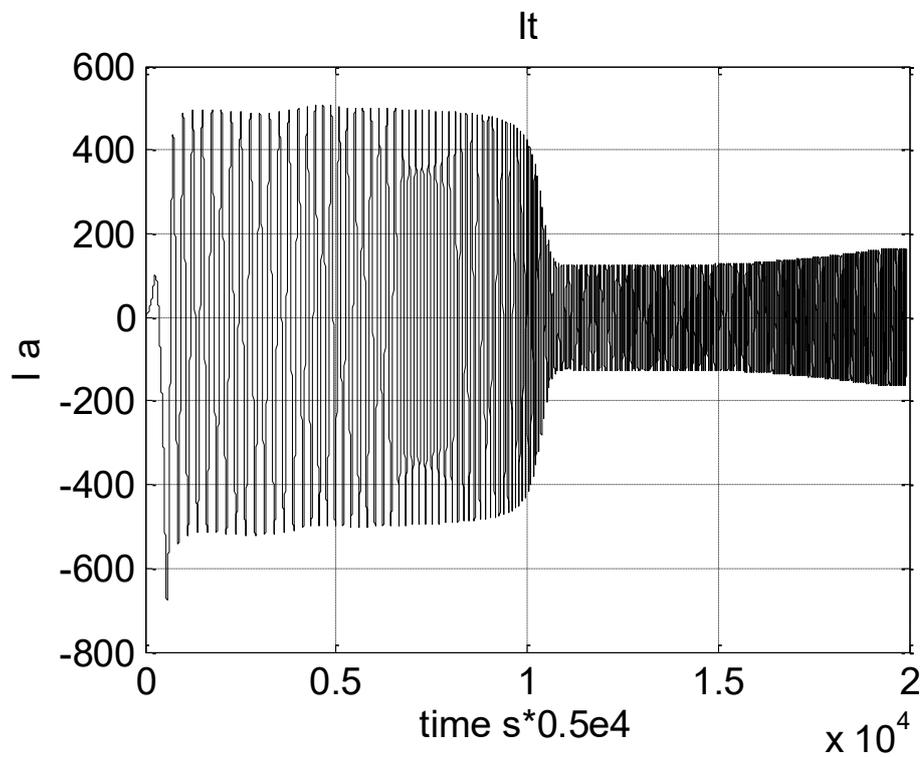


Рисунок 3.11 – Зміна миттєвого значення струму при прямому пуску

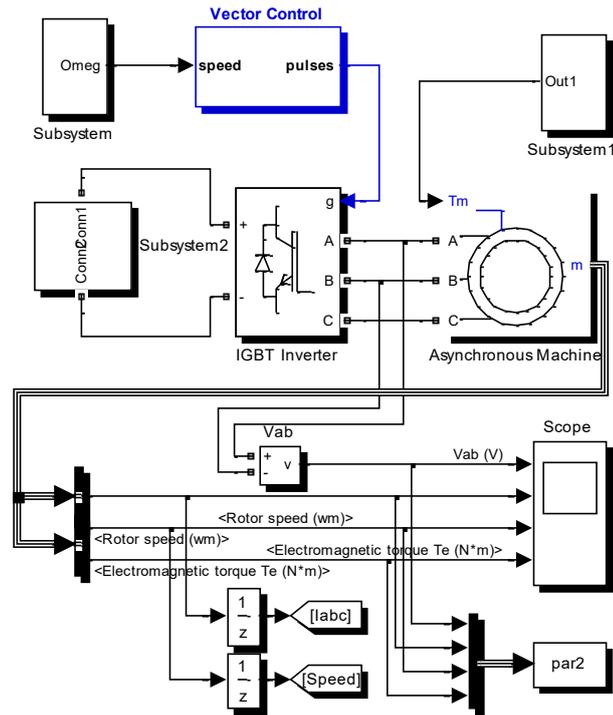


Рисунок 3.12 – Схема моделювання електроприводу з векторним керуванням

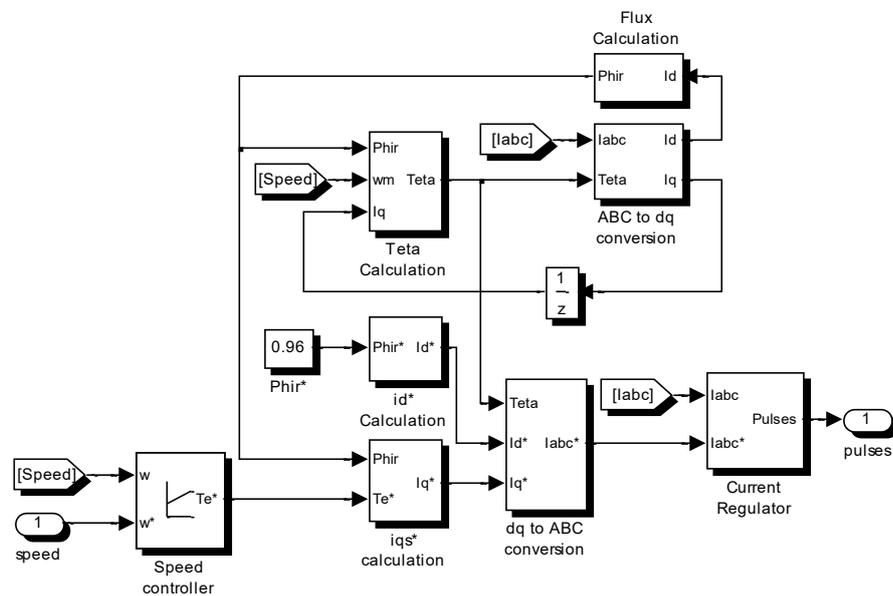


Рисунок 3.13 – Схема моделювання підсистеми Vector Control

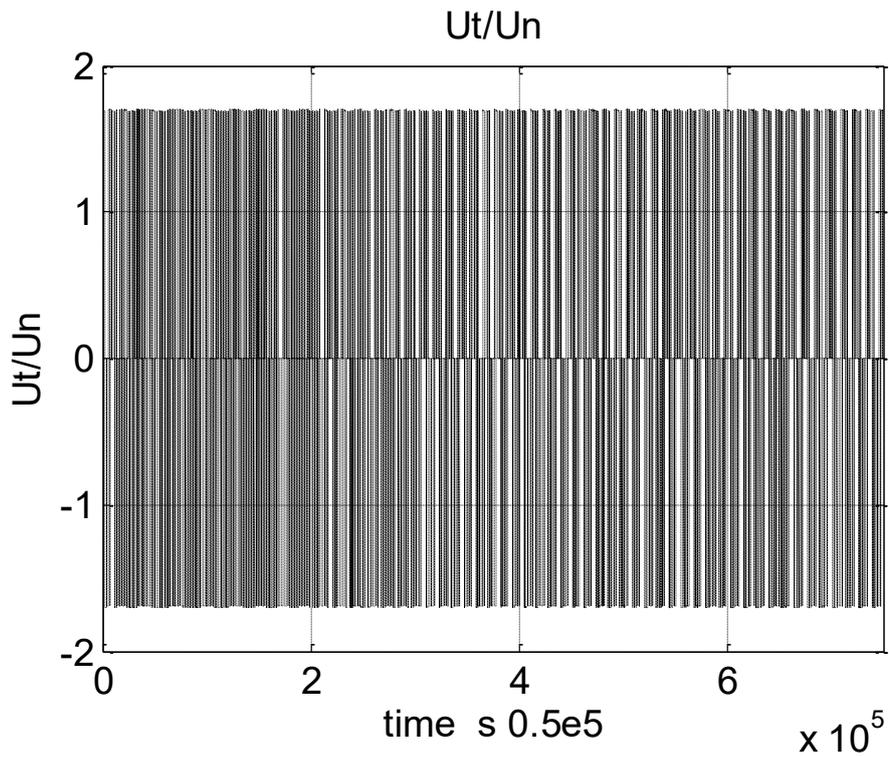


Рисунок 3.14 – Зміна миттєвого значення напруги при векторному керуванні

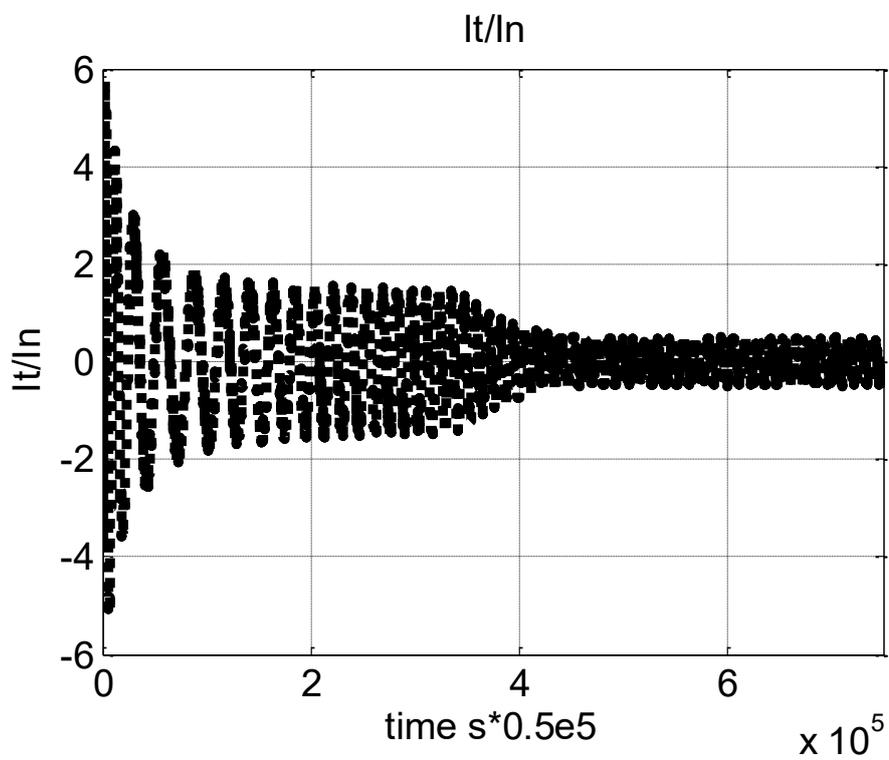


Рисунок 3.15 – Зміна миттєвого значення струму при векторному керуванні

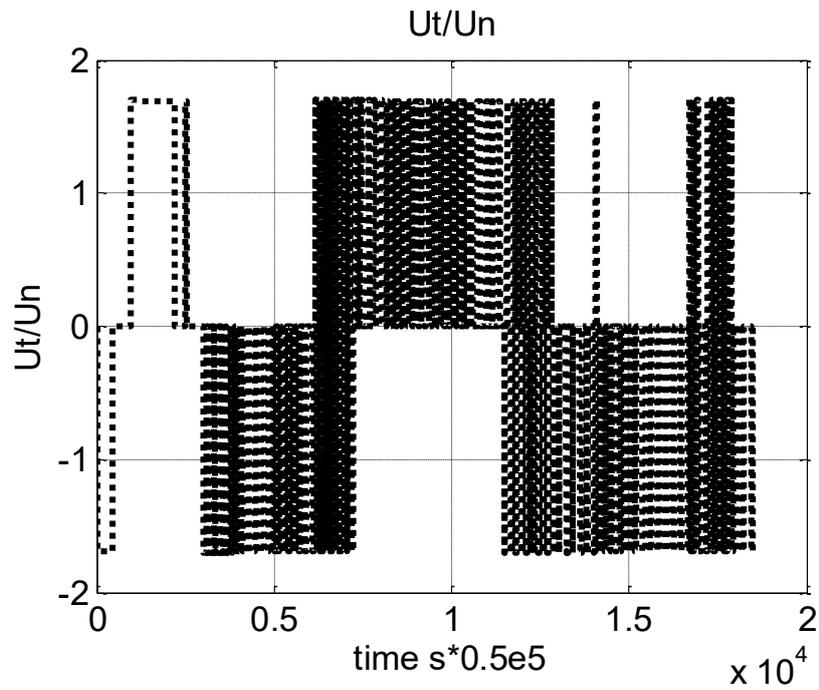


Рисунок 3.16 – Зміна миттєвого значення напруги при векторному керуванні в
детальному масштабі

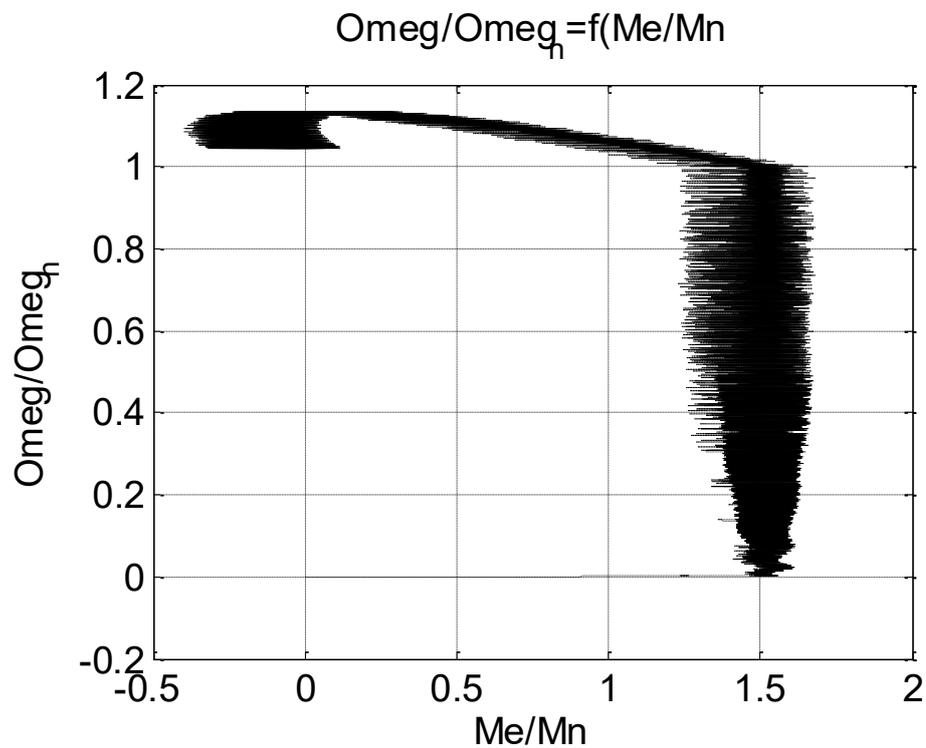


Рисунок 3.17 – Рух електроприводу компресора при векторному пуску в
координатах нормовані оберти – нормований електромагнітний момент

Як при частотному, так і при векторному способі керування, необхідно здійснювати керування процесом розгону з урахуванням протікання електромагнітних процесів і оптимізації енергетичних витрат, що вимагає у свою чергу створення ефективних систем керування. Як відзначено в розділі 1, одним із критеріїв якості протікання електромагнітних процесів є величина перерегулювання. Задачею системи керування в даному випадку є те, що б величина перерегулювання не перевищувала деякого граничного значення в перехідному режимі. В існуючих системах керування електроприводів ці задачі вирішувалися за допомогою використання ПД регуляторів і блоків задавання інтенсивності, що формують сигнал керування в залежності від зростання чи убування сигналу керування на виході відповідного ПД регулятора. В останні роки рішення аналогічних задач пропонується виконувати з використанням сучасних технологій, в основі яких лежать методи аналізу і синтезу складних технічних систем, зокрема систем векторного керування і нейромережевих технологій, використовуючи при цьому пряме цифрове керування моментом. Відмінною рисою цих рішень є гранично висока швидкодія систем керування, реалізованих, як правило, на базі цифрових релейних регуляторів чи регуляторів, що працюють на принципах нечіткої логіки та нейроконтролерів.

Висновки до розділу 3

1. Виконаний розрахунок енергетичних та механічних характеристик електроприводу компресора пускового повітря головного двигуна обраного судна підтверджує відповідність технічних параметрів електроприводу вимогам щодо застосування.

2. Встановлено, що застосування асинхронного електроприводу супроводжується значними перенавантаженнями у пусковому режимі, що вимагає обґрунтування методів та технічних засобів керування пуском, які дозволяють зменшити пускові струми та моменти до значень, відповідних особливостям об'єкту керування.

2. Обґрунтована можливість застосування в електроприводі компресора пускового повітря головного системи векторного керування та виконане її дослідження.

3. Виконане моделювання процесів у електроприводі компресора пускового повітря головного двигуна підтверджує можливість реалізації законів керування пуском, які забезпечують експлуатаційні вимоги.

4 РОЗРОБКА НЕЧІТКОЇ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ

4.1 Технічне обслуговування компресора пускового повітря

При тривалій стоянці компресора його необхідно запускати не рідше ніж один раз на тиждень на 2-3 хвилини на холостому ході. За відсутності вказівок заводу-виробника про терміни проведення технічного обслуговування (ТО) його слід виконувати щокварталу, через півроку та щорічно.

Через три місяці експлуатації необхідно перевірити стан:

- мастильних пристроїв та системи охолодження;
- запобіжних клапанів;
- контрольно-вимірювальних приладів;
- кріплення компресора до фундаментної рами;
- стан приводного електродвигуна та його пускового пристрою.

Через 6 місяців експлуатації виконуються такі роботи:

- розтин та огляд циліндрів;
- перевірку зазорів між поршнем та циліндровою втулкою;
- перевірку зазорів у рамових та шатунних підшипниках ковзання.

Через рік експлуатації необхідно провести наступні роботи:

- провести повне розбирання компресора;
- деталі ретельно очистити, промити та зробити дефектоскопію деталей компресора;
- вибракувати деталі, що мають граничні зношування;
- перевірити стан приводного електродвигуна та його пускового пристрою;
- класти відомість на ремонт;
- Записати необхідні відомості в журнал технічного стану.

Якщо компресор виводиться з експлуатації на ремонт у зимовий період, необхідно спустити воду з блоку, насоса та трубопроводів системи охолодження і продути їх стиснутим повітрям, щоб уникнути розморожування [18].

Дефектоскопія та ремонт. Технічний стан компресора без його розбирання можна проконтролювати за рівнем вібрації, ударних імпульсів, за величиною зниження продуктивності та наявністю води в маслі. Стан клапанів можна визначити за рівнем температури та тиску повітря за сходами.

Стан циліндро-поршневої групи (зазори в рамових, шатунних підшипниках та у верхній головці шатуна (головний підшипник), між поршнем і втулкою, стан поршневих кілець) контролюється за рівнем вібрації та зниження продуктивності компресора. Вимірювання рівня вібрації проводиться віброметром ВШВ-003, VTM-33 або аналогічними приладами. Вібрація вимірюється у вертикальній площині на кришках циліндрів і горизонтальній площині на верхніх кромках циліндрового блоку (середина циліндра).

Рівень віброшвидкості (мм/с, середньоквадратичне значення), виміряний у горизонтальній площині на основній частоті обертання колінчастого валу компресора $F_0 = n/60$ Гц (де n – частота обертання, хв-1), характеризує стан зазорів у рамових підшипниках; на частотах $2F_0$ і $4F_0$ - зазори між поршнем і циліндровою втулкою та стан поршневих кілець.

Рівень віброшвидкості, виміряний у вертикальній площині на частотах $2F_0$ та $4F_0$, характеризує зазори у шатунних підшипниках та верхній головці шатуна.

Відносне зниження продуктивності визначається за такою формулою:

$$\Delta V = \frac{V_n - V_\phi}{V_n} \times 100 \%,$$

де V_n – обсяг інтеркулера, м³;

$$V_\phi = \frac{163 \times 10^3 \times V_6 (P_2 - P_1)}{(T_v \times \tau)}$$

де V_ϕ – фактична продуктивність компресора, отримана при контролі, м³/год,
 P_1, P_2 – тиск повітря в інтеркулері відповідно на початку і в кінці контролю, МПа;
 T_v – температура поверхні інтеркулера, К; τ — час підвищення тиску в інтеркулері від значення P_1 до P_2 хв.

Відносне зниження продуктивності може бути визначено щодо зміни часу наповнення інтеркулера від одного фіксованого значення тиску до іншого, порівняно з еталонною величиною нормального технічного стану компресора.

Норми зниження продуктивності:

- 1 – хороший стан, V менше 25;
- 2 – задовільний, 25 менше або дорівнює V менше або дорівнює 40;
- 3 – незадовільний, V більше 40.

Норми вібрації, що відповідають трьом категоріям технічного стану циліндро-поршневої групи, наведено на рис. 4.1.

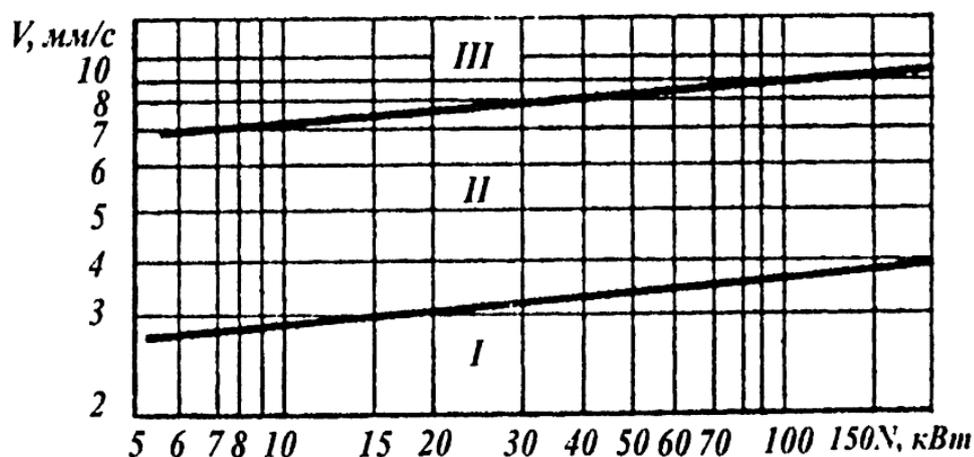


Рисунок 4.1 – Норми вібрації, що відповідають трьом категоріям технічного стану циліндро-поршневої групи:

- 1 – добрий стан; 2 – задовільний стан; 3 – незадовільний стан

Стан всмоктувальних і нагнітальних клапанів компресора контролюється за рівнем ударних імпульсів, температури поверхні кришки клапана, поверхні повітряних і водяних патрубків, за тиском повітря після 1-го ступеня.

Вимірювання рівня ударних імпульсів провадиться за допомогою приладу ІСП-1. Щуп приладу встановлюється на кришці клапана.

Вимірювання температури поверхні кришки клапана та поверхні повітряних патрубків провадиться за допомогою контактних термометрів типу ТТЦ-1.

Тиск повітря після 1-го ступеня контролюють за штатними манометрами.

Технічний стан охолоджувачів визначають за величиною зниження продуктивності та різниці між температурою поверхні вихідного повітряного патрубка циліндра 1-го ступеня та температурою поверхні водяного патрубка на вході в охолоджувач повітря.

Стан масляного насоса контролюється за величиною тиску в мастильній системі.

Стан прокладки ущільнювача головки блоку компресора визначається за наявності води в маслі. Контроль води в маслі здійснюється за допомогою приладу ІВМ-індикатор, розробленим ЦНДІМФ, або зарубіжних засобів типу Toetik або Perotec. Граничне значення вміст води в олії має перевищувати 0,2%.

У зв'язку з тим, що ремонт поршнів, поршневих кілець, шатунів, колінчастих валів, підшипників, циліндрів і клапанів поршневих компресорів нічим не відрізняються від ремонту цих деталей двигуна внутрішнього згорання, то достатньо ознайомимося тільки з роботами, характерними для компресорів. До таких робіт з ремонту компресорів відносять:

- Регулювання висоти камери стиснення;
- очищення змієвиків охолоджувачів повітря;
- регулювання запобіжних клапанів;
- Гідравлічні випробування повітряних балонів.

Регулювання висоти камери стиснення полягає в тому, щоб об'єм камери стиснення наближався до найменшої можливої величини, при якій не було б ударів поршня об кришку циліндра. Величина висоти камери стиснення у поршневих компресорів, залежно від їх розмірів, не перевищує 0,2-0,4 мм у щаблях високого тиску та 0,5-1 мм - у щаблях низького тиску.

Регулювання висоти камери стиснення в поршневих компресорах здійснюють шляхом зміни товщини прокладок в межах 0,05-0,5 мм:

- між кришкою та циліндровою втулкою;
- між шатуном та шатунним підшипником;
- між картером та циліндровою втулкою.

Перевірку висоти камери стиснення в циліндрах компресорів роблять перед ремонтом.

Очищення змійовиків охолоджувачів повітря необхідне, тому що в процесі експлуатації поршневого компресора змійовики зовні покриваються шаром накипу, а всередині змійовиків накопичується багато нагару та олії. Тому, при капітальному ремонті компресора кожен змійовик повинен бути розібраний, відпалений і випробуваний гідравлічним тиском, рівним не менше, ніж півторний і не більше подвійного робочого тиску в даному ступені компресора.

Відпал змійовиків включає наступні операції:

- до одного з кінців змійовика приєднують повітряний шланг низького тиску (0,3-0,7 МПа) і продувають стисненим повітрям;
- потім змійовик нагрівають до температури 600-700 С нагрівальної печі, на горні або паяльними лампами. Нагрітий змійовик швидко опускають у воду;
- після відпалу змійовик знову продувають стисненим повітрям і піддають гідравлічному випробуванню.

4.2 Розробка програми для нечіткої системи порад оператору суднового компресора пускового повітря

Для надання порад оператору суднового компресора пускового повітря розроблена нечітка експертна система (НЕС) у програмному середовищі Fuzzy ТЕСН [19 – 31].

Етапи створення НЕС у програмі FuzzyТЕСН наступні:

1) На першому етапі розроблена база знань або правил по ручному керуванню обладнанням. На погляд експерта – оператора база знань має наступний вид:

Всі експертно-створені правила представлені у вигляді наступних виразів.

Правило 1. ЯКЩО "тиск низький" І "температура низька", І "часу мало" ТО "потреба в ремонті висока".

Правило 2. Якщо "тиск низький" І "температура середня" І "час великий", ТО "потреба в ремонті середня".

Правило 3. Якщо "тиск високий" І "температура середня" І "час малий", ТО "потреба в ремонті середня".

Правило 4. Якщо "тиск низький" І "температура середня" І "час великий", ТО "потреба в ремонті висока".

Правило 5. Якщо "тиск середній" І "температура середня" І "час середній", ТО "потреба в ремонті не потрібна".

Правило 6. Якщо "тиск низький" І "температура високий" І "час середній", ТО "потреба в ремонті середня".

Правило 7. Якщо "тиск середній" І "температура середня" І "час середній", ТО "потреба в ремонті низька".

Правило 8. Якщо "тиск високий" І "температура середня" І "час високий", ТО "потреба в ремонті середня".

Правило 9. Якщо "тиск високий" І "температура висока" І "час великий", ТО "потреба в ремонті висока".

Другий етап.

2) Створено вищеописані параметри (змінні) системи та задані діапазони вимірювань даних для вхідних та вихідних змінних. А також скориговані функції належності власності цих змінних.

Для вхідних лінгвістичних змінних:

- 1) Вигляд змінної "Temp" наведено на рис. 4.2, налаштування параметрів змінної температури повітря – на рис.4.3.

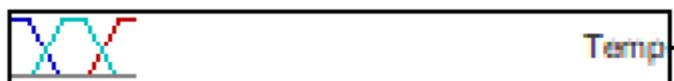


Рисунок 4.2 – Температура поверхні інтеркулера у програмі Fuzzy TECH

Linguistic Variables Wizard: Temperature

Base Variable Range

In this step you specify range and unit name of the variable.

	Shell Values		Code Values	
Min:	25	as	0	Minimum
Max:	60	as	65535	Maximum
Default:	20			
Unit:	Units			

<Previous Next> End Help Cancel

Рисунок 4.3 – Налаштування параметрів змінної температури повітря

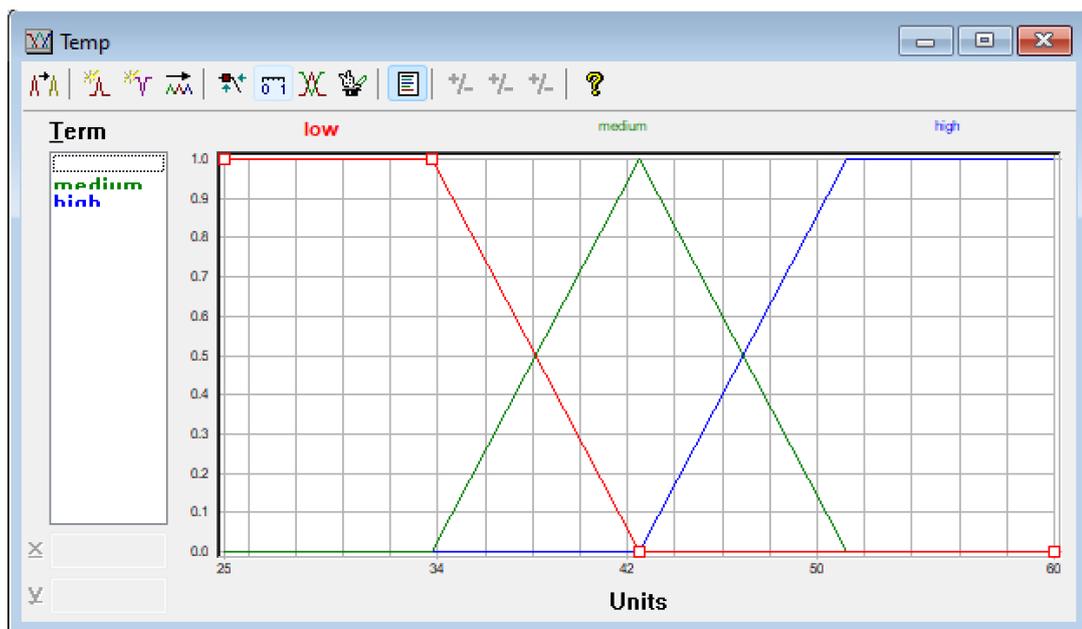


Рисунок 4.4 – Функції належності змінної температури повітря



Рисунок 4.5 – Тиск повітря в інтеркулері в програмі Fuzzy TECH

Linguistic Variables Wizard: Pressure1

Base Variable Range

In this step you specify range and unit name of the variable.

	Shell Values	as	Code Values	
Min:	<input type="text" value="0"/>	as	<input type="text" value="0"/>	Minimum
Max:	<input type="text" value="30"/>	as	<input type="text" value="65535"/>	Maximum
Default:	<input type="text" value="0"/>			
Unit:	<input type="text" value="Units"/>			

<Previous **Next>** End Help Cancel

Рисунок 4.6 – Налаштування параметрів змінної температури зовнішнього повітря

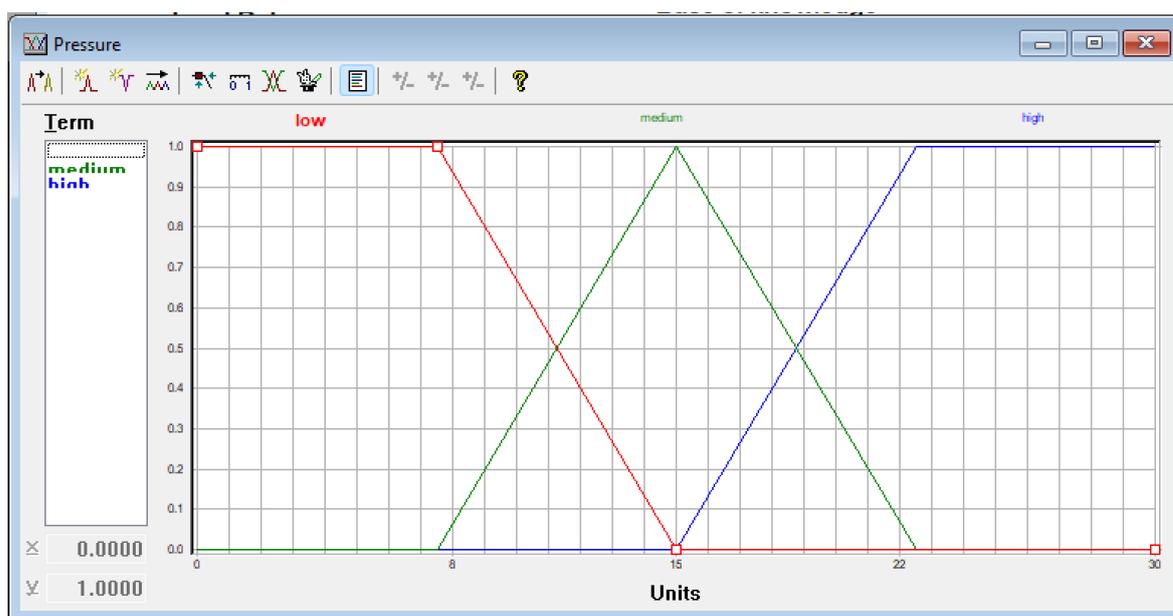


Рисунок 4.7 – Функції належності змінної тиску повітря (Мала, Середня, Висока)



Рисунок 4.8 – час підвищення тиску в інтеркулері від значення P1 до P2 хв. у програмі Fuzzy TECH

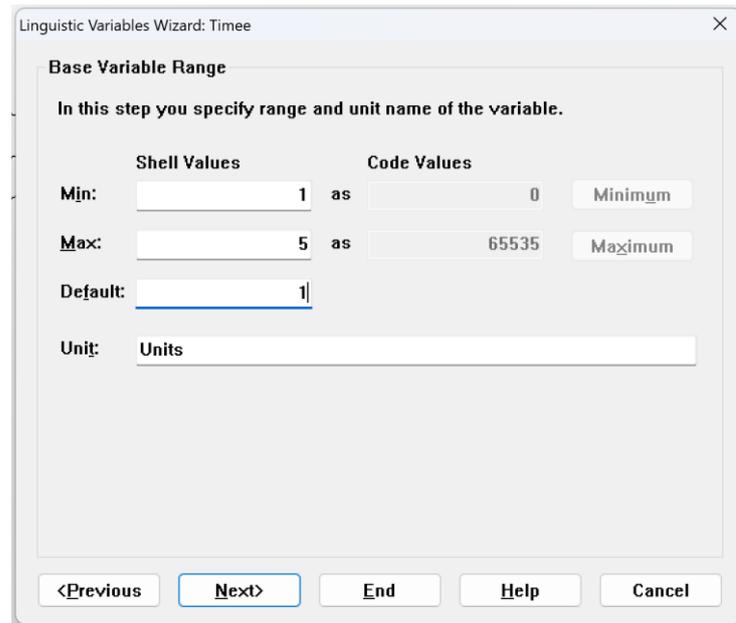


Рисунок 4.9 – Налаштування параметрів змінної температури повітря

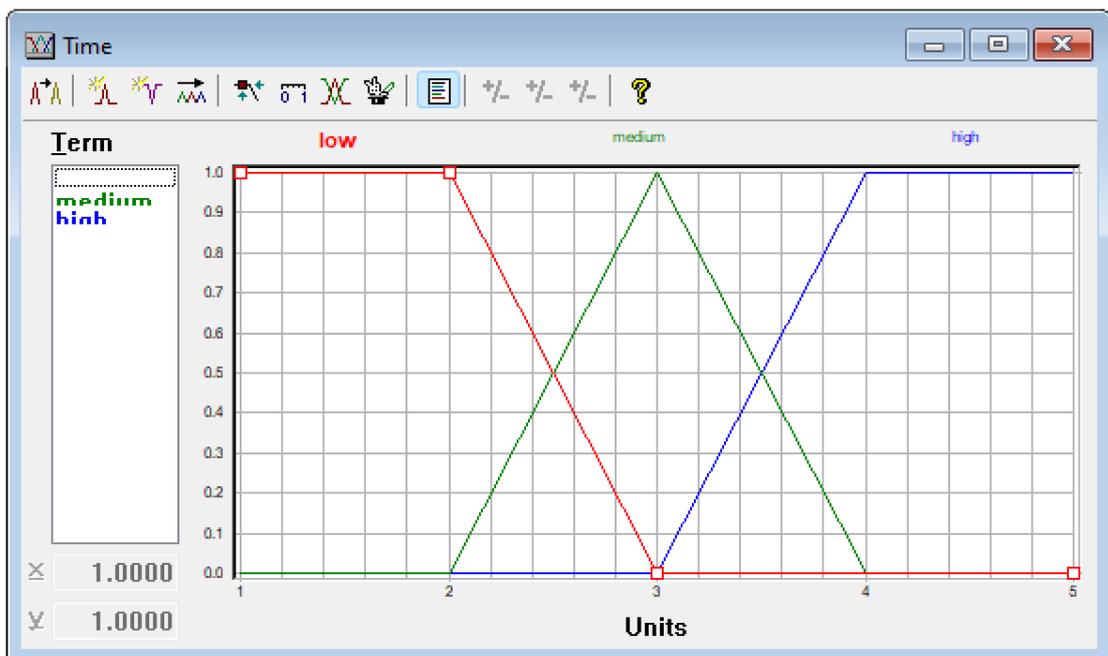


Рисунок 4.10 – Функції належності змінної тиску повітря (Мала, Середня, Висока)

Налаштування вихідних змінних наведено на рис. 4.11 – рис. 4.13.

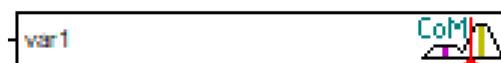


Рисунок 4.11 – Продуктивність–Fuzzy TECH

Linguistic Variables Wizard: var1

Base Variable Range

In this step you specify range and unit name of the variable.

Shell Values Code Values

Min: 0 as 0 Minimum

Max: 40 as 65535 Maximum

Default: 0

Unit: Units

<Previous Next> End Help Cancel

Рисунок 4.12 – Налаштування параметрів

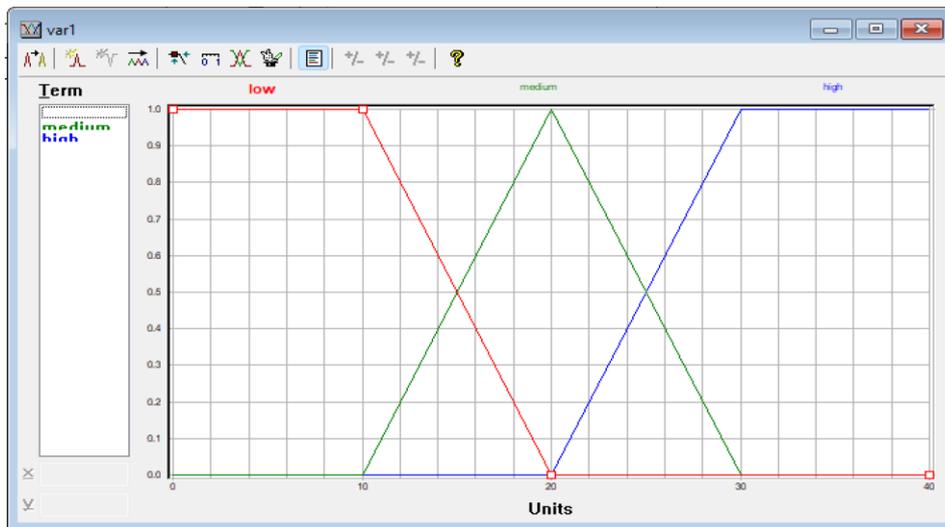


Рисунок 4.13 – Функції належності змінної

На наступному кроці, коли всі змінні визначені та налаштовані, створюється база правил, на основі якої буде працює нечітка система (рис. 4.14 – рис. 4.15).

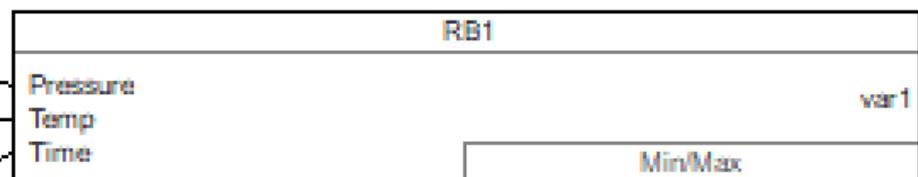


Рисунок 4.14 – Графічний елемент основи правил на принциповій схемі

#	IF	THEN	DoS	var1
1	Pressure low	low	1.00	high
2	low	medium	1.00	medium
3	High	medium	1.00	medium
4	low	medium	1.00	high
5	low	high	1.00	medium
6	high	medium	1.00	low
7	medium	medium	1.00	medium
8	high	low	1.00	medium
9	medium	high	1.00	medium
10	High	high	1.00	low
11	medium	low	1.00	medium
12	low	low	1.00	high
13				
14				
15				
16				

Рисунок 4.15 – Безпосередньо сама база правил системи у вигляді логічних виразів

Наступним етапом побудови НЕС є загальний вигляд розробленої системи та структурні зв'язки її елементів (рис. 4.16).

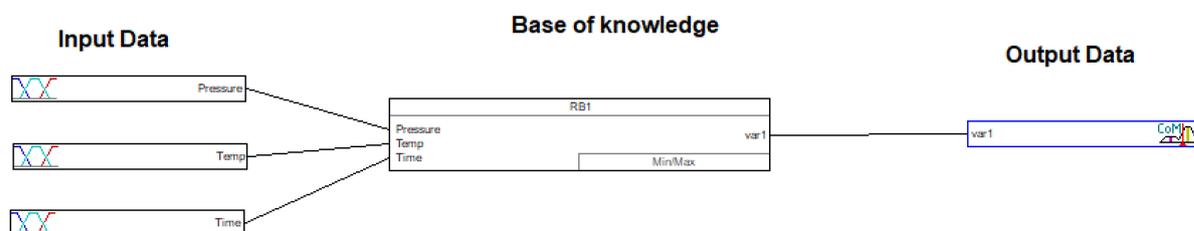


Рисунок 4.16 – Структурна схема нечіткої експертної системи (НЕС) у програмі Fuzzy TECH

З рис. 4.16 видно три змінні і база правил, які пов'язані між собою.

Після запуску програми проаналізовано отримані результати системи при деяких довільних заданих значеннях.

Нехай температура повітря змінюється на будь-яке значення. Тоді система порекомендує оператору встановити вентиль на зразкове значення ~13 відсотків від максимального робочого ходу:

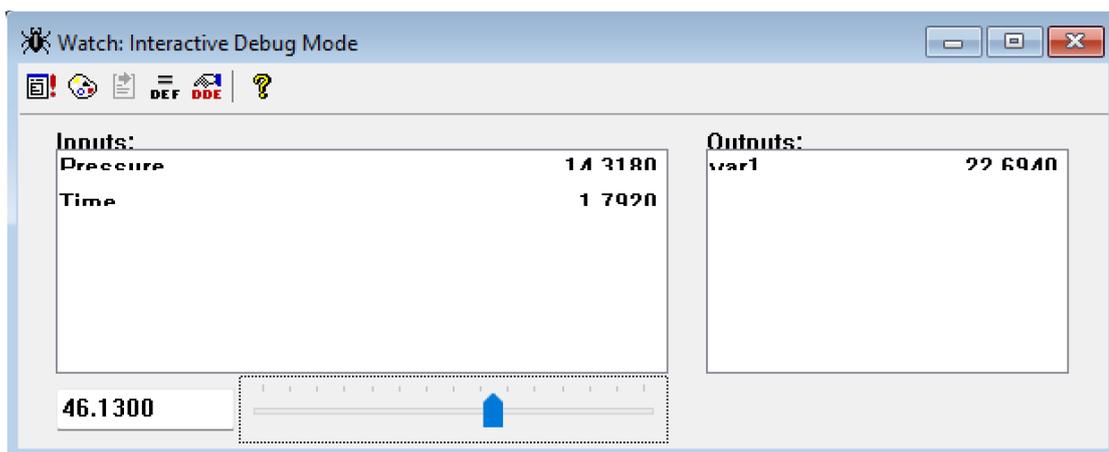


Рисунок 4.17 – Результати рекомендації НЕС на основі перших вхідних даних

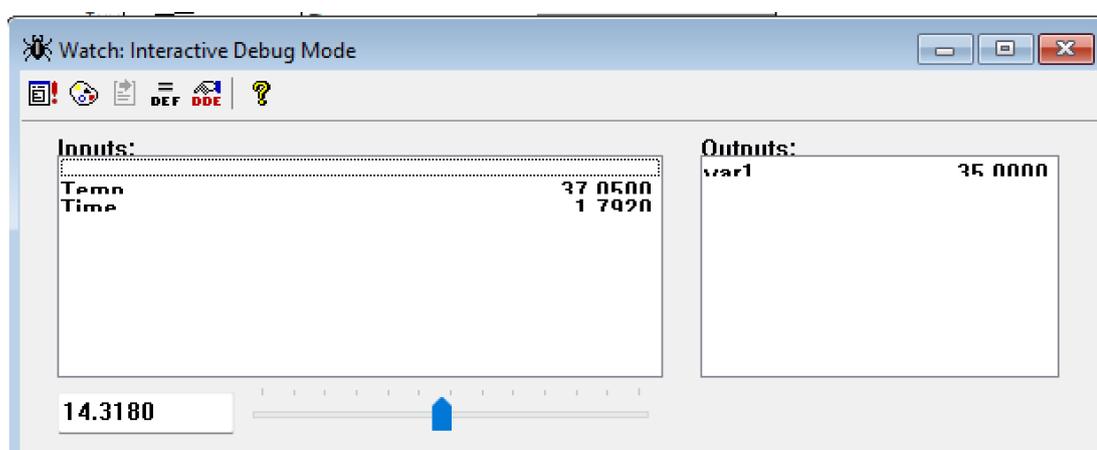


Рисунок 4.18 – Результати рекомендації системи з урахуванням других вхідних даних

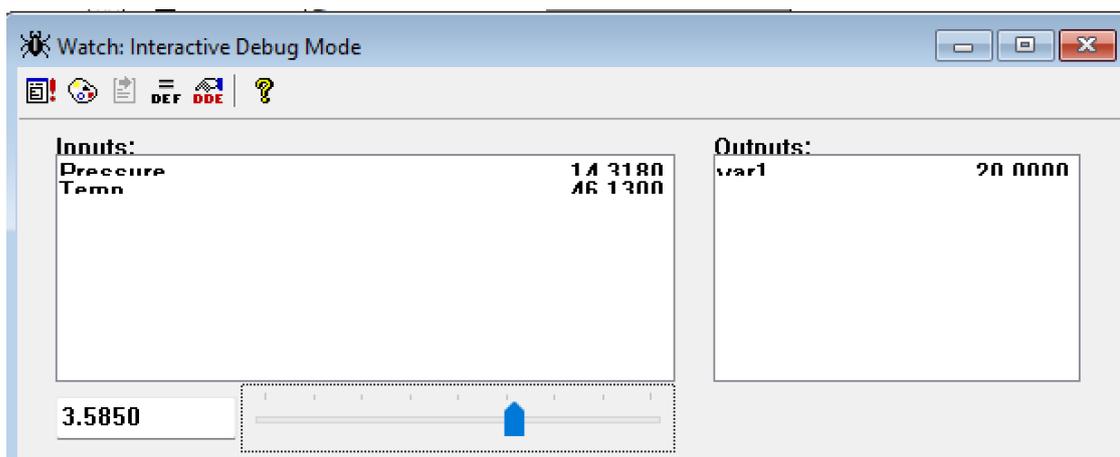


Рисунок 4.19 – Результати рекомендації системи з урахуванням других вхідних даних

Додатково, для наочності, на рис. 4.20 наведено графічна інтерпретація залежності у вигляді тривимірного графіка.

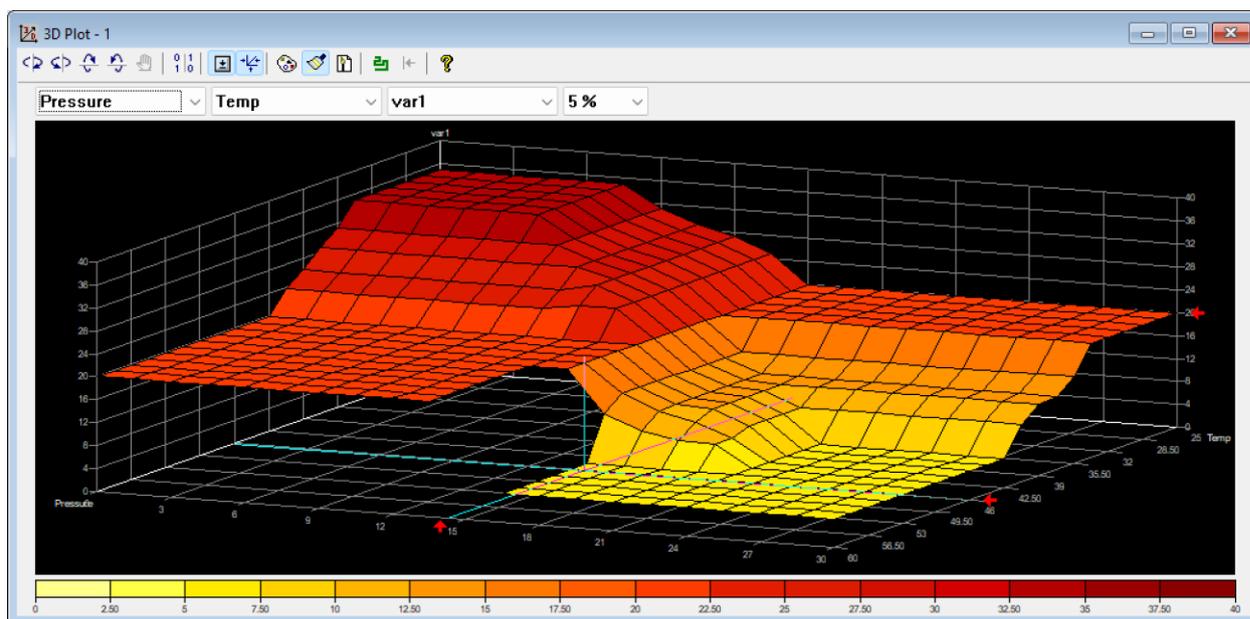


Рисунок 4.20 – Графічна тривимірна інтерпретація

До функцій комп'ютерно-інтегрованої САУ станом компресору також можна віднести:

- безперервний моніторинг стану досліджуемого пристрою;
- контроль та управління досліджуємою системою;
- безперервне відображення даних;
- оповіщення про аварії, нештатні ситуації;
- архівування даних у СУБД;
- надання даних користувачам через Інтернет.
- робота разом з системою пожежогасіння.

Після отримання поради від НЕС, судновий електромеханік за допомогою мнемосхеми SCADA може зробити висновки щодо поточного стану компресора.

Висновки до розділу 4

1. На основі вимог до технічного обслуговування компресору пускового повітря обґрунтована можливість та необхідність побудови нечіткої експертної системи для порад оператору.
2. Встановлено, що у нечіткій експертній системі доцільно використовувати дві сукупності вхідних параметра: параметри зовнішнього середовища та параметри стану об'єкту, та один вихідний – положення регулюючого органу.
3. Виконане імітаційне моделювання підтверджує коректність виконання поставлених завдань. В процесі розробки нечіткої експертної системи встановлено, що для отримання відповідних рішень по вибору керуючого впливу рекомендується:
 - використовувати алгоритм І. Мамдані;
 - у процесі фазифікації вхідних і вихідних змінних - використовувати гаусівський тип функцій власності;
 - мінімальна кількість терм – множин – три функції належності;
 - вагові коефіцієнти кожного правила в базі знань однакові та дорівнюють 100;
 - рекомендований метод дефазифікації – метод центру тяжкості.

ВИСНОВКИ

Сучасні вимоги до рівня досконалості технічних рішень автоматизації суднових систем потребують віднайдення таких засобів автоматизації, які мають найкращі техніко-економічні показники та забезпечують вирішення поставлених завдань найбільш досконалими методами. Однією із важливих складових суднових систем є сукупність пристроїв запуску головного двигуна за допомогою компресору пускового повітря. Такий компресор є складним технічним пристроєм і його рух забезпечується відповідним електроприводом, керування яким потребує специфічних особливостей, зумовлених особливостями руху об'єкту. Найбільш важливим питанням є забезпечення відповідних процесів пуску електроприводу із урахуванням вимог до динамічних процесів у компресорі пускового повітря для забезпечення головного завдання – пуску головного двигуна. Запуск головного двигуна за допомогою компресора пускового повітря, який виконується за допомогою керованого електроприводу, супроводжується значними моментами статичного та динамічного навантаження, що потребує обґрунтування відповідних методів пуску електроприводу.

Найбільш важливою проблемою обґрунтування таких методів є забезпечення допустимого перенавантаження електроприводу по пусковому струму.

Експлуатаційний період функціонування компресору пускового повітря потребує відповідних програмно-алгоритмічних рішень, які зумовлені невизначеністю деяких умов вихідних даних. Тому забезпечення експлуатаційного періоду є важливим питанням, яке потребує вирішення за допомогою сучасних технологій штучного інтелекту.

Звідси, удосконалення процесів управління у електроприводі суднового компресора пускового повітря та оцінки його технічного стану на протязі довготривалої експлуатації, є актуальною науково-технічною проблемою.

Мета роботи у вигляді вирішення протиріччя між затребуваними практикою вимогами до систем управління електроприводом компресора пускового повітря і його експлуатації та можливостями таких систем, що використовуються в

судновому обладнанні, досягнута шляхом встановлення методів та засобів удосконалення пускових режимів та інтелектуальних технологій обслуговування експлуатаційних режимів, що дозволило отримати наступні результати та висновки.

1. На основі розгляду принципів дії та класифікації суднових компресорів і досвіду застосування обґрунтовано, що суднові компресори поршневого типу мають переваги щодо застосування їх в системах пуску головного двигуна на морських судах.

2. Встановлено, що для суднових компресорів пускового повітря головного двигуна асинхронні електроприводи практично не мають альтернативи щодо вимог та умов застосування.

3. Враховуючи короткочасний напружений режим суднового компресору пускового повітря головного двигуна, основним проблемним питанням є забезпечення плавного пуску асинхронного електроприводу для уникнення перенавантажень по пусковому струму, що є принциповою особливістю асинхронного електроприводу.

4. На основі проведеного аналізу методів та пристроїв плавного пуску асинхронних електроприводів суднових компресорів пускового повітря головного двигуна виявлені альтернативні та конкуруючі підходи щодо вирішення поставленого завдання: використання достатньо простих спеціалізованих пристроїв плавного пуску та застосування універсальних, але достатньо складних, засобів частотного регульованого електроприводу.

5. Встановлено, що для пом'якшення пуску АД застосовуються частотні перетворювачі і пристрої плавного пуску в залежності від спектру поставлених завдань і забезпечення стійкості роботи електродвигуна. Забезпечення плавного пуску дозволяє продовжити ресурс двигуна та електроприводу. При використанні частотних перетворювачів та пристроїв плавного пуску відбувається скорочення пускових струмів у 1,5–3 рази, знижується ризик механічного руйнування приводу та валу електродвигуна, зменшується електромеханічна напруга в обмотках двигуна.

6. Наведені відомості відносно судна та його енергетичної установки дозволяють обґрунтувати доцільний вибір компресору пускового повітря та його електроприводу. Відповідно до умов експлуатації судна та техніко-економічних вимог до електроприводу суднового компресору пускового повітря обрано найбільш доцільне рішення пристрою керування електроприводом у вигляді пристрою плавного пуску.

7. Обґрунтовані алгоритми керування електроприводом компресору пускового повітря головного двигуна за допомогою пристрою плавного пуску у різних режимах та встановлені переваги його застосування і певні обмеження.

8. Виконаний розрахунок енергетичних та механічних характеристик електроприводу компресора пускового повітря головного двигуна обраного судна підтверджує відповідність технічних параметрів електроприводу вимогам щодо застосування. Встановлено, що застосування асинхронного електроприводу супроводжується значними перенавантаженнями у пусковому режимі, що вимагає обґрунтування методів та технічних засобів керування пуском, які дозволяють зменшити пускові струми та моменти до значень, відповідних особливостям об'єкту керування.

9. Обґрунтована можливість застосування в електроприводі компресора пускового повітря головного системи векторного керування та виконане її дослідження. Виконане моделювання процесів у електроприводі компресора пускового повітря головного двигуна підтверджує можливість реалізації законів керування пуском, які забезпечують експлуатаційні вимоги.

10. На основі вимог до технічного обслуговування компресору пускового повітря обґрунтована можливість та необхідність побудови нечіткої експертної системи для порад оператору.

11. Встановлено, що у нечіткій експертній системі доцільно використовувати дві сукупності вхідних параметра: параметри зовнішнього середовища та параметри стану об'єкту, та один вихідний – положення регулюючого органу.

12. Виконане імітаційне моделювання підтверджує коректність виконання поставлених завдань. В процесі розробки нечіткої експертної системи встановлено,

що для отримання відповідних рішень по вибору керуючого впливу рекомендується:

- використовувати алгоритм І. Мамдані;
- у процесі фазифікації вхідних і вихідних змінних - використовувати гаусівський тип функцій власності;
- мінімальна кількість терм – множин – три функції належності;
- вагові коефіцієнти кожного правила в базі знань однакові та дорівнюють 100;
- рекомендований метод дефазифікації – метод центру тяжкості.

Результати роботи загалом дозволяють обґрунтувати загальний висновок, що впровадження сукупності методів, методичних основ та програмно-алгоритмічних засобів управління електроприводом компресора пускового повітря і його експлуатації дозволяє вирішити завдання удосконалення пускових режимів та покращення обслуговування експлуатаційних режимів за рахунок інтелектуальних технологій

Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів управління та діагностування систем СЕЕС та розробку економічно вигідних технічних рішень для впровадження таких систем у судноплавстві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кольцов Г.С. Застосування нечіткої логіки в інтелектуальній системі діагностування та управління судновим компресором пускового повітря. Матеріали IV наук.-техн. конф. мол. вчених “Інновації та технології на морському та внутрішньому водному транспорті” (19-20 листопада 2024 р.) НУ ОМА, Одеса, Україна – 64 с.

2. Електронний ресурс. Режим доступу:

<http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/1535/3/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%BD%D1%96%20%D0%B2%D0%BA%D0%B0%D0%B7%D1%96%D0%B2%D0%BA%D0%B8.pdf>

3. Електронний ресурс. Режим доступу:

http://www.ems.org.ua/articles_3.shtml.

4. Електронний ресурс. Режим доступу:

<http://prtech.com.ua/Docs/Softstart.pdf>

5. A. Vyngra, B. Avdeyev, Calculation of the Load of an Electric Drive of a Reciprocating Compressor of a Ship Refrigeration Unit. // IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. (FarEastCon), 2018. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602830.

6. Ruselprom group. [jelektronnyj resurs] rezhim dostupa: <http://ruselprom.com/>. (data obrashhenija 25.10.2018).

7. Chernyi, S., Vyngra, A., Erofeev, P., & Novak, B. Analysis of the Starting Characteristics of the Complex Maritime Systems // Procedia Computer Science, (2020). 167, 2164-2171.

doi: 10.1016/j.procs.2020.03.266.

8. Ovcharenko I., Yenivatov V., Vyngra A. Analysis of methods to increase the efficiency of ship refrigeration plants // MATEC Web Conf. 2018. Vol. 239. 04017. DOI: 10.1051 /matecconf/201823904017.

9. Компресорне устаткування в технологіях видобутку вуглеводнів: монографія / А. Ф. Булат, Г. В. Кирик, Г. А. Бондаренко та ін.; за заг. ред. акад. НАН України А. Ф. Булата. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – 305 с.

10. Донець О. В. Теорія електропривода : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / В. І. Колотіло, О. В. Донець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 148 с.

11. Електронний ресурс. Режим доступу:

file:///C:/Users/user/Downloads/ssb_21.pdf

12. Заповловський М. Й., Мезенцев М. В., Оліфір М. В. Адаптація алгоритму векторного керування для розробки системи управління електроприводом змінного струму. Системи управління, навігації та зв'язку. – Том 3, № 77 (2024), С. 34–40.

DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.3.034>.

13. Й. Заповловський, М.В. Мезенцев, В.В. Скороделов. Математична модель для синтезу управлінь електроприводом змінного струму. Системи управління, навігації та зв'язку, 2019, вип. 5(57). doi: 10.26906/SUNZ.2019.5.016M.

14. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.

15. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й.Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. – Кременчук, 2001. – 410 с.

16. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Санченко О.В. Романенко О.І. Г 60 Моделювання регульованого електропривода: Підручник. – К.: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.

17. О.А. Андрющенко, А.О.Бойко, О.О. Бересан. Математичне моделювання системи електроприводу ТПН-АД у пакеті matlab simulink. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/74/66/15st-11.pdf>.

18. Електронний ресурс. Режим доступу:
https://kms-market.com.ua/ua/a179303-remont-vintovyh-porshnevyh.html?srsId=AfmBOoqupt2phVFIfh6bjSVOWGTe3R5j_IVPUfNVIqF3okOiaoWb4yTl/
19. Б. В., Поліщук. Інжинірингова технологія створення експертних систем нечіткої логіки. Електронний ресурс. Режим доступу:
<https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/45020>
20. Almohammadi, K., & Nagra, H. (2013). An adaptive fuzzy logic based system for improved knowledge delivery within intelligent E-Learning platforms. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/FUZZIEEE.2013.6622350>
21. Aly, S., & Vrana, I. (2018). Toward efficient modeling of fuzzy expert systems: a survey. *Agricultural Economics*, 52, 456–460. <https://doi.org/10.17221/5051-agricecon>.
22. Chrysafiadi, K., & Virvou, M. (2015). Fuzzy Logic for Adaptive Instruction in an E-learning Environment for Computer Programming. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 23(1), 164–177. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2014.2310242>.
23. Eryilmaz, M., & Adabashi, A. M. (2020). Development of an Intelligent Tutoring System Using Bayesian Networks and Fuzzy Logic for a Higher Student Academic Performance. *Applied Sciences*, 10, 10(19), 1–18.
24. Fedonuyk, A., Yunchyk, V., Mukutuyk, I., Duda, O., & Yatsyuk, S. (2021). Application of the hierarchy analysis method for the choice of the computer mathematics system for the IT-sphere specialists preparation.
25. Ojokoh, B. A., Omisore, M. O., Samuel, O. W., & Ogunniyi, T. O. (2012). A fuzzy logic based personalized recommender system. *International Journal of Computer Science and Information Technology & Security (IJCSITS)*.
26. Yuriy Hrytsiuk, Orest Bilas. (2019). Visualization of Software Quality Expert Assessment. *IEEE 2019 14th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT 2019)*, (Vol. 2, pp. 156– 160), 17–20 September, Lviv, Ukraine. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 206 p. 46.

27. Рідкокаша А.А., Голдер К.К. Основи систем штучного інтелекту. Навчальний посібник. Черкаси, "ВІДЛУННЯ – ПЛЮС", 2002. – 240 с.

28. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень : навчальний посібник. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. – 341 с.

29. A.K. Bhargava: Fuzzy Set Theory Fuzzy Logic and Their Applications: S Chand & Co Ltd (December 1, 2013) – 379 с.

30. Sven Hartmann, Josef Küng: Database and Expert Systems Applications: Springer; 1st ed. 2019 edition (August 6, 2019) – 251 с.

31. M.K. Hasan: Fuzzy Sets and Fuzzy Logic with Applications: Imprecision, Uncertainty and Vagueness Scholars' Press; Illustrated edition (May 17, 2019) – 328 p.

ДОДАТОК А – ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПРЕСОРА ПУСКОВОГО ПОВІТРЯ HV2/285A

Таблиця А.1 – Основні дані

Number of cylinders	2
LP piston diameter	285 mm
HP piston diameter	124 mm
Stroke	140 mm
Crank pin diameter	90 mm
Frame bearing pin diameter	90 mm
Diameter, LP cross bolt	50 mm
Diameter, HP cross bolt	45 mm
Number of LP valves	2
Number of HP valves	2
Sump oil capacity	24 litres

Таблиця А.2 – Ємності для охолодження води

Speed	[rpm]	580	725	875	975
Cooling water volume at 7-15 bar g working pressure	[l/min]	35	44	53	59
Pressure drop across compressor	[mm w c]	400	600	840	1030
Cooling water volume at 15-35 bar g working pressure	[l/min]	44	55	66	74
Pressure drop across compressor	[mm w c]	600	890	1240	1600

Таблиця А.3 – Рекомендовані тиск і температура

Recommended minimum inlet temperature, cooling water	30°C
Recommended maximum inlet temperature, cooling water	60°C
Recommended cooling water differential temperature, inlet/outlet	10 - 20°C
Recommended cooling water pressure	0.5 - 3.0 bar g
Recommended oil pressure for warm compressor	2.0 bar g
Recommended set point, oil pressure switch	0.8 bar g
Normal first stage working pressure at 0 - 10 bar discharge pressure	1.5 - 3.5 bar g
Normal first stage working pressure at 10 - 35 bar discharge pressure	4.0 - 6.0 bar g
Maximum working pressure	35 bar g
Low Pressure safety valve set point	9 bar g
High Pressure safety valve set point	5% above working pressure
Normal temperature at air outlet	30 - 65°C

Таблиця А.4 – Моменти затягування

Component	Threads	Torque [Nm]	Comments
Cylinder head	M22	245	
Cooling mantle	M20	196	
Valve cover, HP and LP	M16	147	
Valve clamp bolts, LP and HP	M20	118	Unbrako
Cap nuts, LP and HP	M20	98	
Crank shaft bearing bolts, LP and HP	3/8" BSP	98 -118	
Frame bearing	M16	118	
Crankcase end shield	M12	79	
Cylinder block/crankcase	M24	295	
Cleaning hatch, air filter hatch	M12	79	
Crankcase hatches	M10	39	

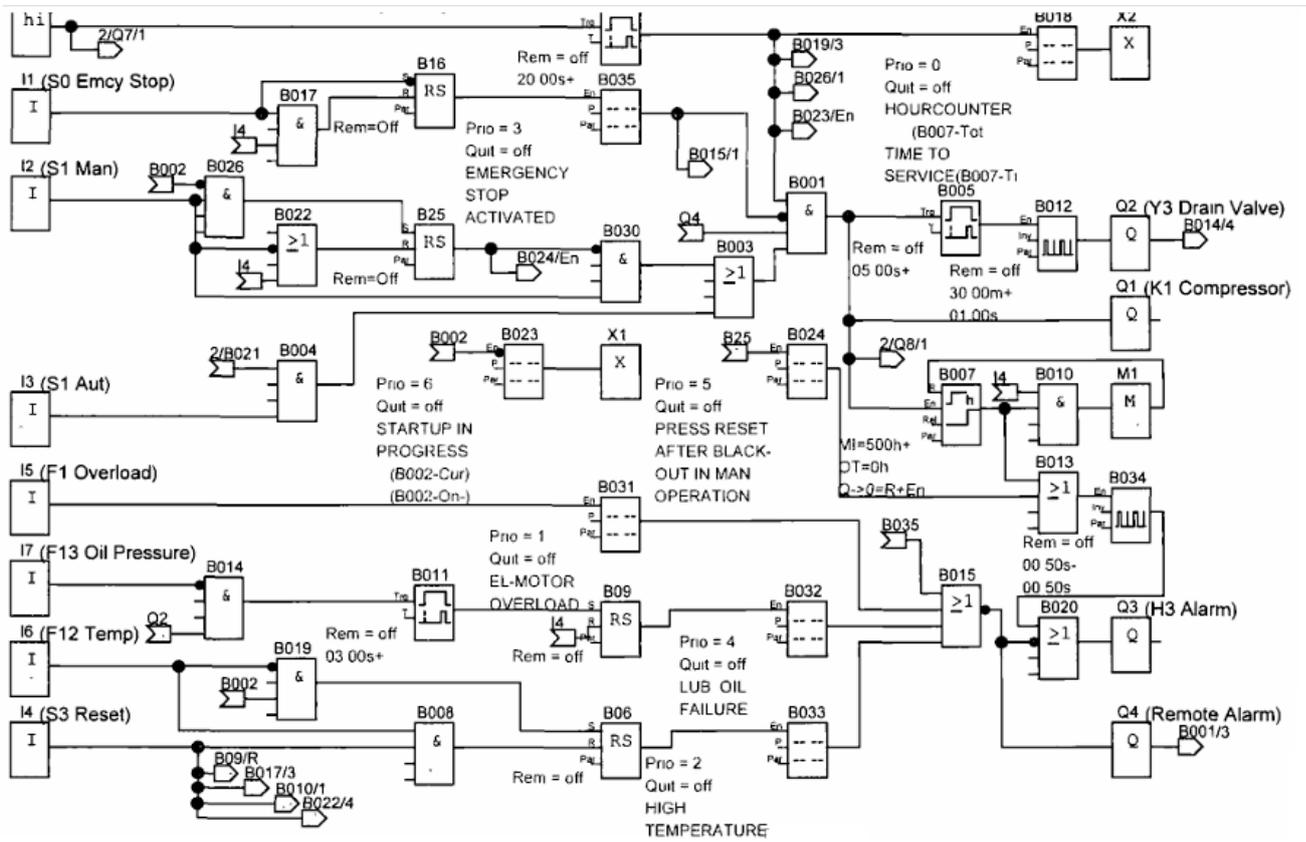
Таблиця А.5 – Допуски

Suction valve, LP, lifting height	1.4 mm
Discharge valve, LP, lifting height	1.4 mm
Suction valve, HP, lifting height	1.0 mm
Discharge valve, HP, lifting height	1.0 mm
Clearance, LP cylinder/piston	0.60 mm
Clearance, HP cylinder/piston	0.32 mm
Clearance, LP piston/cylinder head	1.4 - 1.8 mm
Clearance, HP piston/cylinder head	1.4 - 1.8 mm
End clearance, crankshaft/control bearing	0.3 - 0.5 mm
Clearance, frame bearing/shaft	0.10 - 0.16 mm
Clearance, crankshaft bearing	0.10 - 0.14 mm
Clearance, crosshead bearing	0.05 - 0.06 mm

Таблиця А.6 – Поршневі кільця

	Compression stage	
	LP	HP
Number of support rings (composite)	2	0
Number of compression rings (metal)	0	5
Number of compression rings (composite)	2	0
Number of oil rings (metal)	1	1
End clearance, support ring (S)	3.04 - 4.25 mm	-
End clearance, compression ring (S)	4.30 - 6.01 mm	-
End clearance, all metal rings	1.0 - 1.25 mm	0.4 - 0.6 mm
Wear limit, metal rings	2.25 mm	1.6 mm

ДОДАТОК Б ЛОГІЧНА СХЕМА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОМПРЕСОРА



ЛОГІЧНА СХЕМА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОМПРЕСОРА (ПРОДОВЖЕННЯ)

