

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

Кафедра: «Електричної інженерії та електроніки»

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

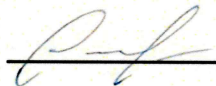
на тему:

«Дослідження та оптимізація роботи суднового частотно-регульованого
електропривода компресора»

Виконав: студент 6 курсу

Спеціальності: 271 – Морський та внутрішній водний транспорт

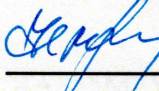
(шифр і назва спеціальності)

 Олександр ШВИДКИЙ

(підпис, прізвище та ініціали)

допущений до захисту 15.12.2023

(дата малого захисту)

Завідуючий кафедрою  Микола МУХА

(підпис, прізвище та ініціали)

Керівник  Віктор ПЕТРУШИН

(підпис, прізвище та ініціали)

Нормоконтролер  Ігор МАЛЯВІН

(підпис, прізвище та ініціали)

Рецензент  В. М. ЩЕПЕТКО В.С.

(підпис, прізвище та ініціали)

Одеса – 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

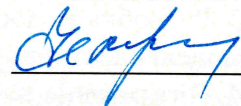
Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки

Спеціалізація: Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики

Кафедра Електричної інженерії та електроніки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри



(прізвище та ініціали)

«01» 11 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу магістра

Олександра Швидкого

Дослідження та оптимізація роботи суднового частотно-регульованого електропривода

Виконано за наказом ректора №2003 від «12» грудня 2023 року

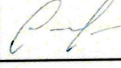
Закінчення роботи: «19» грудня 2023 року

Дані до роботи: Інформаційна модель серійного двигуна 4A355M2Y3, судновий синхронний Мусом серії F2520-SSC-MBL-BLW-Eexd, перетворювач частоти ABB

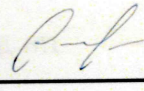
Зміст роботи магістра: Вступ; Розділ 1. Обґрунтування теми дипломного проекту та дослідження; Розділ 2. Розрахунок навантаження електроприводу; Розділ 3. Дослідження моделі електроприводу; Розділ 4. Оптимізація роботи електроприводу. 4.1. Оптимізація за рахунок налаштувань перетворювача частоти. 4.2. Оптимізація за рахунок вдосконалення електродвигуна; Розділ 5. Дослідження динамічного режиму роботи електроприводу; Висновки; Список використаних джерел; Додаток А: Вихідні дані двигуна R507; Додаток Б: Технологічна карта наукового дослідження.

Ілюстрації до презентації дипломної роботи магістра: Структурна схема комплексної інформаційної моделі програми Dimas Drive, Графік залежності активної потужності від частоти обертання суднового електропривода компресора, Механічні характеристики моделі електроприводу базового дослідження, Перехідна характеристика ККД базової та оптимізованої моделі.

6. Консультанти по роботі, з назвою розділів роботи, що до них відносяться:

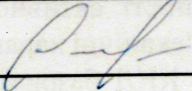
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис і дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1. Обґрунтування теми дипломного проекту та постановка задач дослідження	Петрушин В.С.		
2. Розрахунок навантаження електроприводу	Петрушин В.С.		
3. Розробка та дослідження моделі електроприводу	Петрушин В.С.		
4. Оптимізація роботи електроприводу	Петрушин В.С.		
5. Дослідження динамічного режиму роботи електроприводу	Петрушин В.С.		

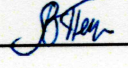
Дата видачі завдання: "4" жовтня 2023 року

Керівник  Завдання прийняв до виконання 
(підпис) (підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи магістра	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Обґрунтування теми дипломного проекту та постановка задач дослідження	01.11.2023 - 5.11.2023	Виконано
2	Розділ 2. Розрахунок навантаження електроприводу	10.11.2023 - 15.11.2023	Виконано
3	Розділ 3. Розробка та дослідження моделі електроприводу	15.11.2023 - 20.11.2023	Виконано
4	Розділ 4. Оптимізація роботи електроприводу	20.11.2023 - 25.11.2023	Виконано
5	Розділ 5. Дослідження динамічного режиму роботи електроприводу	26.11.2023 - 02.12.2023	Виконано
6	Вступ	03.12.2023 - 09.12.2023	Виконано
7	Висновки	10.12.2023 - 13.12.2023	Виконано
8	Список використаних джерел	14.12.2023 - 17.12.2023	Виконано

Курсант (студент)  Олександр ШВИДКИЙ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи  Віктор ПЕТРУШИН
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 60 с., 40 рис., 5 табл., 18 джерел, 2 додатки.

Тема: Дослідження та оптимізація роботи суднового частотно-регульованого електропривода компресора

Метою роботи є дослідити та оптимізувати роботу частотно-регульованого електропривода суднового компресора охолодження етилену.

Об'єктом дослідження дипломної роботи магістра є електромеханічні процеси в системі управління охолодження вантажу судна.

Методи дослідження – програмні методи моделювання та розрахунку параметрів електродвигуна, побудова та порівняння робочих характеристик. Для побудови комп'ютерної моделі частотно-регульованого електропривода було використано програму Dimas Drive, а параметри експлуатації обчислені в програмі Microsoft Excel. У дипломній роботі наведено опис та характеристики судна для перевезення рідкого газу Gaschem Leda, компресора охолодження етилену та його електропривода. На основі вимог до технологічного процесу розраховано навантаження електроприводу компресора. Було виконано підтвердження коректності розрахунку програмного продукту шляхом порівняння результатів комп'ютерного моделювання регульованого електроприводу асинхронного двигуна та результатів експлуатації електропривода на судні. Наведено детальний опис комп'ютерної програми. Проведено адаптацію серійного електродвигуна під параметри суднової електричної мережі. Після зміни налаштувань частотного перетворювача отримано кращі характеристики роботи електродвигуна. Виконано оптимізацію асинхронного двигуна за критерієм ККД. Досліджено перехідні процеси роботи оптимізованого та базового варіантів електропривода з метою визначення витрат електроенергії.

АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД,
КОМПРЕСОР, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, МОДЕЛЮВАННЯ,
ОПТИМІЗАЦІЯ, ККД, РЕЖИМ ПУСКУ, СПОЖИВАНА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ.

ABSTRACT

Diploma work of master: 60 p, 33 pics., 8 sh., 16 sources, 2 applications.

Topic: Research and Optimization of a Marine Frequency-Controlled Electric Drive Compressor Operation

The aim of this work is to optimize the operation of the electric drive for a ship's compressor used in ethylene cooling.

The subject of the master's thesis research is the electromechanical processes within the control system of cargo cooling unit.

Research Methods: Modeling and calculation of motor parameters using software methods, comparison of electric drive performance characteristics. The computer model of the variable frequency drive was created using the Dimas Drive program, and operational parameters were calculated using Microsoft Excel. In the diploma work represented Liquified Petroleum Gas Carrier GASCHEM LEDA, cargo refrigeration unit compressor and inverter description with characteristics. Based on the process requirements compressor load was calculated. Experimental confirmation of the model accuracy by comparing the results of computer simulation of the regulated electric drive induction motor, and the results of its maintenance records during sea service. A detailed description of the software is given. Considered electric drive comprehensive computer model was created and tested. Adaptation of the series drive motor according to parameters of the ship's electrical power supply was done. Induction motor optimization according to the efficiency was performed. Electric drive was optimized, basic and optimized models' transient operation characteristics were investigated to determine the costs of power energy losses.

REGULATED ELECTRIC DRIVE, INDUCTION MOTOR, COMPRESSOR, INVERTER, MODELING, CHARACTERISTICS, OPTIMIZATION, EFFICIENCY, POWER ENERGY LOSSES.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун

ККД – коефіцієнт корисної дії

ПК – персональний комп'ютер

ПЧ – перетворювач частоти

РЕП – регульований електропривод

ЗМІСТ

Вступ	8
Розділ 1. Обґрунтування теми дипломного проекту та постановка задач дослідження	11
Розділ 2. Розрахунок навантаження електроприводу	14
Розділ 3. Розробка та дослідження моделі електроприводу	20
Розділ 4. Оптимізація роботи електроприводу	39
4.1. Оптимізація за рахунок налаштувань перетворювача частоти	40
4.2. Оптимізація за рахунок вдосконалення електродвигуна.....	43
Розділ 5. Дослідження динамічного режиму роботи електроприводу	50
Висновки	56
Список використаних джерел	58
Додаток А: Вихідні дані холодоагенту R507	
Додаток Б: Технологічна карта наукового дослідження	

ВСТУП

В сучасних умовах технологічного розвитку та стрімкого прогресу морська індустрія активно впроваджує нові та вдосконалені технології з метою підвищення надійності, ефективності та енергоефективності своїх систем. Однією з ключових складових суднових систем є електропривід, особливо важливий для суден, які спеціалізуються в транспортуванні наливних вантажів, де використовуються сотні двигунів в різноманітних системах управління.

Предметом даної магістерської роботи є дослідження частотно-регульованого електроприводу суднового компресора охолодження етилену, який відіграє важливу та багатогранну роль у світі, особливо в хімічній промисловості. Основною сферою використання етилену є виробництво поліетилену, одного з найпоширеніших пластмасових полімерів. Поліетилен використовується для виробництва плівок, пакетів, контейнерів, труб, ізоляційних матеріалів і багатьох інших товарів. Етилен також використовується у сільському господарстві для регулювання росту рослин, процесу цвітіння, плодоношення та старіння рослин.

Етилен – це безбарвний газ, який транспортується в рідкому стані при дуже низьких температурах (нижче $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$). В морській галузі для транспортування етилену використовуються спеціальні танкерні судна – газовози, які обладнуються системами охолодження та ізоляції для утримання необхідної температури [1].

Процес охолодження етилену на газовозі складається з компресії (зменшення його об'єму і підвищення тиску), охолодження в теплообміннику та конденсації, тобто газ охолоджується до температури, при якій етилен переходить у рідкий стан [2].

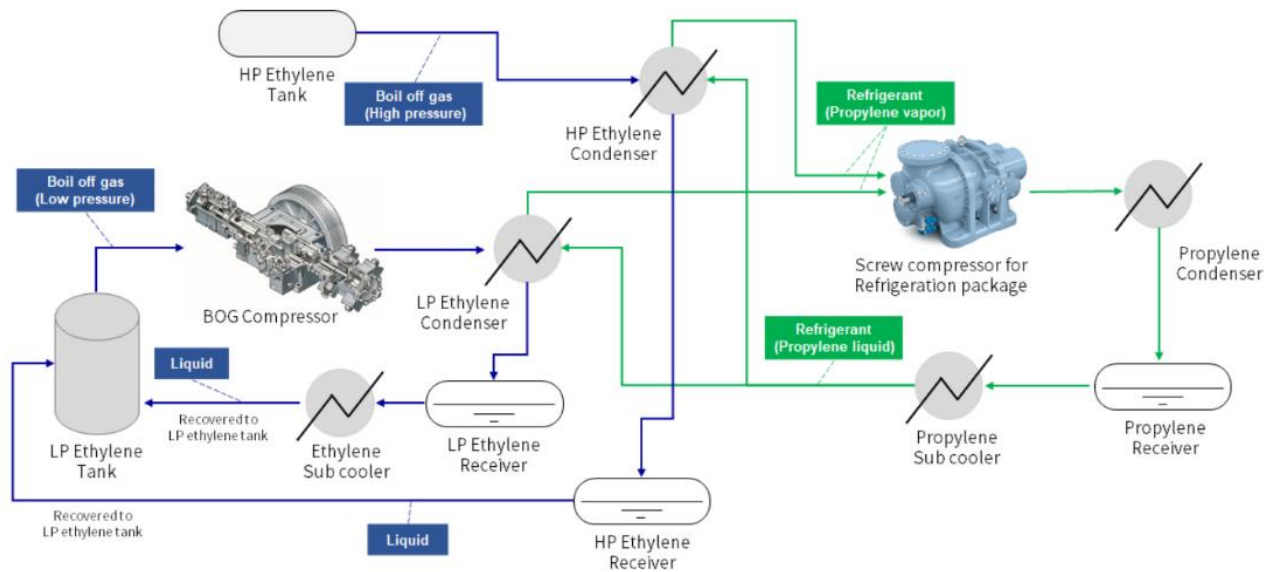


Рисунок 1 - Схема охолодження етилену: BOG (Boil of Gas compressor) – вантажний компресор випаруваного етилену; Screw compressor for Refrigeration package - гвинтовий компресор для установки охолодження; Condenser – Конденсатор; Receiver – Резервуар рідини

Найпоширенішим видом систем охолодження етилену на сьогоднішній день є системи зворотного зрідження (reliquefaction) пари вантажу, які можуть бути прямої дії (стиснення і конденсація), непрямой дії (за допомогою холодоагента без стиснення) та комбінованими системами [3, с. 129].

В комбінованій системі зворотного зрідження випаруваний газ з танків надходить до вантажного компресора, де стискається до тиску 16 бар та температури приблизно 60 °C (36 °C насичений, 96 °C перегрітий). Вихідний стиснений та нагрітий газ з вантажного компресора конденсується в теплообміннику приблизно при температурі - 36 °C за допомогою циркуляції холодоагенту типу R507 (додаток А). Для регулювання подачі холодоагенту використовуються компресори гвинтового типу, які потребують плавного регулювання обертів від 1800 до 3600 обертів на хвилину [4]. При нормальних умовах експлуатації холодоагент типу R507 випаровується на пластині теплообмінника при температурі -42 °C і тиску 0,28 бар.

Випарений газ R507 піддається перегріву в теплообміннику і стискається двоступеневим гвинтовим компресором до вихідного тиску 18 бар (40 °C). Далі газ конденсується за допомогою охолодження морською водою (максимальна температура 32 °C) в конденсаторі, і піддається додатковому охолодженню в відкритому економайзері до приблизно -5 °C перед повторним введенням в евапоратор (випарник). Конденсація етилену викликає випаровування рідини холодоагенту R507.

Для плавного регулювання обертів гвинтового компресора холодоагенту R507 широко використовують електроприводи з регулюванням частоти (Frequency Regulated Electric Drives). Це система, яка використовується для забезпечення контролю і регулювання швидкості обертання електродвигуна шляхом зміни частоти електричного струму. Основним елементом цієї системи є електропривод з перетворювачем частоти, який забезпечує зміну частоти і напруги, що подається на електродвигун [5].

Метою дослідження є вдосконалення роботи частотно-регульованого електроприводу суднового компресора для оптимізації його функціонування в суднових вантажних системах рідких газів, що потребують охолодження. Робота зосереджується на аналізі та вдосконаленні ключових параметрів електроприводу з метою забезпечення високої продуктивності, ефективності та надійності в різних умовах експлуатації.

Для досягнення поставленої мети використовуються сучасні методи обчислення та моделювання, зокрема програмний продукт Dimas Drive, що дозволяє проводити комплексний аналіз та оптимізацію параметрів електропривода. Отримані результати дослідження передбачається використовувати для практичних рекомендацій щодо вдосконалення роботи суднового компресора та підвищення загальної енергоефективності суднових вантажних систем.

РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ ТЕМИ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

Обґрунтування теми дипломного проекту та постановка задач дослідження є ключовим етапом визначення напрямку та мети досліджень.

Судновий транспорт має критичну роль в міжнародній торгівлі, транспортуючи значні обсяги товарів, сухі та наливні вантажі, які вимагають спеціалізованих умов зберігання. Система транспортування етилену забезпечує підтримання температури і тиску етилену в газоподібному стані за рахунок компресорів охолодження, де точність та ефективність електроприводу стає визначальним фактором в надійності та якості роботи суднової вантажної системи.

В умовах постійного підвищення екологічних вимог та цін на паливо, ефективне використання електроенергії стає стратегічно важливим. Оптимізований частотно-регульований електропривід суднового компресора може внести вагомий внесок у зменшення витрат електроенергії, зниження навантаження на дизель-генератори, викидів парникових газів та покращення енергоефективності у судновому транспорті.

Тема дослідження є актуальною в сучасному контексті, оскільки частотно-регульовані електроприводи знаходять все більше застосувань в морській галузі, забезпечуючи ефективне та енергозберігаюче управління судновим обладнанням.

Актуальність теми:

- Зростання об'ємів транспортування етилену суднами вимагає постійного вдосконалення суднових систем охолодження зріджених газів.
- Частотно-регульовані електроприводи є ефективними для оптимізації роботи компресорів та зниження витрат енергії.
- Удосконалення електроприводу сприяє ефективнішому використанню енергоресурсів та підвищує надійність суднової системи охолодження зріджених газів.
- Використання частотно-регульованих електроприводів є важливою складовою технічного прогресу в області морської інженерії.

Дослідження частотно-регульованого електроприводу в суднових вантажних системах газовозів сприяє впровадженню інноваційних технологій та методів управління, що покращують технічні та економічні показники. Результати дослідження можуть мати практичне застосування для розробників електроприводів та компресорів, а також для операторів суден, які використовують системи охолодження етилену. Використання частотно-регульованого електроприводу в системах транспортування етилену значно підвищує ефективність систем охолодження вантажу, але для досягнення максимальної продуктивності потрібно оптимізувати його параметри та взаємодію з компресором. Як відомо частотний перетворювач забезпечує плавне регулювання швидкості обертання ротора електродвигуна, а отже, і продуктивності компресора в широкому діапазоні. Він забезпечує м'який старт і зупинку перед відключенням, мінімізує реактивну потужність і підтримує високий $\cos\varphi$ у всьому діапазоні регулювання швидкості та навантаження компресора. Це відчутна перевага в порівнянні з іншими методами, коли компресор періодично переводиться в режим холостого ходу. Електронна система частотного перетворювача також служить додатковим захистом двигуна компресора від перегріву обмоток під час аварійного або надмірно важкого режиму роботи.

З усього сказаного стає очевидним, що в даний час електропривід з перетворювачем частоти є найкращим варіантом для регулювання обертів та навантаження гвинтового компресора охолодження зріджених газів. Цей підхід буде детально розглядатися в дипломному проекті, з основною увагою приділеною вдосконаленню електродвигуна як ключового елемента електроприводу.

Мета дипломної роботи полягає в поліпшенні ефективності регульованого електроприводу в межах заданого діапазону регулювання продуктивності компресора охолодження шляхом параметричної оптимізації, налаштування параметрів перетворювача частоти та конструктивних параметрів електродвигуна за критерієм ККД. Для досягнення цієї мети вирішуються такі завдання як розрахунок навантаження електроприводу, зіставлення результатів моделювання з характеристиками експлуатації на судні, розробка комп'ютерної моделі

електроприводу, оптимізація роботи електроприводу та дослідження результатів оптимізації для конкретних режимів роботи гвинтового компресора. Об'єктом дослідження є фізичні процеси в електромеханічних системах регулювання обертів електроприводу компресора охолодження етилену, а предметом - частотно-регульований електропривід гвинтового компресора. Загальною метою проекту є розробка та оптимізація системи управління електроприводом суднового компресора суднової системи охолодження зріджених газів з використанням частотного регулювання для підвищення його продуктивності та енергоефективності. Для цього необхідно провести аналіз доступних моделей частотно-регульованих електроприводів на ринку, визначити технічні вимоги до електроприводу для оптимальної роботи з судновим компресором охолодження етилену, розробити програмну модель електроприводу для різних режимів роботи, здійснити вимірювання параметрів роботи електроприводу в умовах експлуатації при різних режимах роботи та порівняти з результатами роботи комп'ютерної моделі електроприводу.

Постановка задач дослідження:

- Провести детальний аналіз роботи частотно-регульованого електроприводу суднового компресора під різними умовами експлуатації;
- Використовуючи програмний продукт Dimas Drive, побудувати комп'ютерну модель електроприводу, провести оптимізацію його параметрів за рахунок зміни налаштувань перетворювача частоти та зміни конструктивних параметрів асинхронного двигуна;
- Розробити рекомендації та пропозиції щодо вдосконалення роботи електроприводу з метою підвищення його ефективності та зниження споживання енергії.

Ці задачі спрямовані на створення комплексного дослідження електроприводу, враховуючи як теоретичні аспекти, так і практичні застосування в судновій індустрії.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

В системах зворотного зрідження етилену найпоширенішими є вантажні компресори поршневого типу та компресори охолодження Мусот гвинтового типу [6]. Основні елементи конструкції гвинтового компресора включають: *ротори (гвинти)* – головні робочі елементи гвинтового компресора, зазвичай два або більше гвинтових ротора розташовані паралельно один одному і обертаються у протилежних напрямках, вони мають спеціальні форми, що дозволяють їм захоплювати і стискати газ; *камери стиснення* – простори між гвинтовими роторами, де відбувається стискання газу; шестерня чи ременеві передачі – використовується для обертання гвинтових роторів.

Гвинтовий компресор приводиться в рух електродвигуном. Основними перевагами гвинтових компресорів порівняно з іншими типами є висока продуктивність, стійкість до перевантаження, компактність, ефективність (гвинтові компресори мають високий коефіцієнт корисної дії (ККД), оскільки робочі гвинти дозволяють ефективно стискати газ), низький рівень вібрацій та шуму, здатність до роботи при низьких температурах, довгий термін служби та низька потреба у технічному обслуговуванні [7].

Незважаючи на численні переваги, гвинтові компресори також мають свої недоліки, які можуть впливати на їх ефективність та використання в певних умовах. Декілька з найзагальніших недоліків включають високі витрати на придбання та обслуговування, потреба у чистому та сухому холодоагенті (гвинтові компресори чутливі до забруднень та вологості холодоагенту, наявність забруднень може призвести до зменшення ефективності та збільшення ризику несправностей), обмеження регулювання продуктивності (в порівнянні з іншими типами компресорів, гвинтові компресори мають обмежений діапазон регулювання продуктивності, особливо при роботі при частковому завантаженні), питома витрата енергії.

Рациональний вибір компресора залежить від конкретних умов застосування та вимог процесу. В дипломній роботі досліджується та оптимізується регульований електропривід двоступеневого гвинтового компресора фірми «MYCOM», серії F2520-SSC-MBL-BLW-Eexd, який використовується в системі зворотного зрідження етилену газозову «GASCHEM LEDA». Загальний вид та основні параметри гвинтового компресора «MYCOM» системи охолодження газозову «GASCHEM LEDA» представлені на рис. 2.1 та в табл. 2.1 відповідно.



Рисунок 2.1 – Загальний вид гвинтового компресора Мусом

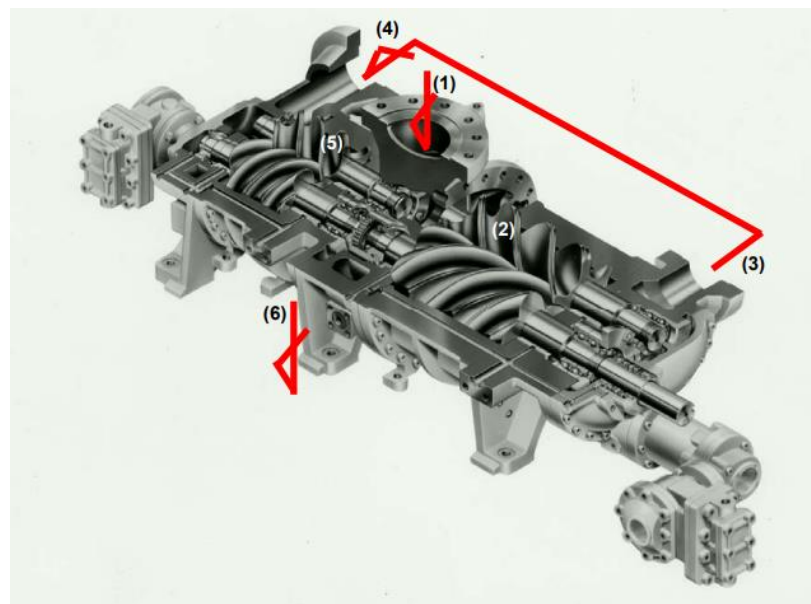


Рисунок 2.2 – Вид газового потоку гвинтового компресора Мусом (1,2,3 – Впуск, стиснення, випуск газу першої ступені; 4,5,6 – Впуск, стиснення, випуск другої ступені)

Таблиця 2.1 – Основні параметри гвинтового компресора Musom F2520 - SSC-MBL-BLW-Exd

Виробник	«MYCOM» Mayekawa Co.
Тип	двоступеневий гвинтовий
Модель	F2520-SSC-MBL-BLW-Exd
Вага (кг)	1910
Кількість роторів	2
Діапазон регулювання швидкості приводного електродвигуна (об/хв)	1800 - 3600
Діапазон регулювання продуктивності (м³/год)	810 – 1900
Максимальний тиск нагнітання (бар)	19,6
Мінімальний вхідний тиск (бар)	-0,8

Щоб розрахувати необхідну потужність компресора для найбільш критичних умов експлуатації, необхідно спочатку перевести величини в одиниці системи СІ. Подача компресора $Q = 1900 \text{ м}^3/\text{г}$, або $1900 \text{ м}^3/\text{г} \approx 527,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

Тиск нагнітання $19,6 \text{ бар} = (19,6 \cdot 10^5) \text{ Па}$.

Потужність, необхідна для роботи компресора, визначається роботою, що витрачається на подачу газу [8]:

$$P_k = k_z \frac{\rho_1 \cdot g \cdot Q \cdot P_{\text{нагн}}}{\eta_n \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3}, \quad (2.1)$$

де P_k – потужність компресора, кВт; $P_{\text{нагн}}$ – тиск нагнітання, Па; Q – подача (продуктивність), м³/с; k_z – 1,05...1,15 – коефіцієнт запасу; $\eta_{об}$ – 0,94...0,98 – коефіцієнт, що враховує втрати через нещільності; η_k – ККД компресора; ρ_1 – щільність газу, що перекачується, кг/м³. Для холодоагенту R507 при нульовій температурі щільність газу $\rho_1 = 31,399 \text{ кг/м}^3$; g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Згідно з довідниками [9] обираємо $k_s = 1,05$, $\eta_{об} = 0,92$, $\eta_k = 0,84$.

$$\text{Тоді } P_k = 1,05 \cdot \frac{31,399 \cdot 9,81 \cdot 527,70 \cdot 10^{-3} \cdot 19,6 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3}}{0,92 \cdot 0,84} = 432,6 \text{ кВт}$$

Момент на валу гвинтового компресора визначається з вираження енергії, що передається переміщуваному газу в одиницю часу. Відомо, що

$$, \quad m = F \cdot v \cdot \rho, \quad (2.2)$$

де m - маса газу, що проходить за секунду, кг/с; F - перетин газопроводу, м²; v - швидкість руху газу, м/с; ρ - щільність газу, кг/м³.

Тоді вираження для енергії газу, що рухається, має вид:

$$W = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{F \cdot v^3 \cdot \rho}{2}, \quad (2.3)$$

$$Q = C_1 \cdot \omega; \quad H = C_2 \cdot \omega^2, \quad (2.4)$$

$$P = \frac{Q \cdot H}{\eta_6 \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3} = C \cdot \omega^3; \quad M = \frac{P}{\omega} = C \cdot \omega^2, \quad (2.5)$$

де C , C_1 , C_2 – постійні величини.

З деяким наближенням можна прийняти, що для гвинтових компресорів між потужністю на валу і кутовою швидкістю обертання існує залежність $P = C \cdot \omega^3$, відповідно $M = C \cdot \omega^2$, що зображено на рис. 2.3. Практично показники ступеня змінюються в межах 0,05...5 для різних конструкцій і умов роботи електропривода [10].

Для визначення моменту на валу компресора використовуються наступні вирази:

$$M = \frac{P_k}{\omega}, \quad (2.6)$$

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}, \quad (2.7)$$

де ω – кутова швидкість, n – швидкість обертання валу.

Використовуючи розраховані та отримані з каталогу дані отримаємо:

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3600}{60} = 376,8 \text{ с}^{-1},$$

$$M = \frac{432,6 \cdot 10^3}{376,8} = 1148 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$C = \frac{1148}{376,8^2} = 0,008$$

Залежність моменту M від кутової швидкості ω

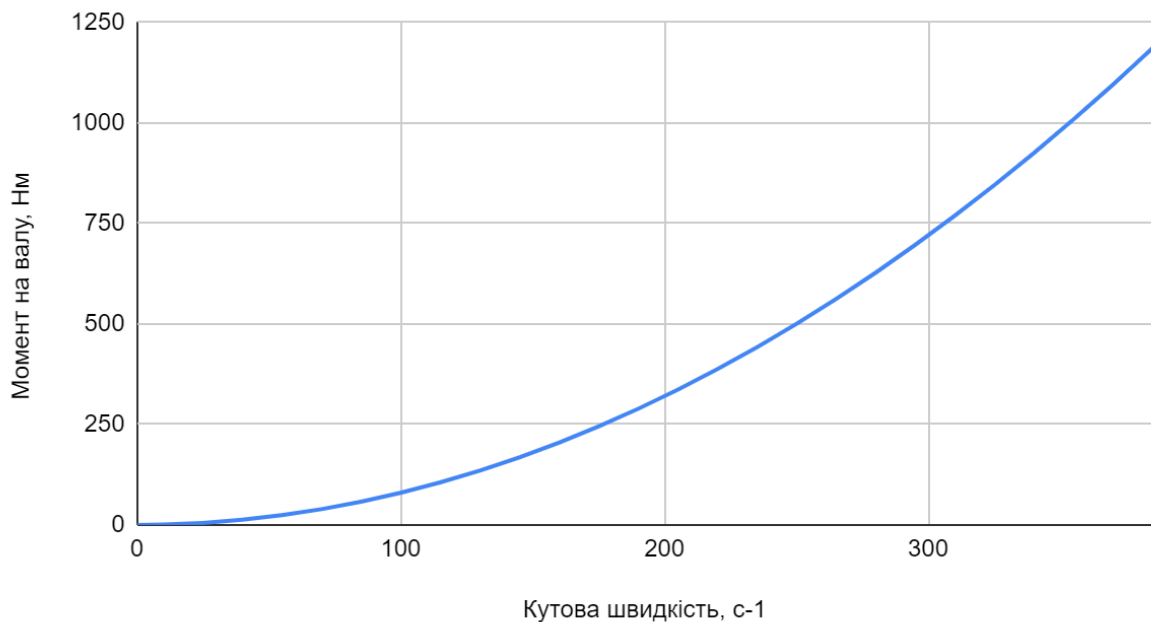


Рисунок 2.3. – Графік залежності моменту на валу двигуна від кутової швидкості гвинтового компресора

З даних експлуатації системи охолодження етилену газозова GASCHEM LEDA було взято графік залежності температури випаровування етилену від моменту на валу компресора (рис. 2.4), що показує залежність продуктивності системи від регулювання обертів на валу електропривода.

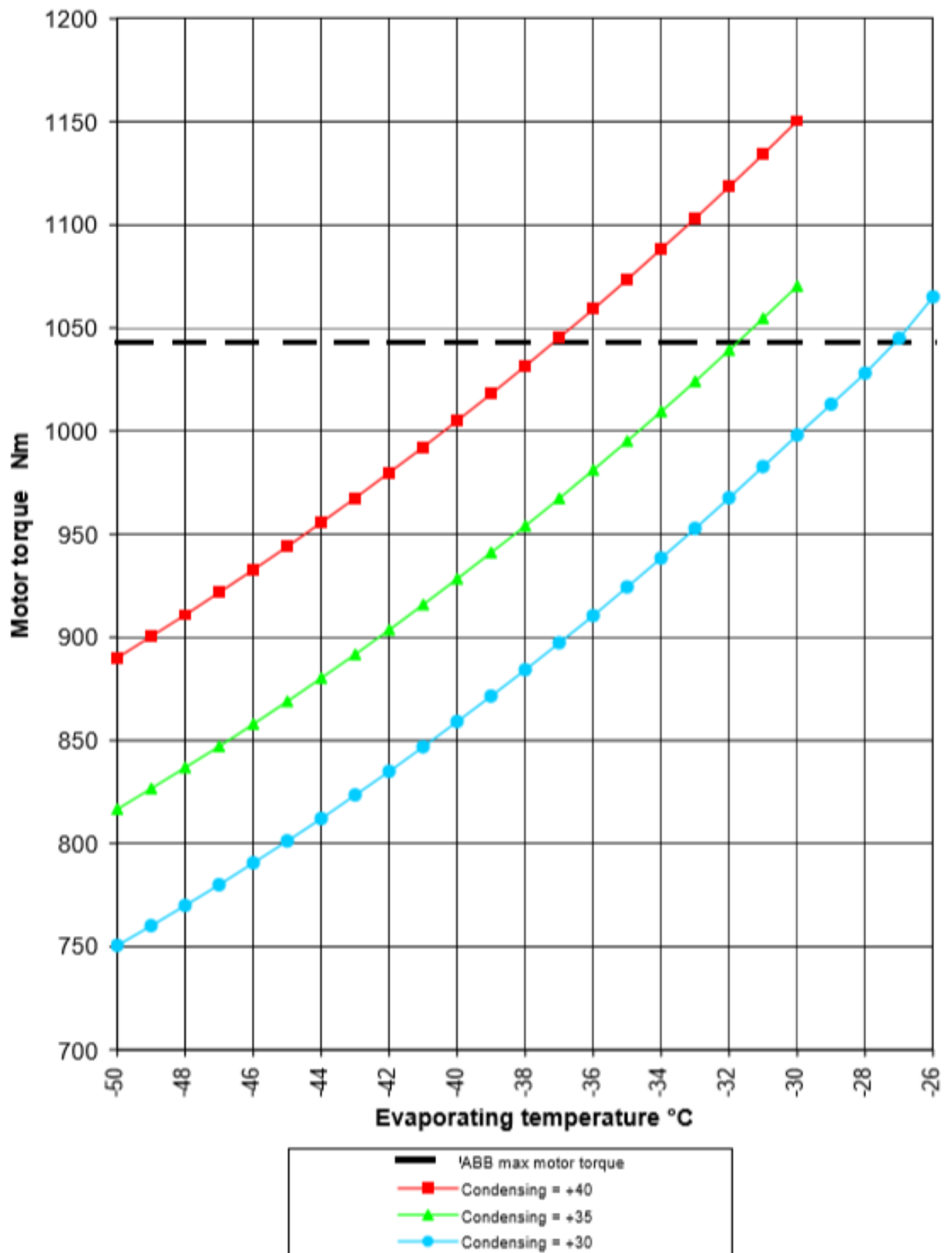


Рисунок 2.4 – Графік залежності температури випаровування етилену від моменту на валу компресора

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

В дипломному проекті для розробки та дослідження регульованого електроприводу було вирішено використовувати програму DIMAS Drive [11].

Структурна схема комплексної математичної моделі програми DIMAS Drive зображена на рис. 3.1.

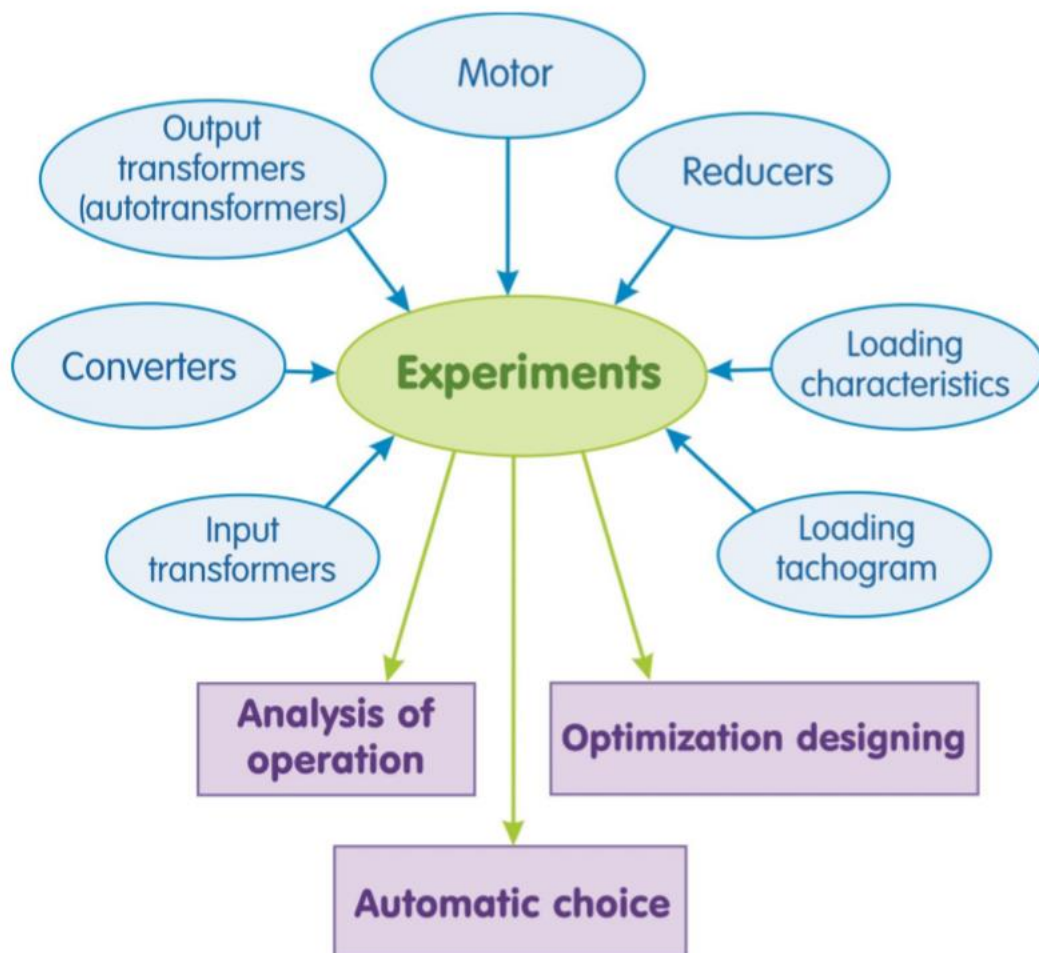


Рисунок 3.1 – Структурна схема комплексної математичної моделі програми DIMAS Drive

Програмний продукт DIMAS Drive виконує аналіз роботи електроприводу, автоматизований вибір оптимальних компонентів та оптимізацію проектування з урахуванням енергетичних, масо-габаритних, вартісних та інших показників. У програмі містяться бази даних асинхронних двигунів, трансформаторів, перетворювачів, редукторів, навантажень та тахограм. Елементи, вибрані з цих баз та змінені з врахуванням параметрів регулювання, формують об'єкт дослідження - електропривід. Комплексна математична модель включає аналітичну модель напівпровідникового перетворювача, моделі двигуна для сталого і динамічного режиму, моделі навантаження та тахограми.

Основним об'єктом дослідження є асинхронний двигун, для якого проводиться аналіз різних процесів в діапазоні регулювання при різному навантаженні на валу. Для аналізу роботи двигуна необхідно ввести вихідні дані, параметри мережі, режим роботи навантаження та інші характеристики. Автоматизований вибір та оптимізація проводяться за різними критеріями, такими як ККД, коефіцієнт потужності, вага, вартість та габаритні розміри.

Програма вирішує завдання як для необхідного діапазону регулювання, так і з урахуванням тривалості роботи в різних точках діапазону. Для досягнення поставленої мети розробки моделі з кращими показниками роботи електропривода використовується параметрична оптимізація в процесі проектування.

Під час практики на газозові GASCHEM LEDA для дослідження було обрано систему охолодження етилену з електродвигуном компанії ABB тип M3KP355MLA [12] та перетворювачем частоти ABB ACS800-07 [13]. Блок-схема двигуна та перетворювача частоти представлені на рис. 3.2.

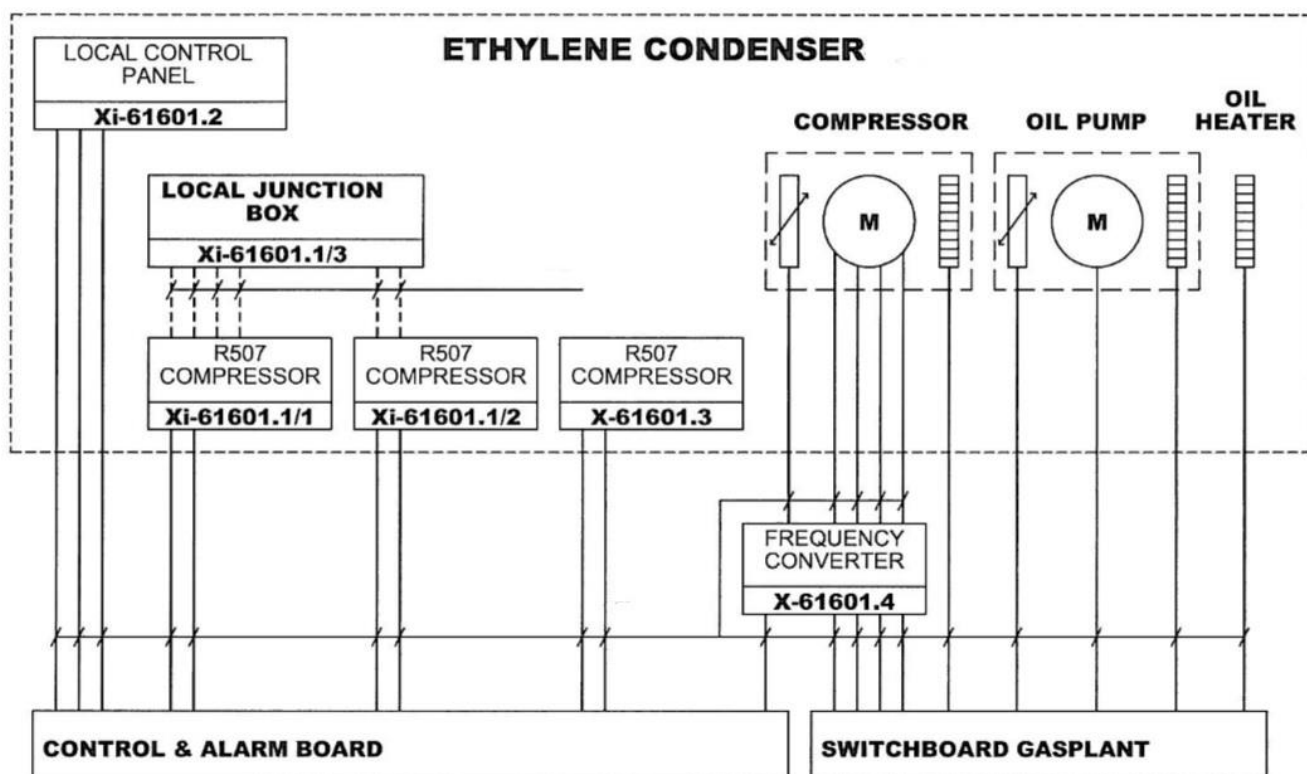


Рисунок 3.2 – Блок-схема АД-ПЧ системи охолодження етилену (Frequency converter – перетворювач частоти, Switchboard Gas plant – Розподільчий щит вантажної системи зрідження газів)

Досліджуваною машиною є асинхронний двигун АВВ типу МЗКР355МЛА з наступними номінальними величинами і параметрами: $P_n = 400$ кВт; $U_n = 400$ В; $I_n = 677$ А; $f = 60$ Гц; $\eta_n = 96,9$ %; $\cos \varphi_n = 0,88$; $n_n = 2982$ об/хв ($\omega_n = 376$ с⁻¹); $M_n = 1043$ Нм;

Асинхронний двигун компресора отримує живлення від транзисторного ПЧ частоти типу АВВ ACS800-07, ($P_n = 432$ кВт, $U_{нл} = 440$ В, $I_{нл} = 665$ А – номінальний струм двигуна, частота комутації 3 кГц, вихідна частота 0...400 кГц).

Даний ПЧ встановлюється окремо в приміщенні з охолодженням або вентиляцією та має додаткове охолодження інтегрованими вентиляторами, що оберігає його від втрати потужності при сильних перегрівих [14]. В перетворювачі попередньо встановлюється необхідний закон керування напруга-частота $U/f = \text{const}$.

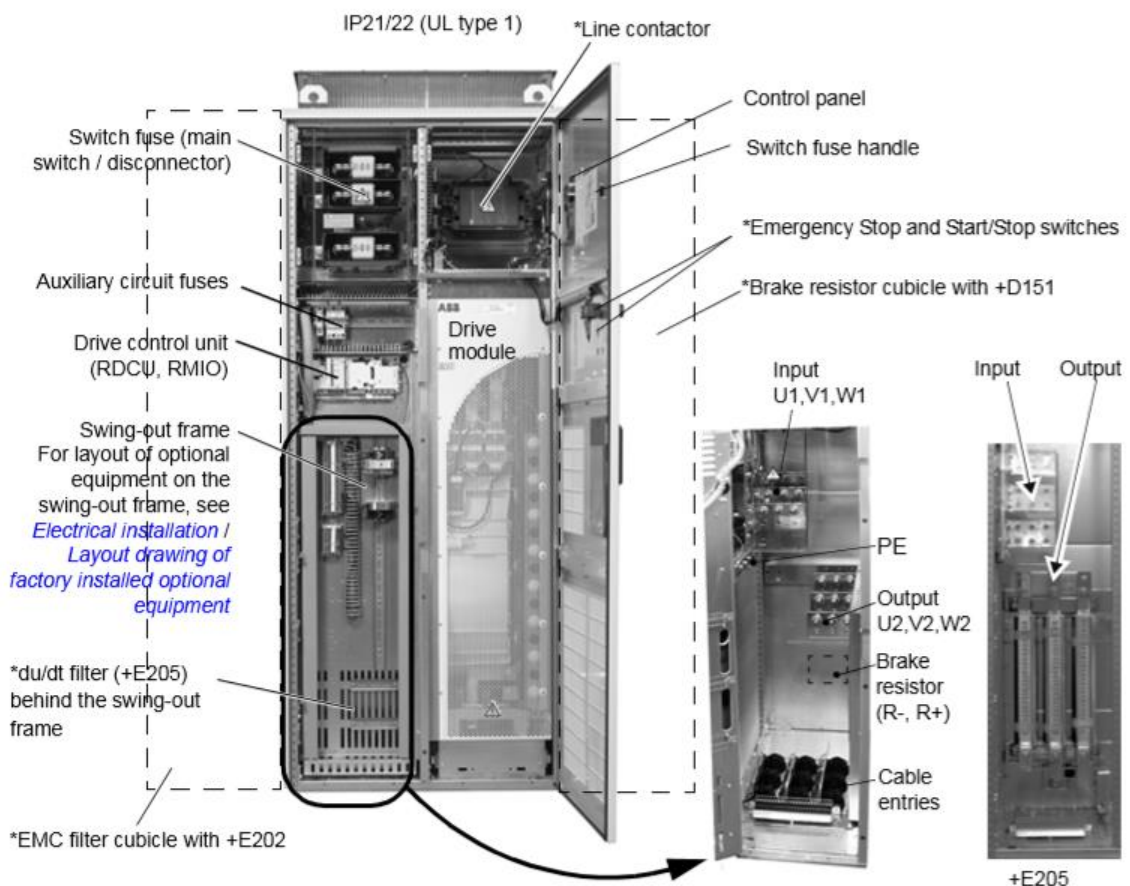


Рисунок 3.3 – Загальний вид частотного перетворювача ABB ACS800-07-05 (Drive module – модуль керування електроприводом, Drive control unit RDCU, RMIO – блок управління приводом, Switch fuse – запобіжники, Brake resistor – гальмівний резистор)

Даний ПЧ використовує технологію Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT), що дозволяє точно керувати швидкістю та продуктивністю електродвигуна. Регулювання $U/f=\text{const}$ забезпечує пропорційний зв'язок між напругою та частотою, які подаються на електродвигун. Зміна частоти супроводжується відповідною зміною напруги, забезпечуючи стабільну та ефективну роботу електродвигуна. Цей метод контролю реалізований за допомогою техніки ШІМ (Широтно-Імпульсна Модуляція), де ширина імпульсів регулюється для зміни частоти та напруги.

Основні переваги привода ABB ACS800-07-05 з IGBT та регулюванням $U/f=\text{const}$ включають високу ефективність, широкий діапазон регулювання

швидкості та можливість роботи при різних частотах. Технологія IGBT дозволяє точно та швидко вносити зміни, забезпечуючи оптимальну продуктивність та енергоефективність в різноманітних промислових умовах. В табл. 3.1 наведено основні параметри перетворювача частоти ABB ACS800-07.

Таблиця 3.1 – Основні параметри перетворювача частоти ABB ACS800-07

Характеристика	Значення
1	2
Виробник	ABB
Тип	ПЧ АІН з ШІМ
Модель	ACS800-07
Потужність (кВт)	400
Напруга живлення (В)	380 – 500
Частота напруги живлення (Гц)	50 – 60
Діапазон регулювання частоти (Гц)	30 – 60
Стандартний закон керування	$U/f = \text{const}$
ККД (в.о.)	0,95
Перевантажувальна здатність (%)	160 (1 хвилина при розгоні); 180 (0,5 секунди в момент пуску)
Порти зв'язку	RS 485
Частота комутації (кГц)	3
Кількість дискретних входів	4
Кількість дискретних виходів	1
Кількість аналогових входів	2
Кількість аналогових виходів	1
Кількість вбудованих реле	1
Ступінь захисту IP	55
Габарити (мм)	1500x600x520
Маса (кг)	234
Вартість (у.о.)	23 000

Проведено дослідження частотного пуску асинхронного електродвигуна ABB M3KP355MLA від ПЧ типу ABB ACS800-07-05 при законі частотного керування $U/f = \text{const}$. Вхідна лінійна напруга мережі під час дослідження становила 450В. Момент навантаження на валу мав квадратичну залежність від числа обертів n . За допомогою вбудованого цифрового інтерфейсу замірювались діючі значення струму та напруги на вході двигуна, а також момент навантаження на валу двигуна.

Отримані дані експлуатації були оброблені в програмі Microsoft Excel. За допомогою базових формул були розраховані необхідні залежності.

Розрахунок фазної напруги:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \quad (3.1)$$

Розрахунок активної потужності двигуна:

$$P_1 = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.2)$$

Ефективна потужність на валу АД дорівнює:

$$P_2 = \omega \cdot M, \quad (3.3)$$

де M – момент навантаження на валу АД.

Отримавши розрахунки потужностей, було розраховано коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.4)$$

Після обробки отриманих значень та розрахунку усіх вище наведених формул були побудовані таблиця розрахунків (див. табл. 3.2) та графіки залежностей (рис. 3.4 – 3.5).

Таблиця 3.2. – Дані експлуатації та розрахунки ККД АД компресора охолодження

N, rpm	Frequency, Hz	Voltage, V	Current, A	Torque %	Torque, Nm	Power P1	w	Power P2	Efficiency
1800	30,14	225,70	285,29	50,78	532,17	115 598,09	188,40	100 261,70	0,87
2020	33,85	254,30	385,42	61,23	641,69	149 124,72	211,44	135 677,20	0,91
2025	33,93	255,90	387,80	61,85	648,19	151 231,57	211,97	137 397,00	0,91
2259	35,60	287,30	490,00	62,90	659,19	172 606,37	236,47	155 881,40	0,90
2364	37,40	296,70	513,73	72,26	757,28	230 266,51	247,39	187 344,80	0,81
2371	38,80	297,60	517,61	71,87	753,20	226 829,10	248,18	186 924,90	0,82
2390	39,20	302,60	523,80	72,63	761,16	228 639,44	250,10	190 367,50	0,83
2417	40,44	303,00	537,30	73,11	766,19	230 716,67	252,95	193 806,90	0,84
2419	41,11	303,60	547,90	73,20	767,14	226 849,50	253,22	194 254,20	0,86
2467	41,93	309,01	569,60	73,30	768,18	223 536,11	258,21	198 354,80	0,89
2583	42,87	325,30	584,36	73,40	769,23	227 570,84	270,39	207 989,10	0,91
2611	44,86	334,34	598,43	75,70	793,34	234 935,69	273,28	216 806,60	0,92
2675	45,63	345,19	652,50	78,00	817,44	251 505,05	279,98	228 869,60	0,91
2743	47,08	356,04	656,57	80,30	841,54	262 617,17	287,10	241 607,80	0,92
2798	47,98	366,89	660,64	82,60	865,65	278 583,96	292,86	253 511,40	0,91
2867	48,62	377,74	664,71	84,90	889,75	293 725,19	300,08	266 996,20	0,91
2911	49,30	388,59	668,78	87,20	913,86	309 375,44	304,68	278 437,90	0,90
3046	51,46	399,44	672,85	89,50	937,96	332 721,02	318,81	299 035,40	0,90
3226	53,75	410,29	674,60	91,80	962,06	381 259,68	337,65	324 845,40	0,85
3439	55,97	421,14	683,90	94,10	986,17	412 755,70	359,95	354 969,90	0,86
3505	57,20	431,99	686,20	96,40	1 010,27	421 164,77	366,86	370 625,00	0,88
3551	58,20	442,84	667,40	98,70	1 034,38	436 872,61	371,67	384 447,90	0,88

Залежність активної потужності P1 від швидкості n

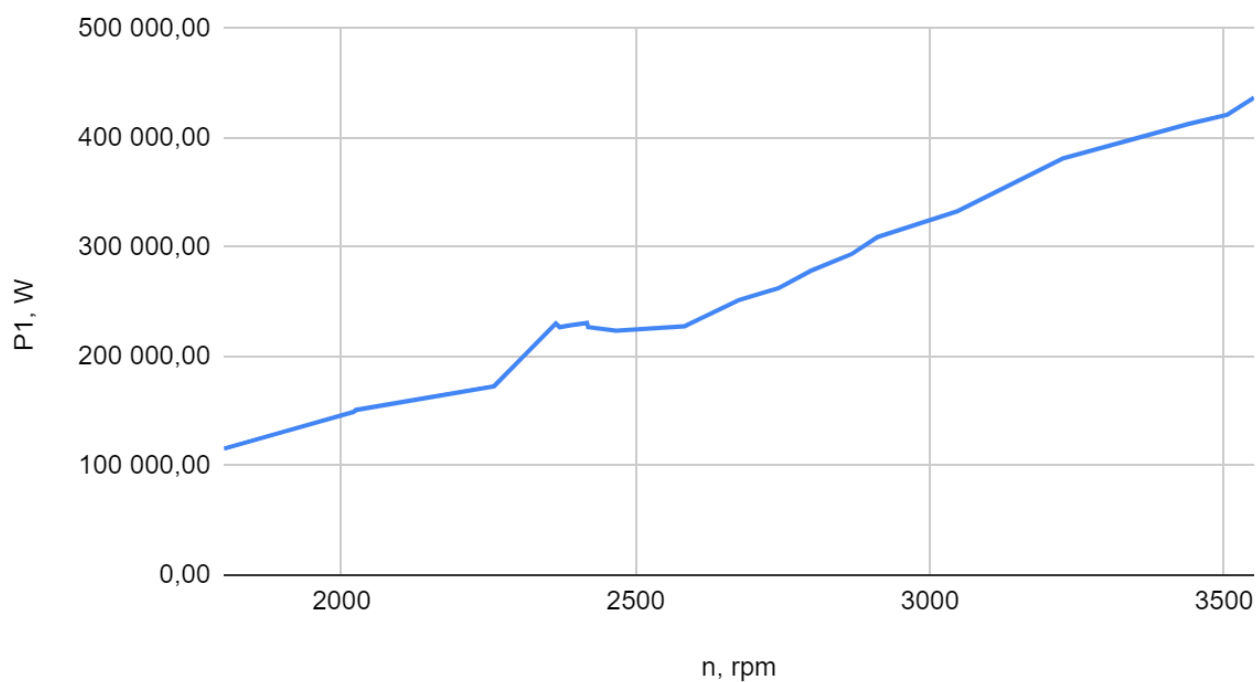


Рисунок 3.4 – Графік залежності активної потужності P1 від швидкості на валу

Залежність ефективної потужності P2 від швидкості n

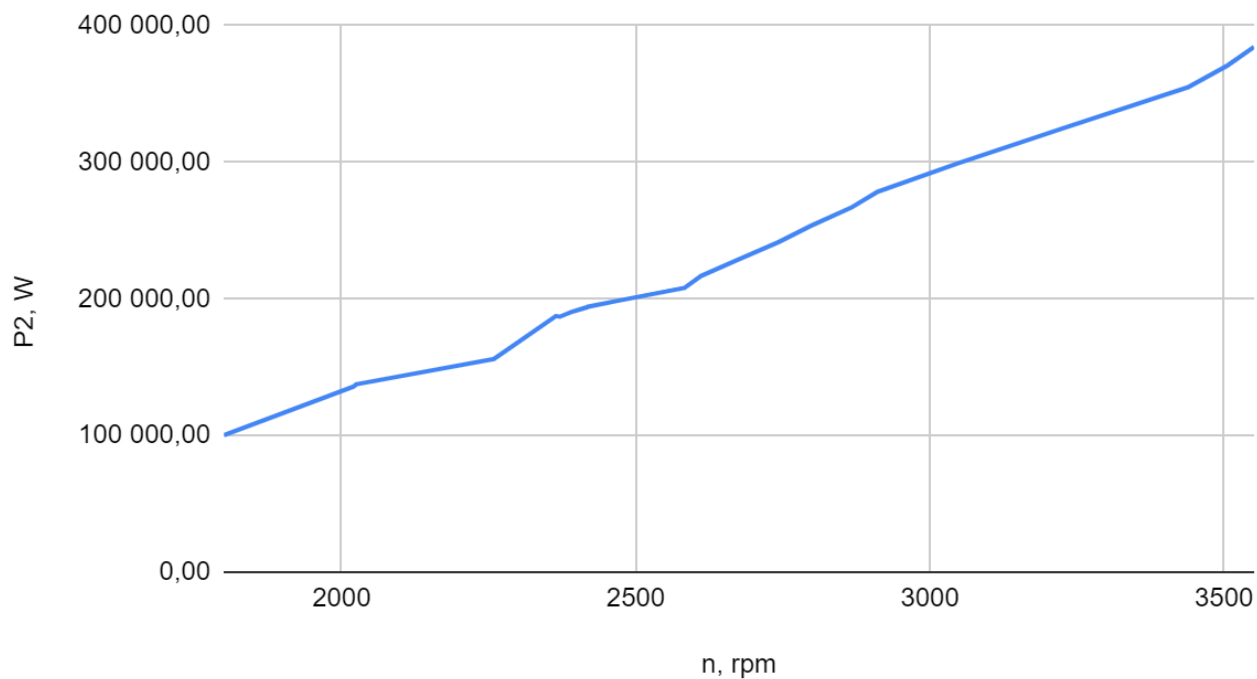


Рисунок 3.5 – Графік залежності ефективної потужності P2 від швидкості на валу

Залежність струму I_1 від швидкості n

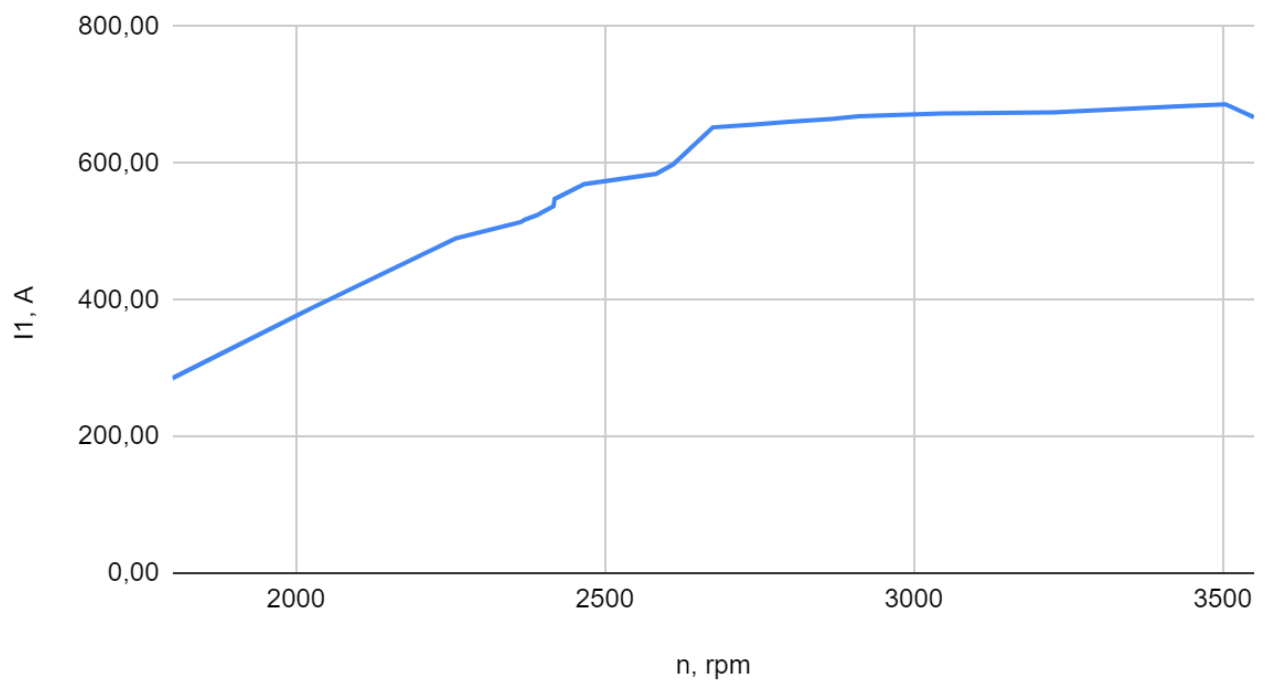


Рисунок 3.6 – Графік залежності струму I_1 від швидкості n на валу

Залежність ККД від швидкості n

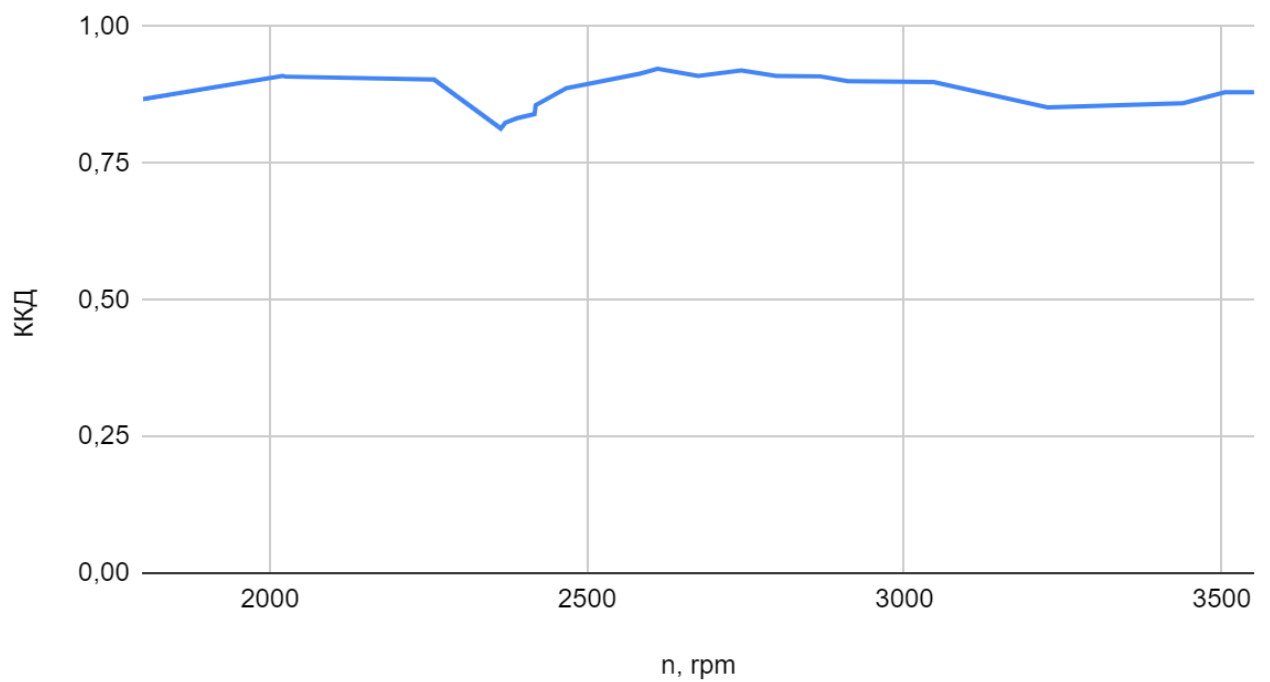


Рисунок 3.7 – Графік залежності потужності від обертів АД

Для побудови комп'ютерної моделі бракує даних виробника суднового електродвигуна фірми ABB, тому для більш детальної інформації було обрано серійний двигун вітчизняного виробництва серії 4А.

Електродвигуни серії 4А з коротко-замкнутим ротором змінного струму в більшості випадків цілком задовольняють усім вимогам, які ставляться до електроприводів компресорів. Серія 4А покриває діапазон номінальних потужностей від 0,06 до 400 кВт з висотою осі обертання від 50 до 355 мм. Прийнятий ряд потужностей двигунів відповідає ГОСТ 13267-73, габаритні розміри АД регламентовані ГОСТ 18709-73 [15]. Дана серія двигунів має основне виконання, ряд модифікацій та спеціалізовані конструкції. Двигуни основного виконання відповідають загальним вимогам й призначені для нормальних умов експлуатації (двигуни загального призначення). Вони випускаються в широкому діапазоні потужностей й висот осі обертання.

Каталоги містять всі необхідні дані для вибору електродвигуна. В них вказуються типорозмір двигуна, номінальна потужність, частота обертання, струм статора, ККД, коефіцієнт потужності $\cos\phi$, кратність пускового струму, кратність пускового моменту, кратність мінімального моменту, кратність максимального моменту, динамічний момент інерції ротору, та інші дані, в тому числі і конструктивні, що необхідно для подальших розрахунків.

Згідно розрахунку потужності компресора і типу електропривода на судні, для побудови комп'ютерної моделі з каталогу обираємо асинхронний двигун типу 4А355М2У3, паспортні дані якого наведені в табл. 3.3, та проведемо адаптацію до суднової мережі. Коректність даного вибору буде підтверджена результатами моделювання.

Таблиця 3.3 – Паспортні дані асинхронного коротко-замкнутого електродвигуна типу 4A355M2У3

Тип двигуна	P _н , кВт	При номінальному навантаженні			M _{max} /M _н	M _п /M _н	M _{min} /M _н	I _п /I _н
		n _н , об/хв	η, %	cos φ				
Синхронна частота обертання 3000 об/хв								
4A355M2У3	315	2970	93	0,91	1,9	1	0,9	7

Від самого початку даний серійний двигун був розрахований на живлення від мережі зі значеннями лінійної напруги $U_{\text{л}} = 660\text{В}$ та частоти $f = 50\text{Гц}$. Проте суднова мережа має значення $U_{\text{л}} = 440\text{В}$ та $f = 60\text{Гц}$. Отже, перерахуємо такі параметри АД, як число витків обмотки статора w_1 , площа перетину ефективного провідника обмотки статора q_{ef} , діаметр ізольованого провідника статора $d_{\text{пр}}$. Використовувалися наступні формули [16]:

$$w_{1a\partial} = w_{1\delta a3} \cdot \frac{f_{\delta a3}}{f_{a\partial}} \cdot \frac{U_{\phi.a\partial}}{U_{\phi.\delta a3}} \quad (3.5)$$

де $w_{1a\partial}$ - число витків обмотки статора адаптованої моделі АД; $w_{1\delta a3}$ - число витків обмотки статора базової моделі АД; $f_{\delta a3}$ - частота живлячої напруги мережі, на яку розрахована базова модель АД; $f_{a\partial}$ - частота живлячої напруги мережі, на яку розрахована адаптована модель АД; $U_{\phi.a\partial}$ - живляча напруга мережі, на яку розрахована адаптована модель АД; $U_{\phi.\delta a3}$ - живляча напруга мережі, на яку розрахована базова модель АД.

$$q_{\text{ef}.a\partial} = q_{\text{ef}.\delta a3} \cdot \frac{f_{a\partial}}{f_{\delta a3}} \cdot \frac{U_{\phi.\delta a3}}{U_{\phi.a\partial}} \quad (3.6)$$

де $q_{ef.ad}$ - площа перетину ефективного провідника обмотки статора адаптованої моделі АД; $q_{ef.баз}$ - площа перетину ефективного провідника обмотки статора базової моделі АД.

Оскільки число елементарних провідників в нашому випадку дорівнює одиниці, то формула для діаметру ізольованого провідника статора адаптованого АД буде мати вигляд:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{ef.ad}}{\pi}} \quad (3.7)$$

Підставивши дані, взяті з паспорту двигуна:

$$w_{1ad} = 28 \cdot \frac{50}{60} \cdot \frac{254}{380} = 16$$
$$q_{ef.ad} = 44.1 \cdot \frac{60}{50} \cdot \frac{380}{254} = 79.1 \text{ (мм}^2\text{)}$$
$$79.1/6=13.18$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 13.18}{3.14}} = 4,096 \text{ (мм)}$$

Використаємо отримані результати розрахунків для розробки моделі адаптованого під параметри суднової електричної мережі живлення АД.

Комплексна комп'ютерна модель включає в себе моделі розрахованого навантаження, перетворювача частоти, приводного електродвигуна. Розглянемо розробку складових елементів комплексної моделі більш детально.

Для початку створюємо новий дослід в програмі DIMAS Drive, як зображено на рис. 3.6.

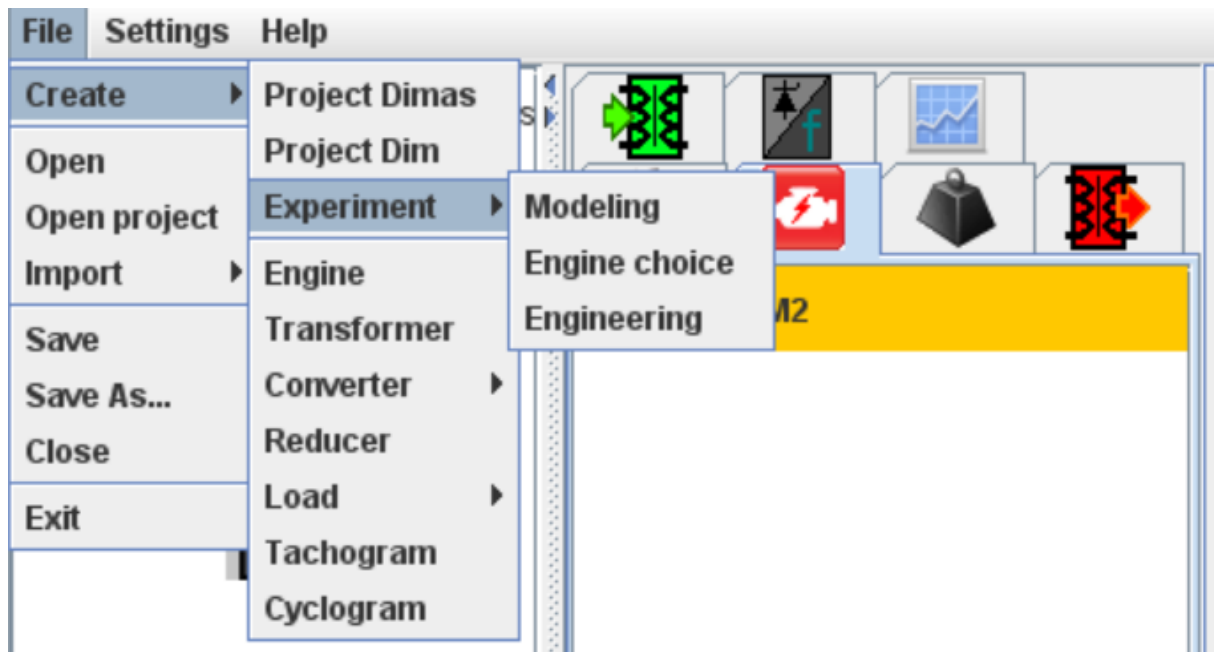


Рисунок 3.6 – Загальний вид робочого поля «Створення дослідів» програми DIMAS Drive

Використовуючи паспортні дані серійного електродвигуна 4A355M2Y3, у базу даних двигунів програмного комплексу DIMAS Drive були занесені вхідні дані заданого двигуна, що представлено на рисунках 3.7 – 3.10.

Power, kW (for serial rated)	315	Number of stator slots	48
Phase voltage, V (for serial nominal)	254	Number of rotor slots	38
Slip, pu (for serial nominal)	0.02	Number of turns of stator winding	16
Number of poles	2	Sectional area of the effective conductor of the stator winding, mm ²	79.1
Frequency of supply voltage, Hz (for serial nominal)	60	Number of parallel stator winding branches	2
Degree of protection IP	44	Relative shortening of winding pitch	0.583
Insulation class	F(155°C)	Height (Diameter) of insulated conductor	4.098
Base Material	Steel	The number of elementary conductors in one effective	6
Height of rotation axis	355	Wiring diagram of stator winding	Star

Рисунок 3.7 – Загальний вид робочого вікна «Номінальні дані двигуна» програми DIMAS Drive

Outer diameter of the stator, mm	590	Coefficient of filling the core with steel	0.9
Internal diameter of the stator, mm	310	Width of short-circuited rotor ring, mm	45
Air gap size, mm	1.5	Height of short-circuited rotor ring, mm	50
Internal rotor diameter, mm	130	Stator groove shape symptom	1.5
Length of the stator core, mm	360	Bevel of stator grooves, mm	0
Length of the front end of the stator, mm	500	Double-sided enclosure bus bar	1.8
☒ There are ventilation ducts			
Width of radial vent stator channels	0	Number of axial and ventilation stator channels	0
The number of radial ventilation for the stator and rotor channels	0	Width of radial ventilation channels in the rotor, mm	0
Diameter of axial ventilation stator channels, mm	0	Diameter of axial ventilation channels in the rotor, mm	20
Number of axial ventilation stator channels in a row	0	Number of rows of axial and ventilation channels in the rotor	1
		Number of axial vent channels of the rotor in the row	12

Рисунок 3.8 – Загальний вид робочого вікна «Геометрія» програми DIMAS Drive

f Coefficient
☐ Stator slot geom
☒ Rotor slot geom
 Additional initial data

Nominal data
 Geometry

Height of the stator groove (H1), mm	49.9
Height of the wedge of the stator groove (GKL), mm	3
Slot width of the stator groove (MS), mm	6.7
Width of the stator groove (GP), mm	11.7
Slot groove height (HS), mm	1.1

Рисунок 3.9 – Загальний вид робочого вікна «Геометрія паза статора» програми DIMAS Drive

Coefficient		Stator slot geom		Rotor slot geom		Additional initial data	
Nominal data				Geometry			
Closed and half-closed slot							
D0				10.4			
Diameter of the first circle of the rotor groove (D1), mm				10.4			
Diameter of the second circle of the rotor groove (D2), mm				7.5			
Distance from the rotor surface to the center of the first circle (A0), mm				2.5			
A1				0			
Distance between centers of circles (A2), mm				18.05			
GR				10.4			
Slot width of rotor groove (MR), mm				0			
Jumper height above the groove (HF), mm				0.5			
☐ Choose		☒ Choose		☐ Choose		☐ Choose	
Type of rotor winding: Cast							

Рисунок 3.10 – Загальний вид робочого вікна «Геометрія паза ротора» програми DIMAS Drive

В даному випадку використовується природнє охолодження АД. Пази статора асинхронного двигуна виконуються різної форми в залежності від величини машини, типу обмотки і способу її кріплення в пазах. У робочому вікні «Геометрія паза статора» зображені найбільш часто застосовані варіанти типів пазів. Загалом вони характеризуються такими параметрами, як висота та ширина паза статора, висота клину паза статора, висота та ширина шліцу паза статора.

Виходячи з методичних вказівок [17], був обраний другий варіант форми паза ротора. Тип обмотки ротора був обраний литий.

Тестування заданого двигуна полягало у зіставленні параметрів, взятих з практики експлуатації, з параметрами, розрахованими за допомогою програми. Для цього у DIMAS Drive було створено дослід зі стандартними параметрами мережі та номінальним навантаженням (номінальним моментом на валу).

Розрахунок навантаження електроприводу представлений в другій частині дипломного проекту. Оскільки середнє значення моменту на валу компресора гвинтового типу має квадратичну залежність від швидкості, то був обраний вентиляторний тип навантаження для необхідного діапазону регулювання швидкості обертання валу приводного електродвигуна 2000 – 3580 об/хв. Відповідно при налаштуваннях ПЧ буде використовуватися стандартний закон частотного керування $U/f = \text{const}$ для діапазону регулювання частоти 30 – 60 Гц. На основі розрахунків і вимог технологічного процесу в програмі DIMAS Drive була створена модель навантаження, що представлено на рисунку 3.11.

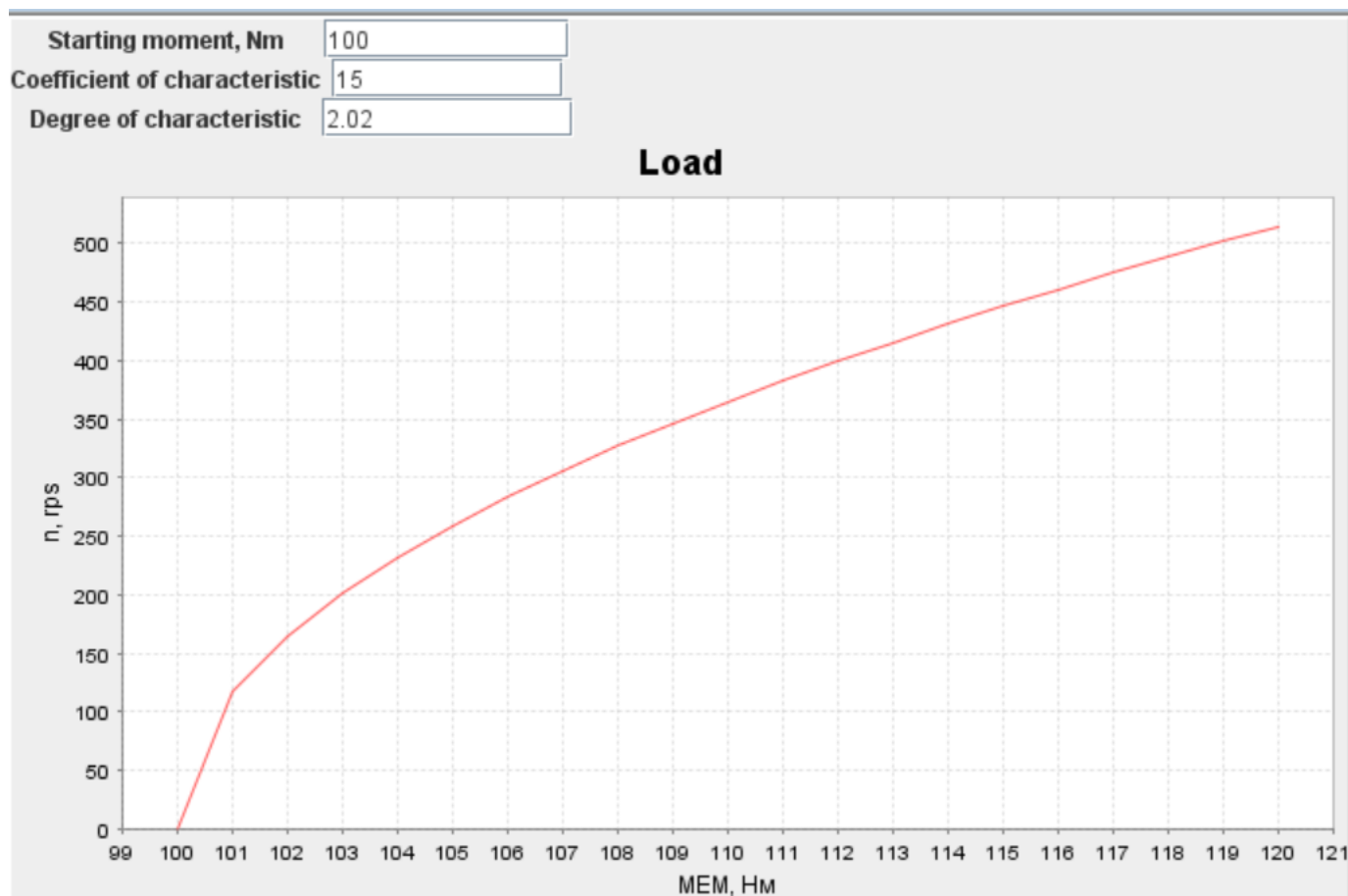


Рисунок 3.11 – Загальний вид робочого вікна «Вентиляторна характеристика» програми DIMAS Drive IM5

В якості перетворювача частоти в програмі обрано ПЧ з широтно-імпульсною модуляцією. Використовуючи дані з каталогу заводу-виробника [13], в програмі DIMAS Drive була створена модель даного перетворювача частоти, що представлено на рисунку 3.12.

SFC with AVI, pulse-width modulation			
Rated power, kW	400	Efficiency	0.95
Max. output voltage, V	254	Switching frequency, kHz	12
Nominal output frequency, Hz	60	The speed of frequency change, Hz/s	100
Frequencies changing range From 30 To 60		Control law ☒ $U/f = \text{const}$ ☐ $\Phi = \text{const}$ ☐ $U/\sqrt{f} = \text{const}$ ☐ $E_r/f = \text{const}$ ☐ $U/f^2 = \text{const}$ ☐ $I_s/f_r = \text{const}$ ☐ $U = \text{const}, f = \text{var}$ ☐ $I_s/\sqrt{f_r} = \text{const}$ ☐ $E_s/f = \text{const}$ ☐ $I_s/f_r^2 = \text{const}$ ☐ 1 ☐ 3 ☐ $I = \text{const}, f = \text{var}$ ☐ 2 ☐ 4	
Rectifier circuit factor	1	Booster voltage, V 0	
Coefficient of inverter circuit	1		
Coefficient of link DC-current	1		
Вид обратной связи ☒ Open ☐ Voltage feedback			
The number of graphs	9	Price c.u.	23 000
The coefficient of frequency change		Weight, kg	234
The initial value	0.6	Height, mm	1 500
The value of the increment	0.05	Width, mm	600
		Depth, mm	520

Рисунок 3.12 – Загальний вид робочого вікна «Дані ППЧ» програми DIMAS Drive

Поеднуючи розглянуті вище моделі з необхідними даними асинхронного двигуна, навантаження та перетворювача частоти, була створена та досліджена комплексна комп'ютерна модель електроприводу, що представлено на рис. 3.13.

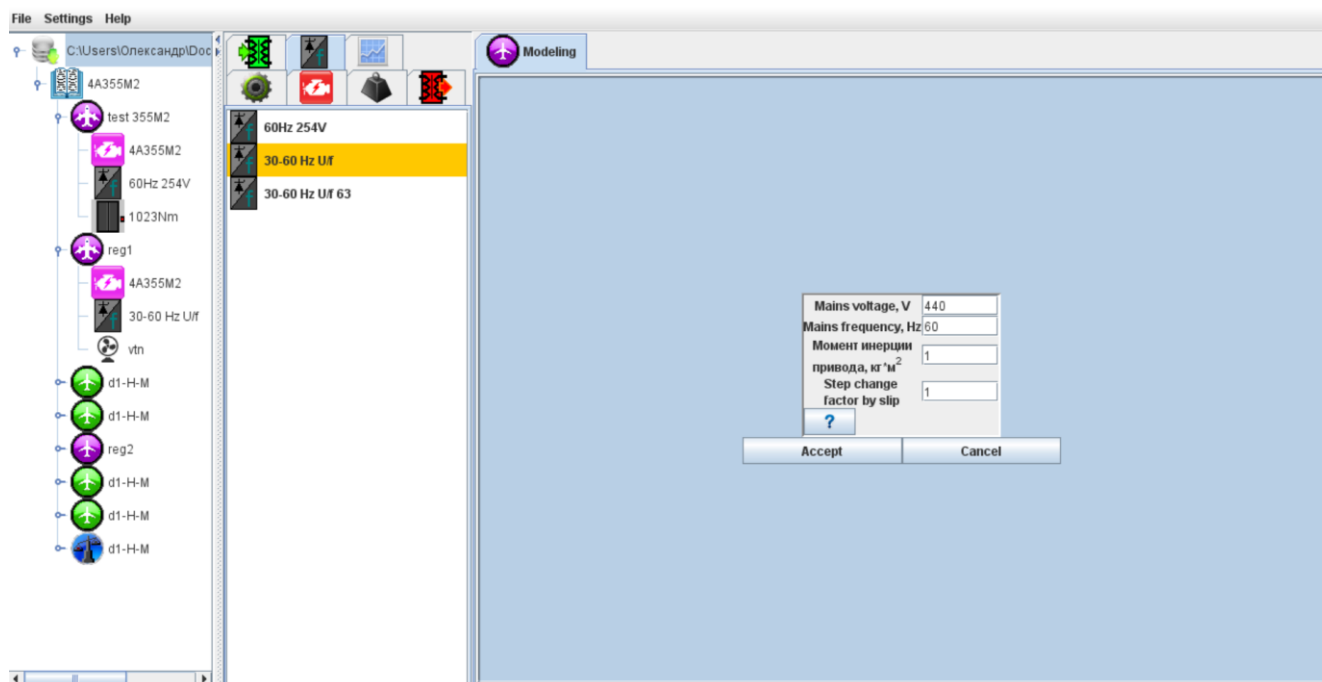


Рисунок 3.13 – Загальний вид робочого поля «Створення дослідів» програми DIMAS Drive

В результаті програмування було отримано сімейство механічних характеристик електропривода на рисунку 3.14.

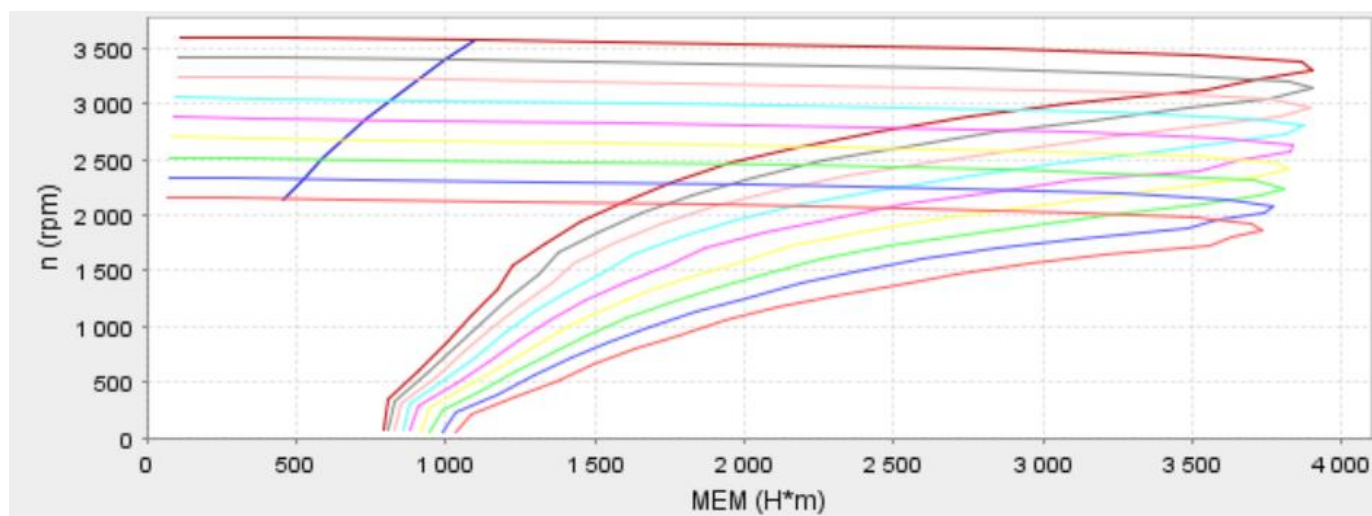


Рисунок 3.14 – Механічні характеристики моделі електроприводу базового дослідів

На рис. 3.14 представлені характеристики для діапазону зміни частоти живлячої напруги від 30 до 60 Гц та діапазону зміни швидкості обертання валу АД від 2000 об/хв до 3600 об/хв.

Для випадку роботи електроприводу під навантаженням в результаті комп'ютерного моделювання були отримані залежності від обертів наступних величин: струм (I') електропривода, ефективна потужність (P_2) на валу АД, та ККД роботи електропривода, що представлено на рис. 3.15 – 3.17.

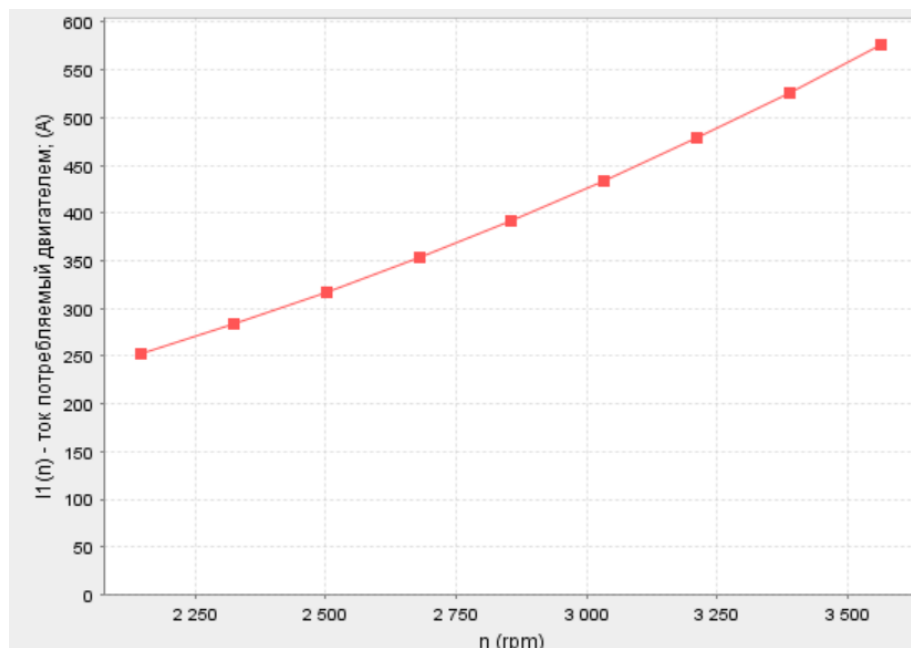


Рисунок 3.15 – Характеристика споживаного струму АД (моделювання)

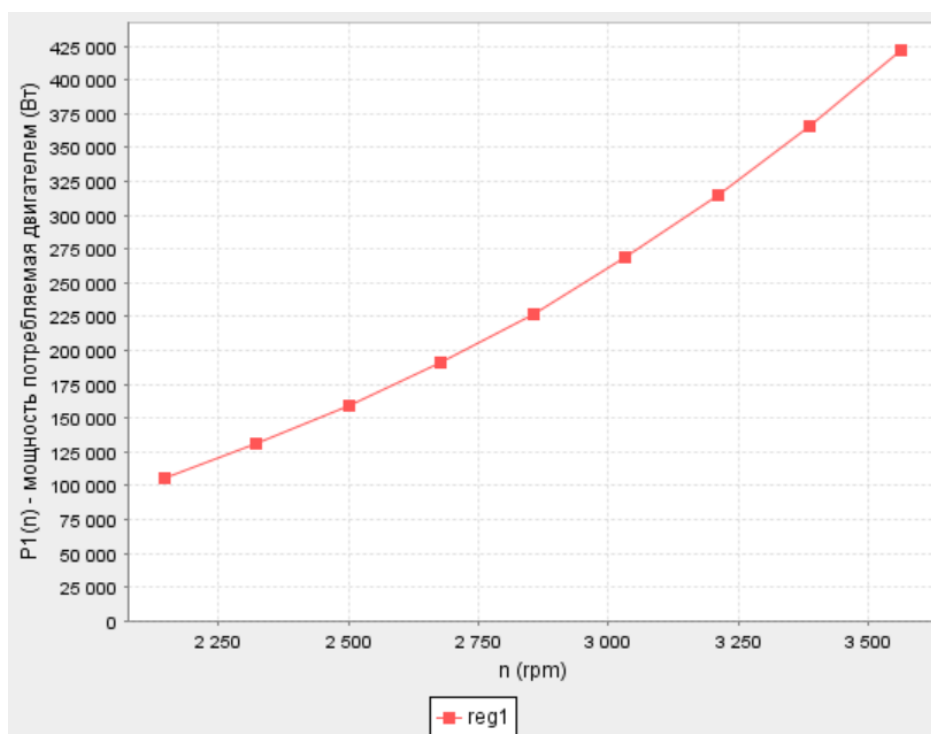


Рисунок 3.16 – Характеристика активної потужності АД (моделювання)

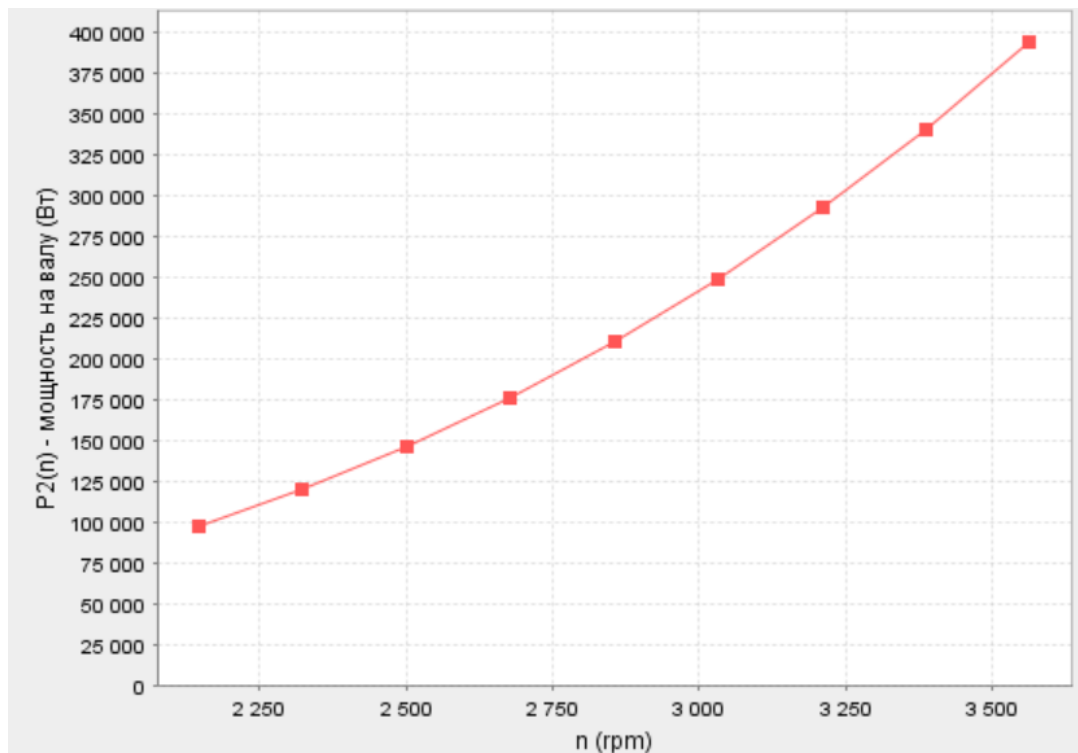


Рисунок 3.16 – Характеристика ефективної потужності АД (моделювання)

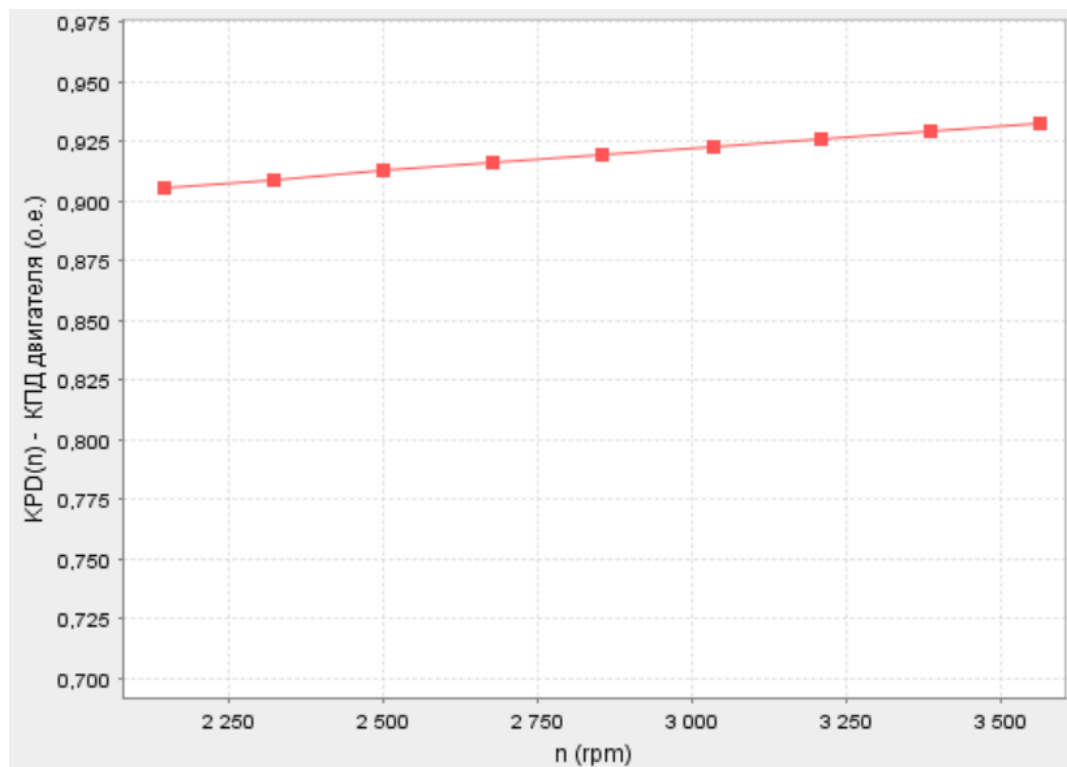


Рисунок 3.17 – Характеристика ККД АД (моделювання)

Проаналізувавши результати роботи моделі, можна сказати, що в цілому закономірності характеристик при моделюванні та експлуатації співпадають. Значення швидкості обертання валу АД практично ідентичні. Деякі розбіжності можна спостерігати для струму та створюваного на валу АД моменту асинхронного електродвигуна.

Серед основних причин наявності виявлених розбіжностей слід виділити наступні:

- недосконалість математичної моделі та неврахування всіх складових енергетичних втрат;
- наявність похибки вимірювання параметрів при експлуатації електродвигуна в режимі реального часу.

Проте, можна зробити висновок про прийнятність результатів роботи програми DIMAS Drive та про можливість подальшого її використання для дослідження та оптимізації електромеханічних систем і процесів.

РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

В даній частині описана оптимізація роботи регульованого електроприводу компресора системи охолодження етилену, створення моделі якого розглянуто в попередній частині дипломного проекту.

Оптимізація роботи електроприводу - це комплекс заходів і налаштувань, спрямованих на підвищення його продуктивності, ефективності та надійності при мінімальних витратах енергії. Цей процес включає в себе різноманітні аспекти, як:

- налаштування параметрів електродвигуна для оптимальної продуктивності;
- налаштування частотного перетворювача для регулювання швидкості обертання електродвигуна;
- планування та регулювання режимів роботи для максимального використання електроенергії;
- впровадження інноваційних технологій для поліпшення ефективності.

Програма Dimas Drive дозволяє використовувати два методи оптимізації роботи частотно-регульованого електропривода – метод генетичної оптимізації та метод Нелдера-Міда. В даній роботі був застосований останній метод оптимізації для налаштування параметрів системи, таких як коефіцієнти частотного приводу, наприклад критерій зміни магнітного потоку.

Метод Нелдера-Міда, також відомий як метод симплексу чи метод деформації, є числовим методом для оптимізації функцій без обмежень. Цей метод зазвичай використовується для пошуку мінімуму або максимуму функції, не потребуючи виводу похідних цієї функції. Основні етапи методу Нелдера-Міда включають створення симплексу (наприклад, трикутної призми) в просторі параметрів, оцінку значення функції в точках симплексу, а потім адаптацію симплексу на основі результатів оцінки. Цей процес повторюється до досягнення заздалегідь визначеного критерію зупинки або зближення до оптимального рішення.

4.1. Оптимізація за рахунок налаштувань перетворювача частоти

Оптимізація за рахунок налаштувань перетворювача частоти включає в себе регулювання параметрів цього пристрою для досягнення максимальної ефективності та найкращих характеристик електроприводу. Такий підхід дозволяє уникнути зайвих витрат енергії та забезпечити стабільну роботу обладнання.

Досягнення оптимальних значень частоти та напруги дозволяє пристосувати роботу електроприводу під конкретні умови експлуатації.

Для оптимізації за рахунок налаштувань перетворювача частоти створюємо новий дослід з різними параметрами, наприклад обираємо частоту 63 Гц (рис 4.1).

SFC with AVI, pulse-width modulation				
Rated power, kW	400	Efficiency	0.95	
Max. output voltage, V	254	Switching frequency, kHz	12	
Nominal output frequency, Hz	63	The speed of frequency change, Hz/s	100	
Frequencies changing range		Control law		
From	30	To	60	
Rectifier circuit factor	1	☒ $U/f = \text{const}$	☐ $\Phi = \text{const}$	
Coefficient of inverter circuit	1	☐ $U/\sqrt{f} = \text{const}$	☐ $E_r/f = \text{const}$	
Coefficient of link DC-current	1	☐ $U/f^2 = \text{const}$	☐ $I_s/f_r = \text{const}$	
Вид обратной связи		☐ $U = \text{const}, f = \text{var}$	☐ $I_s/\sqrt{f_r} = \text{const}$	
		☐ $E_s/f = \text{const}$	☐ $I_s/f_r^2 = \text{const}$	
		☐ 1 ☐ 3	☐ $I = \text{const}, f = \text{var}$	
		☐ 2 ☐ 4		
		Booster voltage, V		0
Вид обратной связи				
☒ Open				
☐ Voltage feedback				
The number of graphs	10	Price c.u.	23 000	
The coefficient of frequency change		Weight, kg	234	
The initial value	0.55	Height, mm	1 500	
The value of the increment	0.05	Width, mm	600	
		Depth, mm	520	

Рисунок 4.1 – Вікно налаштування ПЧ, зміна частоти 63Гц

Далі розраховуємо та порівнюємо характеристики базового (reg1) та оптимізованого (reg2) електроприводу, які зображено на рис. 4.2 – 4.5.

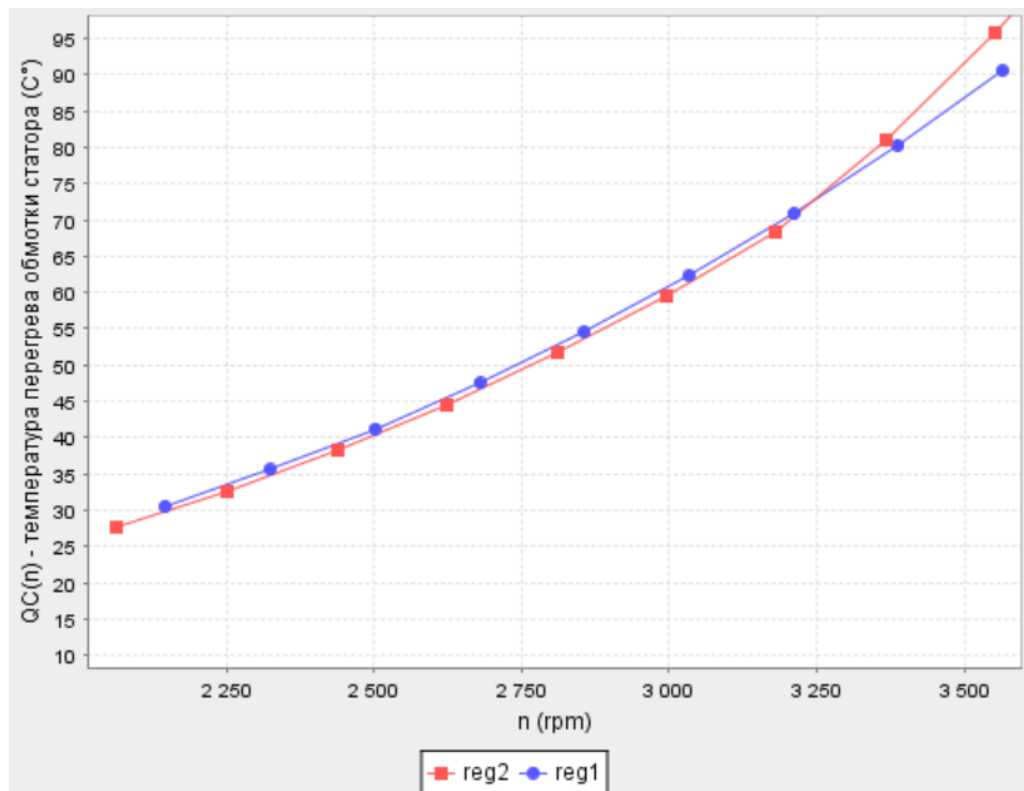


Рисунок 4.2 – Температура нагріву обмотки статора АД: reg1 – адаптований серійний АД, reg2 – оптимізований АД

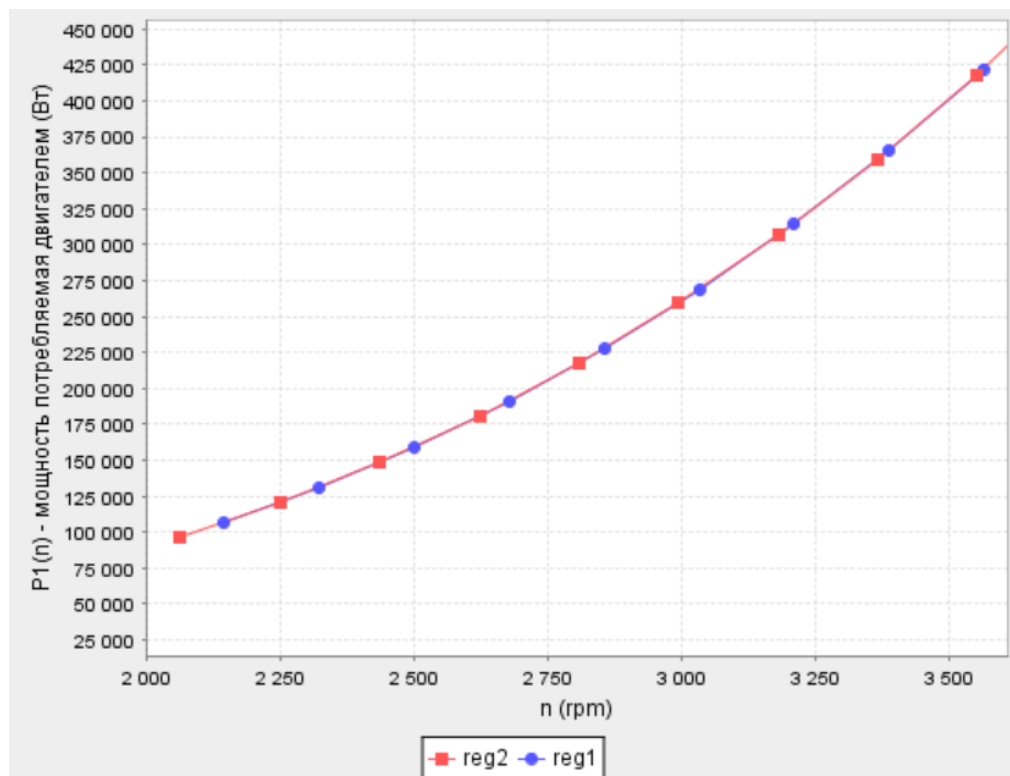


Рисунок 4.3 – Активна потужність АД: reg1 – адаптований серійний АД, reg2 – оптимізований АД

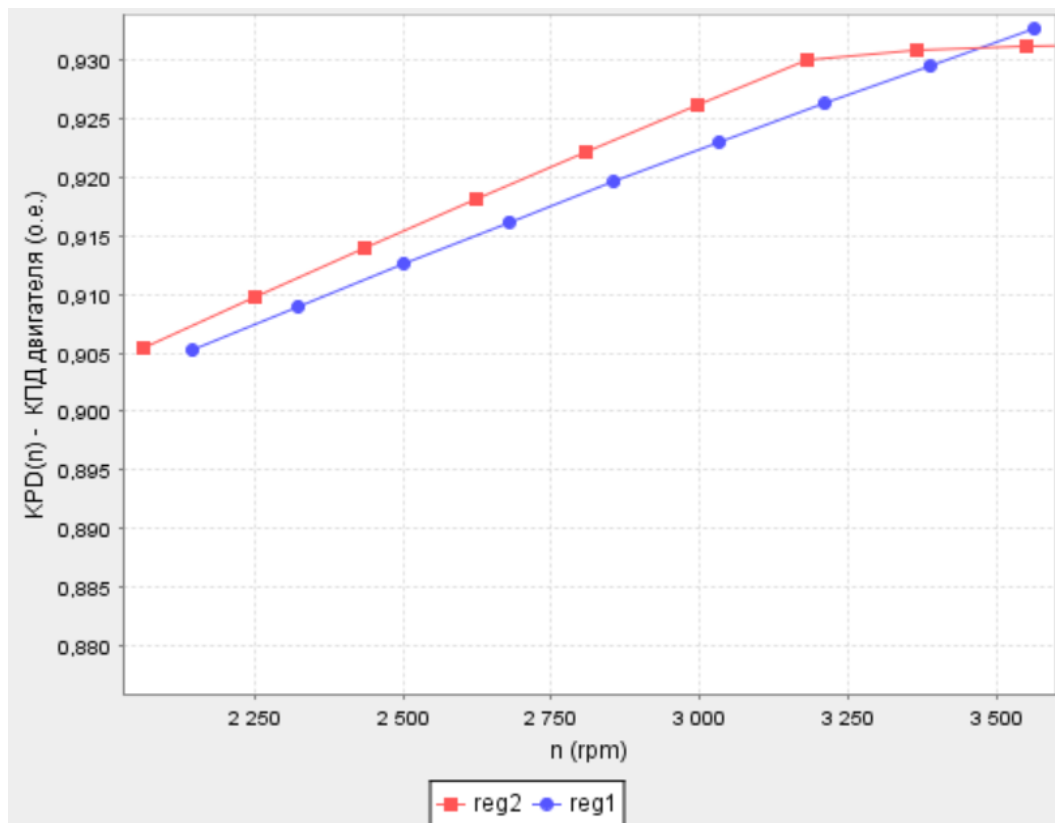


Рисунок 4.4 – Коефіцієнт корисної дії АД: reg1 – адаптований серійний АД, reg2 – оптимізований АД

Як видно з результатів програмних розрахунків, при незмінній потужності на валу електропривода, покращуються показники нагріву обмотки статора при обертах 2000 – 3250 об/хв, що дозволяє використовувати даний двигун при середньому діапазоні роботи в критичніших кліматичних умовах та призводить до поліпшення загальної ефективності та довговічності системи.

Зменшення температури обмотки дозволяє зменшити втрати енергії від опору матеріалу обмотки. Чим нижча температура, тим менше енергії витрачається на нагрів, і тим більше енергії може бути використано для виконання корисної роботи, що й покращує коефіцієнт корисної дії (рис. 4.5).

Високі температури можуть призводити до втрати ізоляції та погіршення довговічності ізоляційних матеріалів, що використовуються в обмотці статора. Зменшення температури сприяє підвищенню надійності та тривалості служби електродвигуна.

4.2. Оптимізація за рахунок вдосконалення електродвигуна

Вдосконалення електродвигуна є важливим етапом в оптимізації роботи електроприводу. Нижче подано кілька напрямків і підходів для оптимізації за рахунок вдосконалення електродвигуна:

- Застосування новітніх матеріалів у виготовленні обмоток для зниження втрат та підвищення ККД;
- Використання оптимізованих магнітних конструкцій для забезпечення максимального потоку та мінімізації магнітних втрат;
- Впровадження ефективних систем охолодження для запобігання перегріву та забезпечення стабільної роботи;
- Створення програмного забезпечення для діагностики та моніторингу стану електродвигуна;
- Застосування математичних моделей для оптимізації робочих параметрів електродвигуна.

Впровадження цих заходів дозволяє покращити технічні характеристики електродвигуна, підвищити його ККД та знизити втрати енергії. В електроприводі одним з головних критеріїв підвищення ефективності роботи є поліпшення ККД та зниження енергетичних витрат. Параметрична оптимізація електродвигуна включає в себе визначення і оптимізацію конкретних параметрів електродвигуна для покращення його характеристик та ефективності. Оптимізація може враховувати різні аспекти роботи електродвигуна, такі як продуктивність, енергоефективність, теплові втрати, стабільність роботи та інші параметри, що визначають його ефективність та надійність. Деякі параметри, які можуть бути оптимізовані в електродвигуні, включають:

- Геометричні параметри. Діаметр ротора та статора, довжина зазору, кількість витків обмотки і інші параметри конструкції;
- Магнітні Параметри. Магнітна провідність матеріалів, магнітні втрати, магнітна індукція та інші характеристики;

- Механічні Параметри. Зменшення механічних втрат, врахування впливу маси та інерції ротора, покращення механічної жорсткості та інші.
- Оптимізація системи охолодження, покращення теплового обміну, зменшення теплових втрат.

Метою оптимізації є збільшення продуктивності електродвигуна та його ефективності при мінімізації витрат енергії та теплових втрат. Така оптимізація використовується для створення ефективних, енергоефективних та економічно вигідних систем електроприводу.

Для параметричної оптимізації в програмі вибираємо на панелі інструментів створити – експеримент – проектування. У якості проектних критерії вибираємо: максимальний (100%) ККД, що зображено на рис. 4.5.

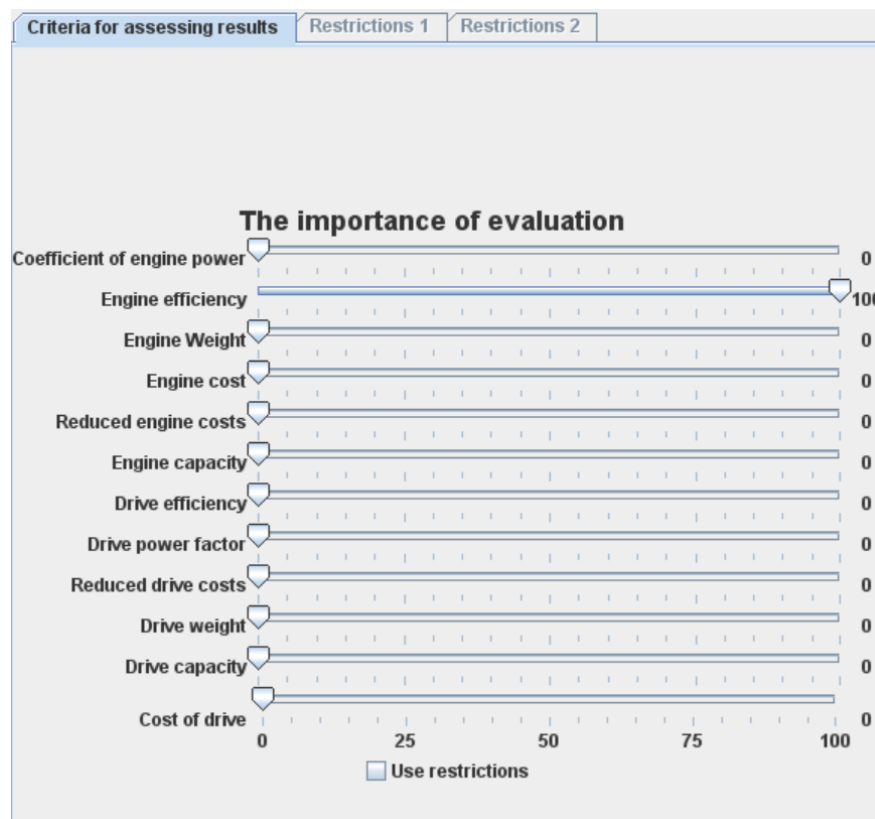


Рисунок 4.5 – Загальний вид робочого вікна «Критерії та обмеження оцінки результатів» програми DIMAS Drive

Voltage(for DIMAS) ☐ From 0 To 0	H1 ☐ From 0 To 0
Frequency(for DIMAS) ☒ From 0.8 To 1.2	GP ☐ From 0 To 0
Length ☒ From 0.8 To 1.2	D1(B2) ☐ From 0 To 0
Air gap ☒ From 0.7 To 1.3	D2 ☐ From 0 To 0
Outer diameter of stator ☐ From 0 To 0	A2(H2) ☐ From 0 To 0
Internal diameter of stator ☐ From 0 To 0	Gear ratio ☐ From 0 To 0
Rotor internal diameter ☐ From 0 To 0	Coefficient of transformation (input) ☐ From 0 To 0
Coefficient of change of magnetic flow ☒ From 0.8 To 1	Coefficient of transformation (output)... ☐ From 0 To 0
Number of stator teeth ☐ From 0 To 0	Nom. Output frequency, Hz(for DIMAS) ☐ From 0 To 0
Number of teeth of the rotor ☐ From 0 To 0	Default

Рисунок 4.6 – Загальний вид робочого вікна «Коефіцієнти зміни параметрів проектування» програми DIMAS Drive

В якості змінних були обрані номінальні частота та напруга, повітряний зазор, коефіцієнт зміни магнітного потоку, число зубців статора та ротору.

Для розрахунку параметрів електродвигуна обираємо метод оптимізації Нелдера-Міда (рис. 4.7).

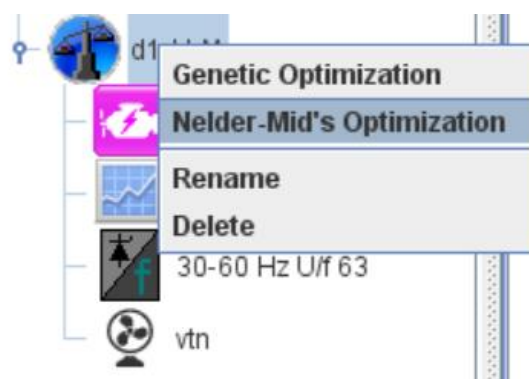


Рис. 4.7 – Вибір оптимізації Нелдера-Міда

Після розрахунку параметрів оптимізації у вікні відображення двигунів з'являються оптимізовані моделі АД з новими конструктивними параметрами.

В табл. 4.1 наведені значення проектних критеріїв за якими виконувалась оптимізація і конструктивних змін, отриманих в результаті адаптування та оптимізації. Вони порівнюються зі значеннями базового варіанту серійного АД.

Таблиця 4.1 – Проектні критерії та конструктивні зміни

Двигун Показники	Серійний	Адаптований	Оптимізований
ККД (%)	89	91	92
Довжина статора (мм)	360	360	402.2
f (Гц)	50	60	50.4
U_{ϕ} (В)	380	254	254
w_1	28	16	19
q_{ef} (мм ²)	44,1	79,1	67,9
d (мм)	3,06	4,1	4,26
Повітряний зазор (мм)	1,5	1,5	1,6
Число пазів статора	48	48	48
Число пазів ротора	38	38	38

В табл. 4.1 наведені зміни конструктивних параметрів, які впливають на подальшу роботу електродвигуна. Довжиною статора можна вважати не суттєвими, оскільки обмежень по розташуванні електродвигуна в приміщенні немає.

Як видно з таблиці, після оптимізації отримано зміни різних параметрів асинхронного електродвигуна, такі як повітряний зазор, число витків обмотки статора, площа перетину провідника обмотки статора та діаметр ізолюваного провідника обмотки статора. Збільшення повітряного зазору може призвести до збільшення втрат енергії та зменшення коефіцієнта потужності. Збільшення числа витків може покращити ефективність і знизити споживання електроенергії. Однак це також може збільшити витрати на матеріали та збільшити вагу обмотки.

Після розрахунків було отримано характеристики регулювання для базового та оптимізованого двигунів. На рисунках 4.8 – 4.11 представлені графіки залежностей від швидкості обертання валу АД температури нагріву обмоток статора, струму, активної потужності та ККД серійного базового та оптимізованого варіантів моделей електродвигунів.

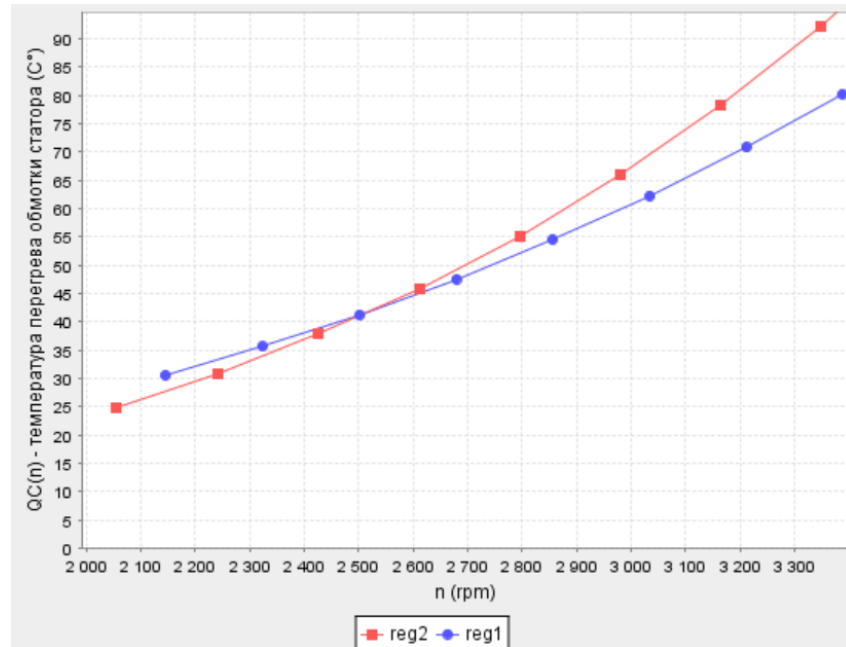


Рисунок 4.8 – Характеристика нагріву обмотки статора АД: reg1 – адаптований серійний АД, reg2 – оптимізований АД

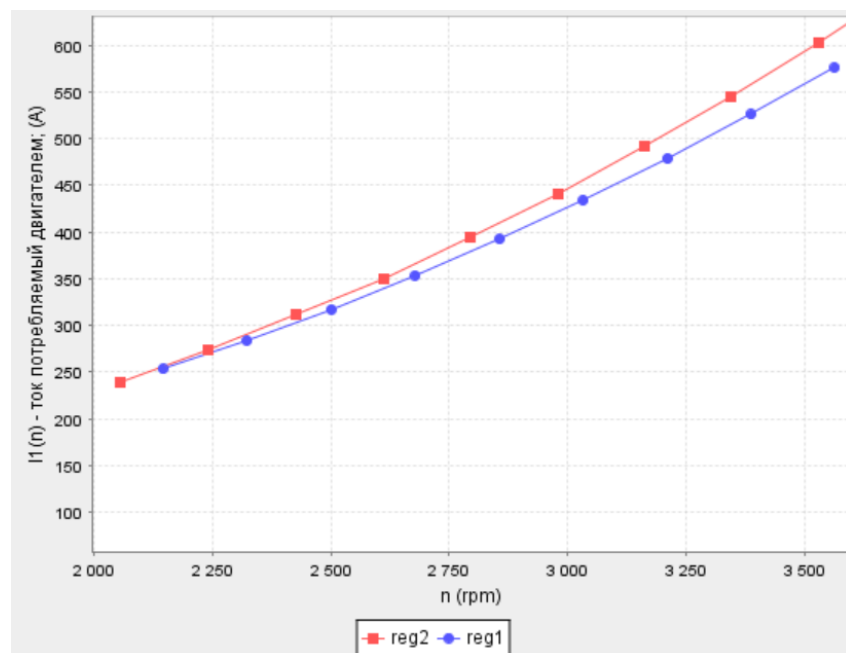


Рисунок 4.9 – Характеристика струму АД: reg1 – адаптований серійний АД, reg2 – оптимізований АД

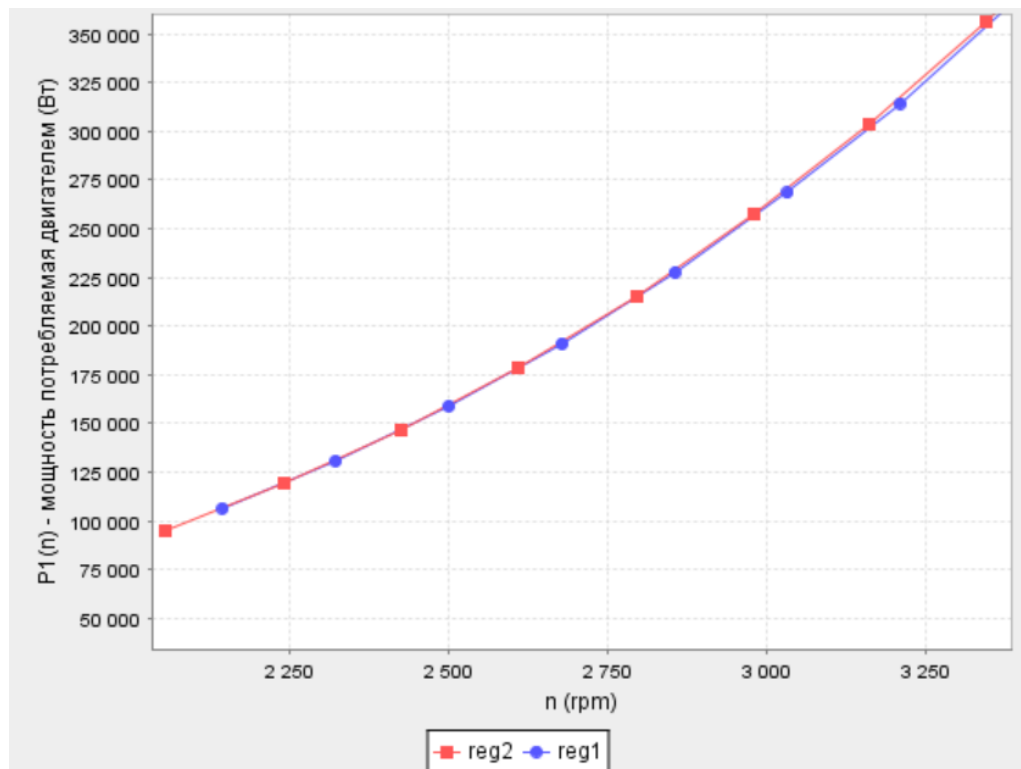


Рисунок 4.10 – Характеристика потужності АД: reg1 – адаптований серійний АД, reg2 – оптимізований АД

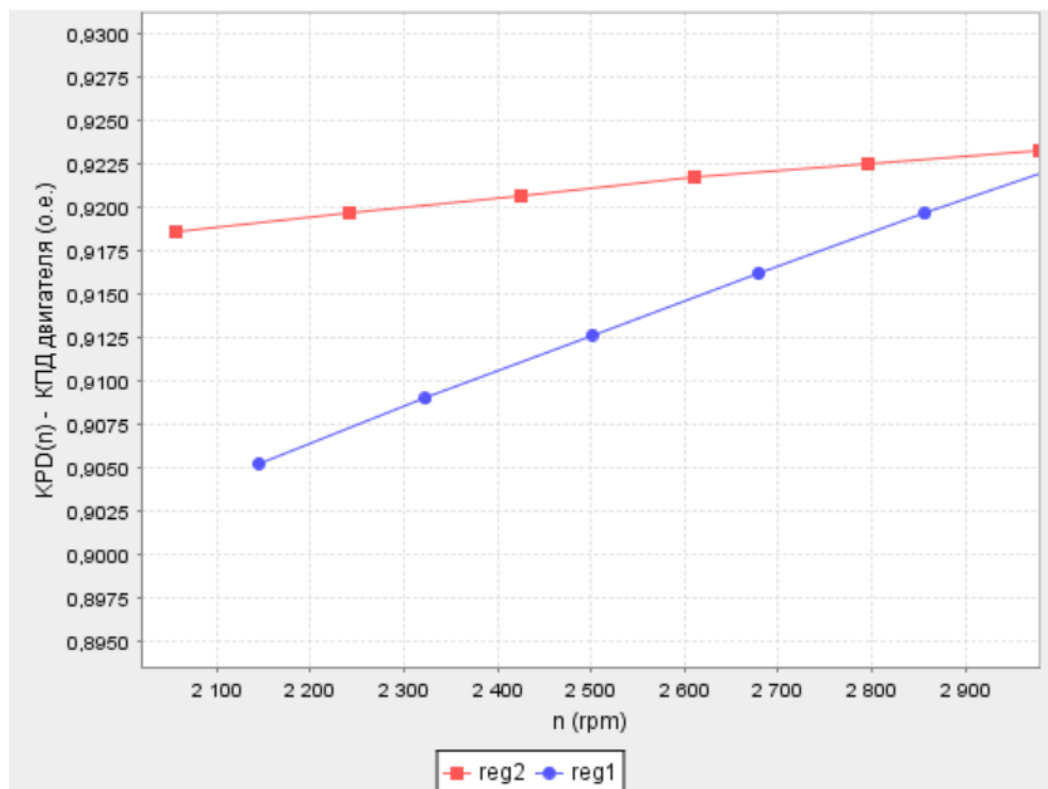


Рисунок 4.11 – Характеристика ККД АД: reg1 – адаптований серійний АД, reg2 – оптимізований АД

В результаті оптимізації вдалося підвищити ККД приводного електродвигуна на один відсоток зі значення 91% для серійного базового АД до значення 92% для оптимізованого АД. Слід зазначити, що в даній частині йде мова про середньо діапазонний ККД електродвигуна, тобто в сталому режимі роботи при швидкості обертання валу 2400 об/хв.

Для такого режиму роботи покращено теплові характеристики – зменшено температуру нагріву обмотки статора. Покращення в ефективності та теплових характеристиках електродвигуна має важливе значення для ряду застосувань. Зокрема, зменшення температури нагріву обмотки статора може призвести до підвищення тривалості служби електродвигуна, а також покращити його надійність в різних умовах експлуатації.

Отримані результати також вказують на важливість інноваційних методів оптимізації для досягнення високих показників продуктивності. Інженерне вдосконалення, спрямоване на оптимізацію параметрів електродвигуна, може служити моделлю для інших систем приводу, сприяючи загальному підвищенню технічного рівня морської галузі.

Далі слід провести додатковий аналіз впливу оптимізованого електродвигуна на загальну продуктивність систем, включаючи економію енергії та витрати на обслуговування. Також важливо розглянути можливість впровадження отриманих технологічних рішень у інші пристрої та обладнання, що використовують подібні приводи, для їх подальшого вдосконалення та вдосконалення стандартів суднової техніки.

РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Для дослідження динамічного режиму роботи електроприводу створимо в моделі дослід перехідних процесів та порівняємо результати базового та оптимізованого варіантів. Будуть розглядатися такі характеристики динамічного режиму, як залежності від часу струму, потужності та ККД асинхронного двигуна.

Використовуючи залежності потужностей буде розраховано для двох варіантів значення витрат електроенергії. На основі порівняння витрат електроенергії можна буде зробити висновки про доцільність виконаної в даній роботі оптимізації для робочого режиму роботи компресора охолодження зріджених газів.

Система охолодження етилену з компресором холодоагенту R507 працює при температурі навколишнього середовища до $+45^{\circ}\text{C}$ та температурою морської води до $+32^{\circ}\text{C}$. При цьому діапазон регулювання продуктивності компресора становить $810 - 1900 \text{ м}^3/\text{год}$. [18].

Було вирішено розглянути типовий режим роботи підтримання температури етилену -102°C в системі для чого в середньому підтримується швидкість обертання валу приводного АД 2400 об/хв .

Згідно з досліджень експлуатації, гвинтовий компресор системи охолодження запускається на частоті живлячої напруги 30 Гц, що відповідає швидкості обертання валу приводного АД 1800 об/хв . Він працює на даній швидкості декілька секунд, далі поступово швидкість обертання збільшується від 2200 об/хв до 2600 об/хв , так як збільшується необхідна подача холодоагенту для конденсації етилену. Таке автоматичне регулювання обертів відбувається декілька хвилин, після чого оберти компресора залишаються приблизно 2400 об/хв , чого достатньо для підтримання температури в системі при нормальних умовах експлуатації та вважається довготривалим робочим режимом регулювання системи.

Використовуючи дані особливості, у програмі DIMAS Drive було створено відповідну тахограму роботи АД в декілька ступенів регулювання обертів 2000 – 2600 об/хв протягом декількох хвилин та вихід на робочий режим роботи зі швидкістю обертання валу асинхронного двигуна 2400 об/хв . Загальний вид робочого вікна «Створення тахограми» представлено на рис. 5.1.

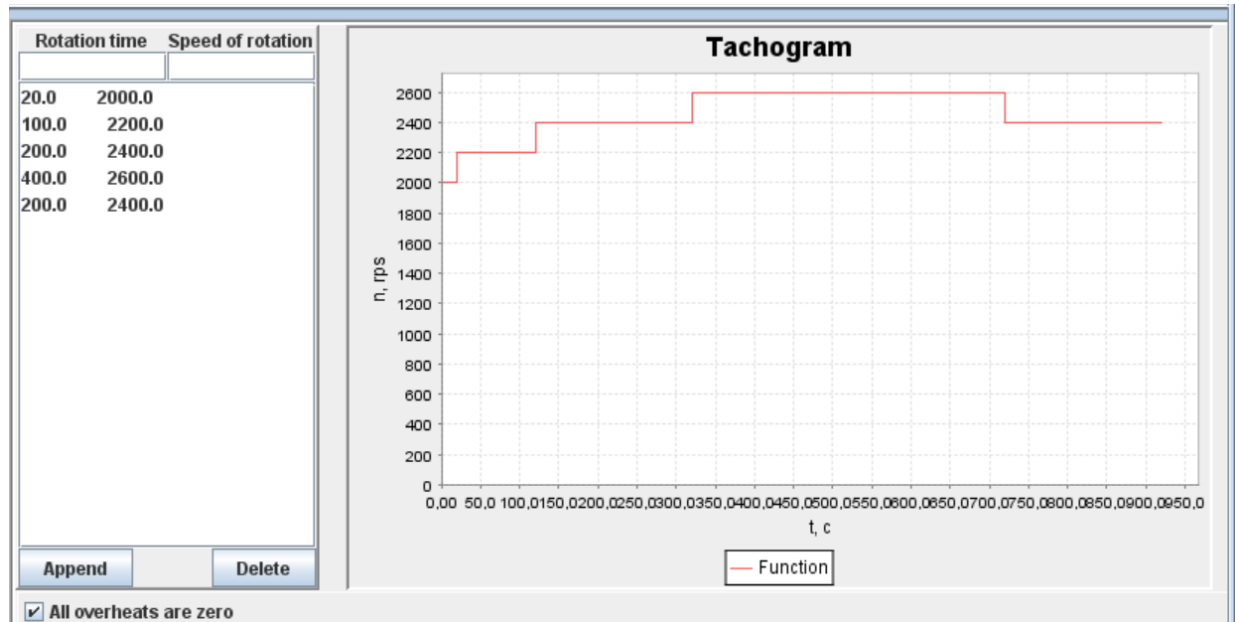


Рисунок 5.1 – Загальний вид робочого вікна «Створення тахограми» програми DIMAS Drive

Використовуючи представлену вище тахограму було створено дослід перехідних процесів. Досліджувалась робота базової моделі та оптимізованого варіанту моделі АД.

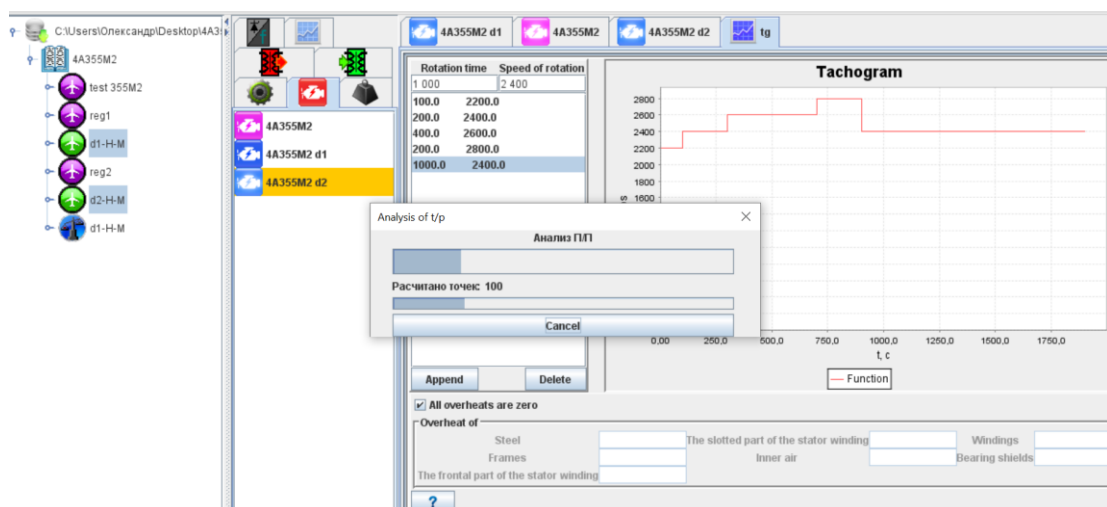


Рисунок 5.2 – Загальний вид вікна створення дослідів та розрахунку динамічних режимів електродвигуна в програмі DIMAS Drive

В результаті були отримані характеристики перехідних процесів потужності P_1 , ККД та струму АД для відповідних моделей, які представлені на рис. 5.3 – 5.7.

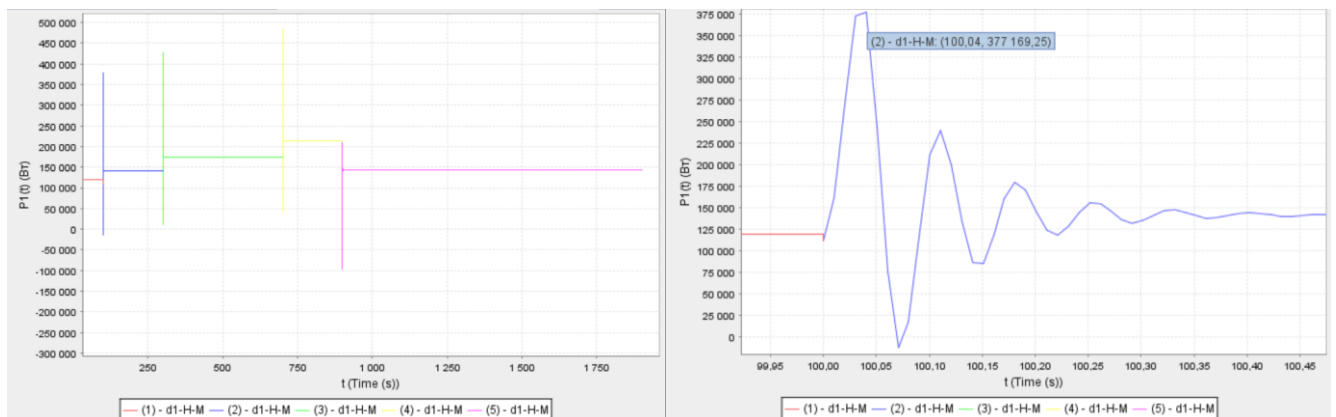


Рисунок 5.3 – Характеристика динамічного режиму потужності АД Р1 базової моделі двигуна (адаптований серійний)

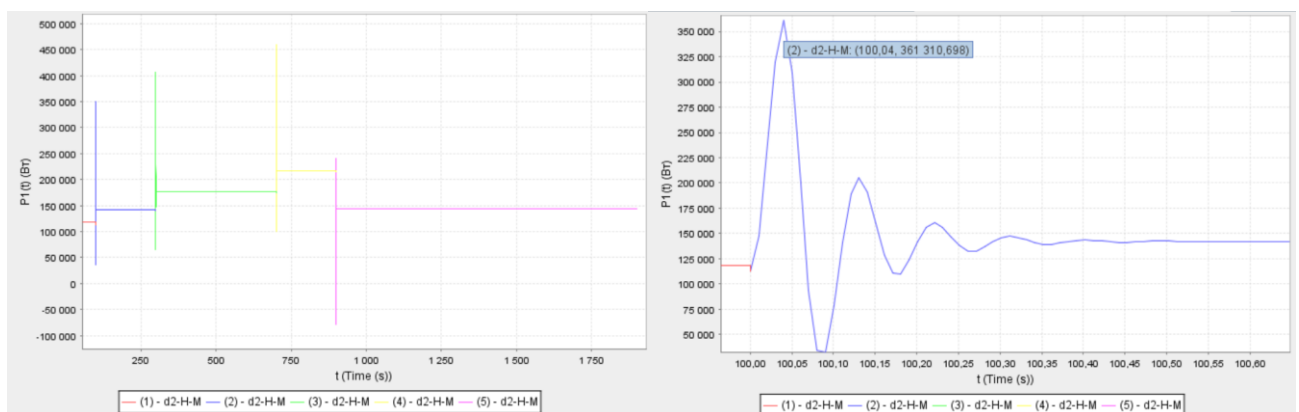


Рисунок 5.4 – Характеристика динамічного режиму потужності АД Р1 оптимізованої моделі двигуна (адаптований серійний)

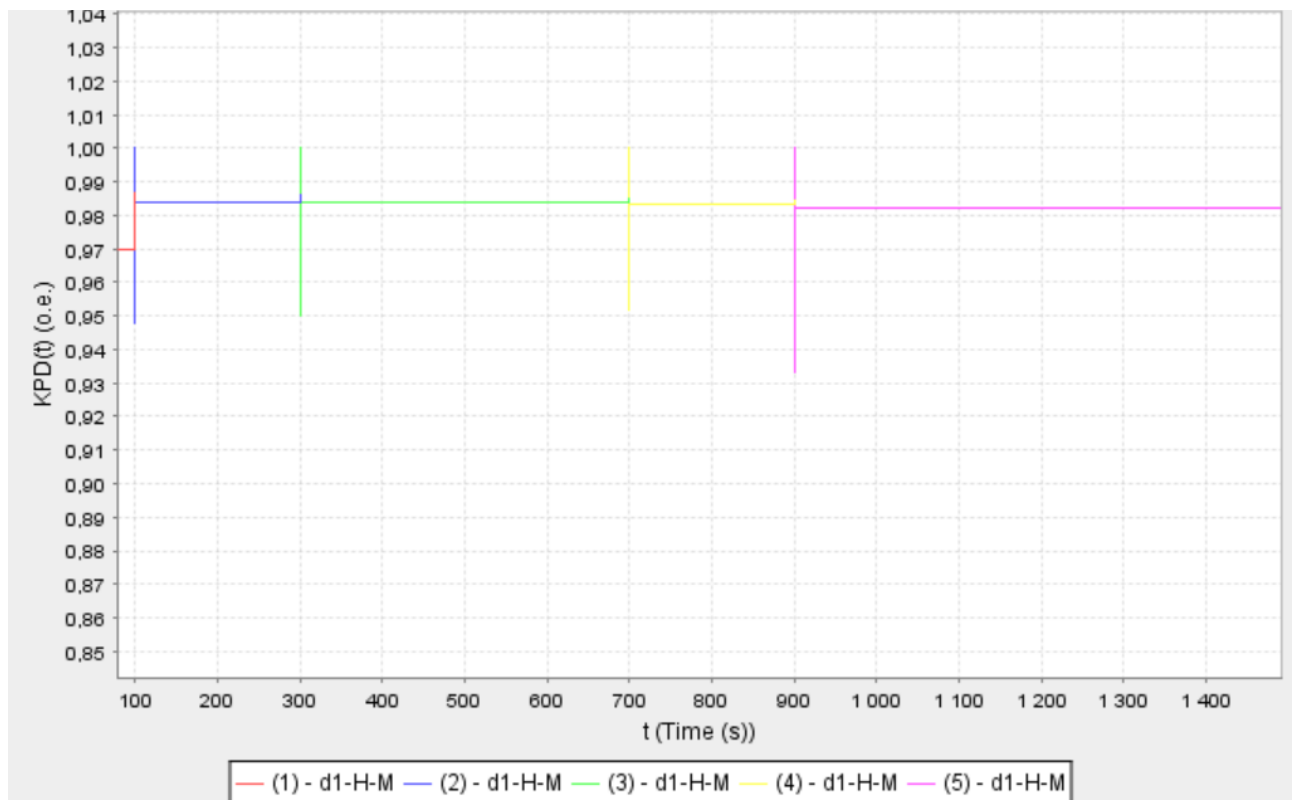


Рисунок 5.5 – Перехідна характеристика ККД базової моделі двигуна (адаптований серійний)

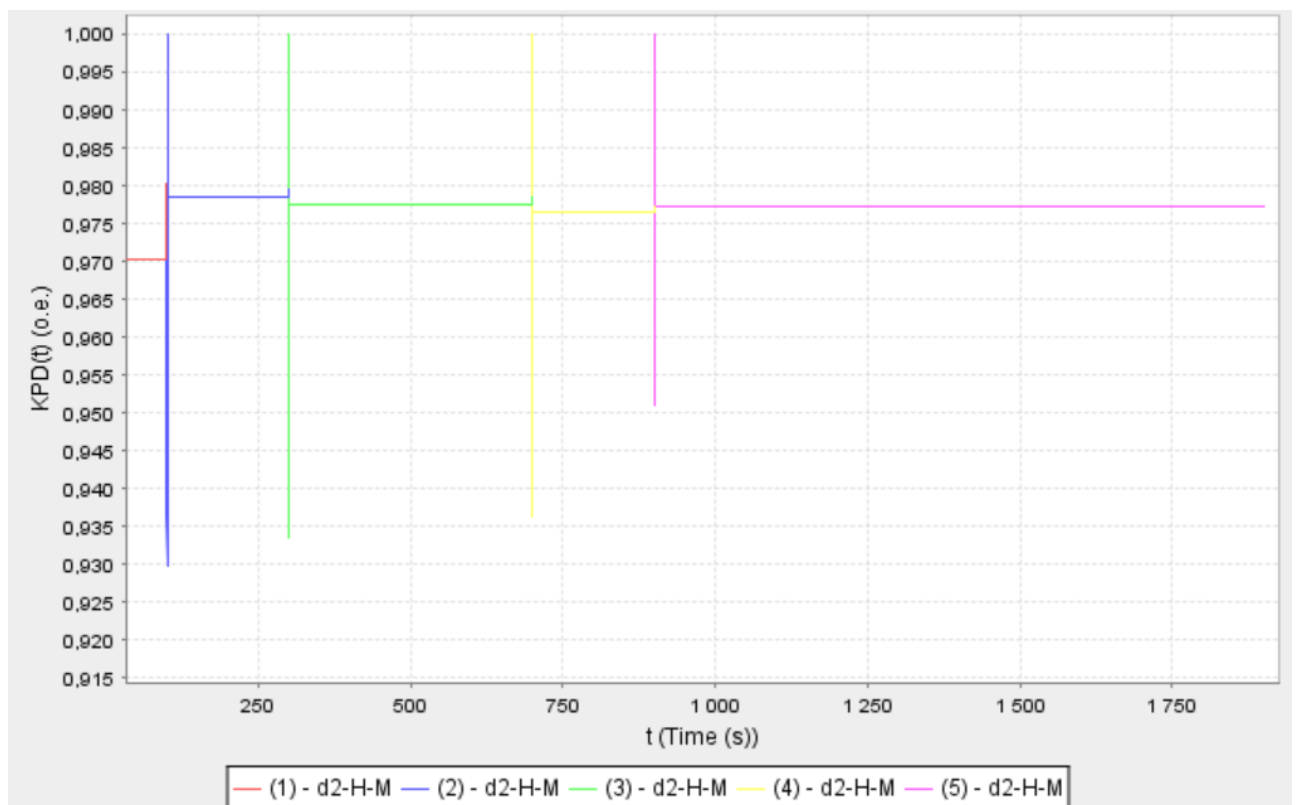


Рисунок 5.6 – Перехідна характеристика ККД оптимізованого двигуна

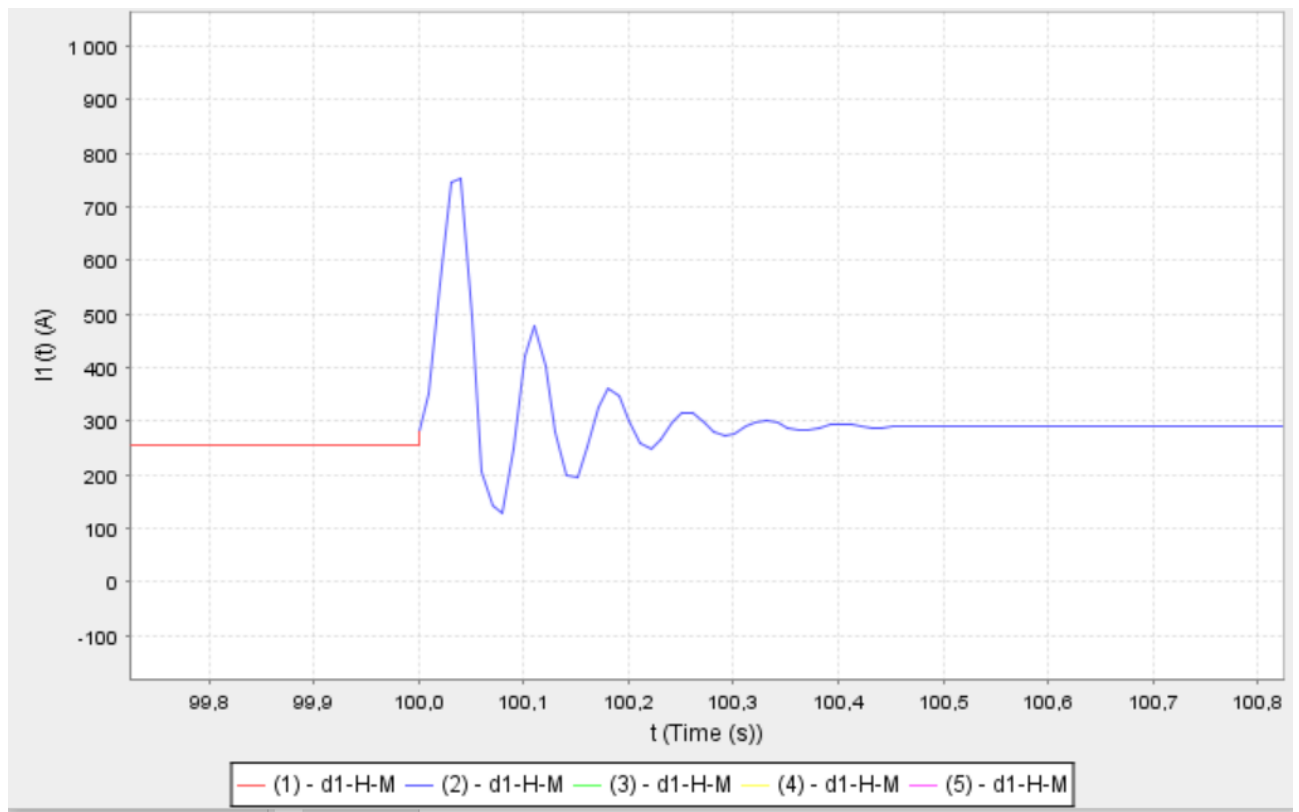


Рисунок 5.6 – Перехідна характеристика струму базової моделі двигуна (адаптований серійний)

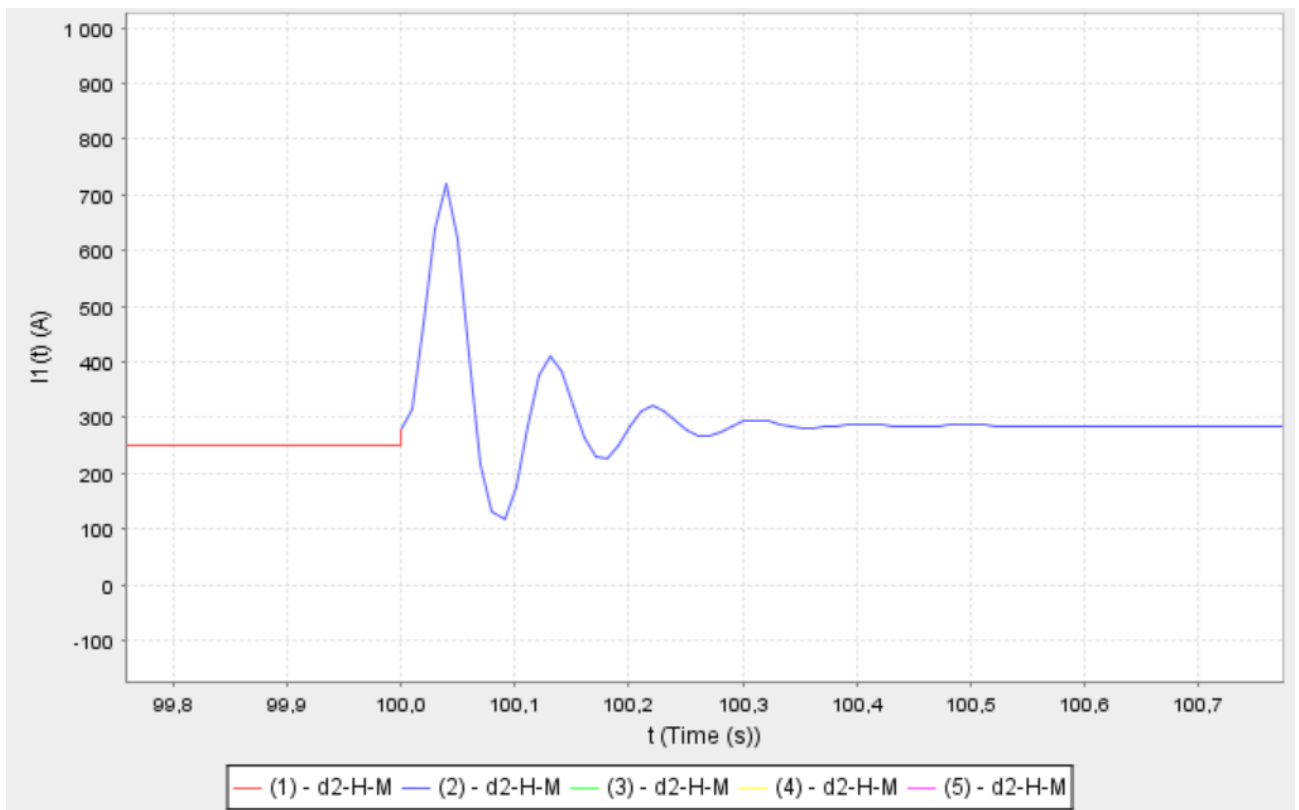


Рисунок 5.7 – Перехідна характеристика струму оптимізованого двигуна

Як видно з графіків, в результаті оптимізації вдалося значно знизити витрати енергії (активної потужності), особливо в момент пуску АД, зменшити пусковий струм та покращити ККД.

Для розрахунку витрат енергії необхідно відмітити на графіку моменти часу (100, 300, 700 та 900 секунди) з найбільшими величинами активної потужності. На основі отриманих залежностей, розрахуємо витрати потужності, використовуючи наступну формулу:

$$P_{cn} = \frac{P_{100} + P_{300} + P_{700} + P_{900}}{4} \quad (5.1)$$

Де: P_n - значення активної потужності в n -й момент часу.

Підставивши отримані в результаті моделювання дані, отримаємо для базової моделі:

$$P_{cn_баз} = \frac{377169 + 426800 + 483300 + 210900}{4} = 374542 \text{ Вт с}$$

Для оптимізованого варіанту:

$$P_{cn_опт} = \frac{361310 + 413400 + 468900 + 236200}{4} = 369952 \text{ Вт с}$$

В результаті можна сказати, що пускові витрати потужності оптимізованого варіанту на 1,23% нижчі, ніж у базового.

ВИСНОВКИ

Під час виконання дипломної роботи магістра на тему «Дослідження та оптимізація роботи суднового частотно-регульованого електропривода компресора» було виконано наступне:

- згідно вимог до технологічного процесу, розраховано навантаження електроприводу гвинтового компресора системи охолодження зріджених газів. В результаті було отримано значення навантаження $1148 \text{ Н} \cdot \text{м}$, вентиляторного типу. Встановлено діапазон регулювання продуктивності компресора $810 - 1900 \text{ м}^3/\text{год}$, що відповідає діапазону швидкостей обертання валу приводного електродвигуна $1800 - 3600 \text{ об/хв}$;
- згідно даних експлуатації підтверджено коректність результатів роботи програмного продукту, що використовувався. Зроблено висновок, що в цілому закономірності зміни значень характеристик при експлуатації та моделюванні співпадають;
- підібрано серійний асинхронний двигун та розраховано параметри адаптації його до суднової електричної мережі;
- в програмі DIMAS Drive розроблено та протестована модель вибраного серійного АД;
- розроблено комплексну комп'ютерну модель електроприводу компресора, що розглядається. Виконано оптимізацію за критерієм ККД. В результаті вдалося підвищити ККД на 1% зі значення 91% для серійного базового АД до значення 92% для оптимізованого АД. Більшість параметрів залишились незмінними, але отримано зміни деяких параметрів асинхронного електродвигуна, такі як повітряний зазор, число витків обмотки статора, площа перетину провідника обмотки статора та діаметр ізольованого провідника обмотки статора ;
- досліджено перехідні процеси роботи електроприводу з серійним та оптимізованим АД. Пускові витрати енергії оптимізованого варіанту на $1,23\%$ нижчі, ніж у базового.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Agnieszka Wieczorek, Mariusz Giernalczyk. Operational problems of ethylene transport by LPG Gas Carriers. Journal of KONES Powertrain and Transport. 2019. Vol. 26. [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
https://www.researchgate.net/publication/336810351_Operational_Problems_of_Ethylene_Transport_by_LPG_Gas_Carriers
2. Wartsila encyclopedia of Marine and Energy Technology. [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
<https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/lpg-reliquefaction-plant>
3. Правила класифікації та побудови суден для перевезення зріджених газів наливом. - Регістр судноплавства України, 2019 – 322с. [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
<https://www.shipregister.ua/wp-content/uploads/2022/09/RBCG.pdf>
4. Operation Manual for Gas Plant of LPG /Ethylene Carrier Severnav Hull No.245 – 2020.
5. Jaroslav Novak, Jiri Simanek, Radovan Dolecek. EMC of Frequency Controlled Electric Drives – 208. [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
https://www.radioeng.cz/fulltexts/2008/08_04a_101_105.pdf
6. Compound 2-stage Screw Compressor 2520**C Instruction Manual – 2201M2JE-НО-C7-N_2015.05. [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
https://mayekawa.ru/netcat_files/userfiles/2520C.pdf
7. С.В. Гулієнко, О.В. Гусарова. Холодильна техніка : навч. посіб. Електронне мережне навчальне видання. Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 148 с. [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/54673/1/Huliienko_Husarova_Kholodylna_tekhnika.pdf
8. Василега П. О. Електропривод робочих машин : підручник. Суми : Сумський державний університет, 2022. 290 с. [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
<https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/88282/3/Vasilega.pdf>
9. Михайлов А. К., Ворошилов В. П. Компресорні машини. — М.: Енергоатом, 1989. — 288 с.

10. Френкель М.І. Поршневі компресори. — М.-Л.: Машгиз, 1960. — 514 с.
11. Петрушин В.С., Рябінін С.В., Якимець А.М. Програмний продукт "DIMAS Drive". Програма аналізу роботи, вибору та проектування асинхронних коротко замкнутих двигунів систем регульованого електропривода. — Київ: Міністерство освіти і науки України, Державний департамент інтелектуальної власності, 26.03.2001— 49 с.
12. Low voltage Motors for explosive atmospheres Catalog – EN 03-2013. [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
https://library.e.abb.com/public/21b6eba59e381c1ec1257b4b0051bb73/Motors%20for%20Explosive%20atmospheres_03-2013lowres.pdf
13. ABB industrial drives ACS800, Single drives 0.55 to 5600 kW Catalog – 2020.
14. ACS800-07/U7 drives (45 to 560 kW, 50 to 600 hp) Hardware Manual. 3AFE64702165 Rev I – EN 2013-08-28.
15. Про відновлення дії національних та міждержавних стандартів: затверджений наказом Кабінету Міністрів України від 29.12.2018 р. № 545 [Електронний ресурс].
Режим доступу:
<https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0545774-18#Text>
16. Петрушин В.С. Асинхронні короткозамкнені двигуни в системах напівпровідникового електроприводу. - Одеса; ОДПУ, 1997, 145 с.
17. Петрушин В.С. Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи для студентів напрямку «Електромеханіка». – Одеса: ОДПУ, 2013. – 20с.
18. MYCOM 2520C, 3225C Compound type two-stage screw compressor instruction manual. Cat. No. 0202112E-K1732C 08.8, Japan – 80p. [Електронний ресурс]. —
Режим доступу:
https://www.hosbv.com/data/specifications/10805_3105_3105%20-%20Mycom%20F2520SLC-61.pdf

ДОДАТОК А

Таблиця даних холодоагенту R507

[illegible]

ДОДАТОК Б

Технологічна карта проекту

