

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки

Кафедра електричної інженерії та електроніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

на тему:

Модернізація асинхронного електропривода
системи вентиляції танкеру

Виконав: студент 6 курсу, групи 3601-53
спеціальності:

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

Спеціалізація: «Експлуатація суднового електрооблад-
нання і засобів автоматики»

_____ **Блінда Владислав Борисович**
(підпис, П.І.Б.)

допущений до захисту 15.12.2023
(дата)

Завідувач кафедри Микола Муха
(підпис, ім'я та прізвище)

Керівник Микола Муха
(підпис, ім'я та прізвище)

Нормо контролер Ігор Малявін
(підпис, ім'я та прізвище)

Рецензент Михайленко В.С.
(підпис, ім'я та прізвище)

м. Одеса 2023 р.

ПРОТОКОЛ

створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 14:38:18 15.12.2023

Файлу з підписом: ДРМ_Бліндв В.Б._2023_full.docx.p7s

Розмір файлу з підписом: 1.7 МБ

Перевірені файли:

Файлу без підпису: ДРМ_Бліндв В.Б._2023_full.docx

Розмір файлу без підпису: 1.7 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: Блінда Владислав Борисович

І.П.Б.: Блінда Владислав Борисович

Країна: Україна

ІДН: 3487610556

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 14:38:16 15.12.2023

Сертифікат виданий: "Дія". Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг

Ідентифікаційний номер: 382367105294AF97040000006DAC5600F1D2BE01

Тип носія особистого ключа: ЗНКІ криптомодуль ІІТ Гряда-301

Алгоритм підпису: ДСТУ-4145

Тип підпису: Кваліфікований

Контейнер: Підпис та дані в CMS-файлі (CAvES)

Формат підпису: 3 повними даними ЦСК для перевірки (CAvES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

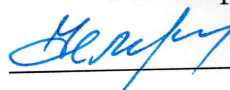
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки

Кафедра електричної інженерії та електроніки

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедрою ЕІ та Е

 Микола Муха

« 01 » 11 2023 р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи магістра

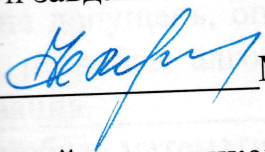
Блінди Владислава Борисовича

Тема магістерської роботи

1. «Модернізація асинхронного електропривода системи вентиляції танкеру» затверджена наказом ректора університету від 12 грудня 2023 р. за № 2004.
2. Термін здачі курсантом закінченої роботи до 20.12.2023 р.
3. Вихідні дані до роботи: технічна документація танкеру.
4. Змістовна частина розділів дипломної роботи освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» зі спеціальності 271 «Морський та внутрішній водний транспорт» освітньо-професійної програми «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики»:
 - 4.1. Аналітичний огляд науково-технічної літератури за предметом дослідження, аналіз суднових систем вентиляції приміщень. Обґрунтування теми дослідження, її актуальності та новизни.
 - 4.2. Розробка електроприводу системи суднової вентиляції приміщень надбудови танкеру.
 - 4.3. Розрахунок моменту навантаження системи вентиляції.
 - 4.4. Розробка математичної моделі асинхронного двигуна приводу обертання радіального вентилятора.

- 4.5. Моделювання сталих режимів регульованих асинхронних двигунів в системі вентиляції.
- 4.6. Розрахунок характеристик та оптимізація обмоткових даних базового асинхронного двигуна.
- 4.7. Розробка системи керування електромеханічною системою вентиляції приміщень надбудови танкеру.

Дата видачі завдання: 01.11.2023 р.

Керівник  Муха Микола

Завдання прийняв до виконання _____ Блінда Владислав

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1.	Аналітичний огляд науково-технічної літератури за предметом дослідження, аналіз систем суднової вентиляції. Обґрунтування теми дослідження, її актуальності та новизни.	01.11.23- 15.11.23	
2.	Розрахунок моменту навантаження асинхронного електропривода системи вентиляції	16.11.23-26.11.23	
3.	Постановка задачі моделювання, обґрунтування допущень, оцінка адекватності моделей, розробка алгоритму проведення моделювання.	27.11.23-30.11.23	
7.	Розробка математичної моделі асинхронного двигуна приводу обертання радіального вентилятора. Моделювання сталих режимів регульованих асинхронних двигунів в системі вентиляції.	01.12.23-01.12.23	
8.	Розрахунок характеристик та оптимізація обмоткових даних базового асинхронного двигуна. Розробка системи керування електромеханічною системою вентиляції приміщень надбудови танкеру.	07.12.23-15.12.23	
9	Оформлення дипломної роботи. Підготовка презентації доповіді.	16.12.23-20.12.23	

Курсант-дипломник _____

(підпис)

Блінда Владислав

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____

(підпис)

Муха Микола

(прізвище та ініціали)

Перелік умовних позначень

АД – асинхронний двигун

ВМ – виконавчий механізм

ЕП – електропривод

КЗ – коротке замикання

ККБ – компресорно-конденсатний блок

ККД – коефіцієнт корисної дії

ММ – математична модель

ЧП – частотний перетворювач

СК – система керування

ЦПК – центральний пост керування.

Анотація

Метою дипломної роботи є модернізація автоматизованої електромеханічної системи вентиляції приміщень надбудови танкеру.

В процесі виконання роботи розроблено електромеханічну систему вентиляції на основі асинхронного двигуна з частотним керуванням $U/f^2 = \text{const}$. Теорія електричних машин, електропривода та автоматичного керування, системи керування електроприводами використані при вирішенні поставленої задачі. Система керування базувалась на основі використання датчика тиску (витратоміра) для подачі сигналу керування на частотний перетворювач.

За розрахунками моменту навантаження системи вентиляції обрані вентилятори середнього тиску ВР 288-46-2,5 з асинхронним двигуном потужністю 5,5 кВт. Розрахунки двигуна виконані за допомогою програми DIMASdrive, що являє собою середовище для моделювання, аналізу та проектування регульованих асинхронних двигунів, а також програми gts2.exe.

На базі оптимізованого асинхронного двигуна, обраного частотного перетворювача частоти Lifasa Starvert iG5A розроблена система керування електромеханічною системою вентиляції приміщень надбудови танкеру з використанням програмованого контролера Modicon M240.

Ключові слова: АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ВЕНТИЛЯТОР, ВИТРАТОМІР, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ПРОГРАМОВАНИЙ КОНТРОЛЕР.

Abstract

The aim of the thesis is to modernize the automated electromechanical ventilation system of the tanker superstructure.

In the course of the work, an electromechanical ventilation system based on an asynchronous motor with frequency control $U/f^2 = \text{const}$ was developed. The theory of electric machines, electric drive and automatic control, electric drive control systems are used to solve the given problem. The control system was based on the use of a pressure sensor (flow meter) to provide a control signal to the frequency converter.

According to calculations of the load moment of the ventilation system, medium-pressure fans BP 288-46-2.5 with an asynchronous motor with a power of 5.5 kW were selected. Engine calculations were performed using the DIMASdrive program, which is an environment for modelling, analysis and design of regulated asynchronous motors, as well as the gts2.exe program.

Based on the optimized asynchronous motor, the selected Lifasa Starvert iG5A frequency converter, a control system for the electromechanical ventilation system of the tanker superstructure premises was developed using the Modicon M240 programmable controller.

Keywords: ASYNCHRONOUS MOTOR, FAN, FLOW METER, FREQUENCYCOVERTER, PROGRAMMABLE CONTROLLER

Зміст

ВСТУП.....	10
1. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СИСТЕМИ СУДНОВОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ ПРИМІЩЕНЬ НАДБУДОВИ.....	12
1.1. Електропривод радіального вентилятора	12
1.2. Переваги частотно-керованого електропривода.....	14
1.3. Розрахунок моменту навантаження	17
2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВИГУНА ПРИВОДУ РАДІАЛЬНОГО ВЕНТИЛЯТОРА	22
2.1. Загальні положення	22
2.2. Моделювання сталих режимів регульованих асинхронних двигунів	25
3. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ОБМОТКО- ВИХ ДАНИХ БАЗОВОГО ДВИГУНА.....	31
3.1. Вибір двигуна для приводу вентиляційної установки та результати перевірочних розрахунків двигунів	32
3.2. Результати розрахунку регульовальних характеристик вибраних асинхронних двигунів в приводі вентилятора	35
3.3. Розрахунок обмоткових даних для двигунів із новими номінальними частотами	41
3.4. Результати моделювання та ефективність оптимізованих обмоток двигуна 4A100L4	41
3.5. Порівняння характеристик серійного двигуна та двигуна з оптимізованою обмоткою при живленні від напівпровідникового перетворювача частоти	44
4. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ ВЕНТИЛЯЦІЇ ПРИМІЩЕНЬ НАДБУДОВИ ТАНКЕРУ.....	49
ВИСНОВКИ.....	53
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ПОСИЛАНЬ.....	
Додаток А	

Додаток Б	47
-----------------	----

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Важливість чистого повітря в приміщеннях, де мешкає екіпаж судна, добре відома. Складні умови праці екіпажу на танкерах, автономність та ізолюваність повсякденного перебування, можливі теплові стреси можуть призвести до небезпечного чи некомфортного робочого середовища. Ефективна, добре спроектована вентиляція пропонує часткове вирішення цих проблем, коли потрібен захист моряків. Вентиляція також може служити для контролю запаху, вологи та інших небажаних умов навколишнього середовища.

Вентиляційні системи, що використовуються на судах, проєктуються двох основних типів. Система припливу повітря використовується для подачі повітря, зазвичай загартованого, в приміщення надбудови судна. Система витяжки використовується для видалення забруднювачів з метою підтримки здорового робочого середовища.

Повна система вентиляції повинна враховувати як припливну, так і витяжну системи, тобто повинен відбуватись регульований обмін повітряної маси в приміщеннях надбудови для створення комфортного середовища для екіпажу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська дипломна робота виконувалась на кафедрі електричної інженерії та електроніки НУОМА у відповідності до плану підготовки магістрів та тематики досліджень кафедри.

Метою роботи є впровадження енергоефективного керування припливною системою вентиляції в надбудові танкеру шляхом використання частотно-керованого асинхронного двигуна радіального вентилятора.

Для реалізації поставленої мети потрібно виконати наступні завдання:

1. Аналіз судових систем вентиляції.
2. Розрахунок моменту навантаження системи вентиляції.
3. Розрахунок частотно-керованого асинхронного двигуна. Розрахунок характеристик та оптимізація обмоткових даних частотно-керованого асинхронного двигуна. Розробка математичної моделі двигуна приводу радіального вентилятора.

4. Розробка системи керування вентиляційною системою та алгоритму роботи, за яким можна написати програму для контролера.

Об'єкт дослідження: автоматизоване керування частотою обертання асинхронного двигуна радіального вентилятора за допомогою зворотного зв'язку за витратами повітря.

Предмет дослідження: система суднової вентиляції приміщень надбудови судна.

Методи досліджень: в процесі виконання роботи використано базисні положення теорії електричних машин, електропривода, автоматичного керування та математичного моделювання електромеханічних систем.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Запропоновано систему керування електромеханічною системою вентиляції приміщень надбудови судна.

2. Розроблено математичну модель управління частотою обертання асинхронно-керованого приводу вентилятора за зворотним зв'язком за витратами повітря.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в розробці системи керування судновою вентиляцією, що забезпечує керування швидкістю вентилятора, плавне регулювання потужності системи суднової вентиляції.

1. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СИСТЕМИ СУДНОВОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ ПРИМІЩЕНЬ НАДБУДОВИ

1.1. Електропривод радіального вентилятора

Одним із завдань дипломної роботи, що пов'язане із модернізацією радіального вентилятора середнього тиску типу ВР 288-46-2,5 (рис.1.1) є заміна електроприводу радіального вентилятора (рис.1.2) із нерегульованим асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором (рис.1.3) на частотно-керований електропривод на базі асинхронного короткозамкненого двигуна.

До недоліків некерованої системи приводу слід віднести постійну швидкість приводу, і в наслідок цього незмінну продуктивність вентиляційної установки та незмінну кількість споживаної електроенергії. В той же час існує необхідність у регулюванні інтенсивності повітряного потоку. Регулювання шляхом відведення частини повітряного потоку, або зміни перетину вихідного отвору (за допомогою шиберу) істотно зменшує аеродинамічний ККД вентиляційної системи і призводить до неефективного споживання електроенергії, а у деяких випадках і до перегріву двигуна. Крім того, при цьому ускладнюється конструкція вентиляційної установки, а її робота у визначених режимах може супроводжуватись істотним збільшенням вібрацій та акустичних шумів. Вищевказані чинники негативно впливатимуть як на технічне обладнання, так і на виробничий персонал й зовнішнє середовище.



Рис.1.1 – Загальний вигляд радіального вентилятора середнього тиску ВР 288-46-2,5



Рис.1.2 – Електропривод механізму радіального вентилятора ВР 288-46-2,5



Рис.1.3 – Загальний вигляд двигуна 4A100L2

У приводі використовується асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу 4A100L2 (рис.1.3), технічні дані якого зведені до табл.1.1.

Таблиця 1.1

Технічні дані асинхронного двигуна 4A100L2

Потужність на валу, при ПВ = 100%	5,5 кВт
Синхронна частота обертання	3000 об/хв
Висота вісі обертання	100 мм
Номінальна напруга Δ/Y	220/380 В
Фазний струм	10,45 А
ККД	87,6%
$\cos \varphi$	0,91
Максимальний момент	46,25 Н·м
Момент інерції ротора	0.0075 кг·м ²
Режим роботи	S1
Маса	42 кг

Існуюча схема електроприводу радіального вентилятора зображена на (рис.1.4).

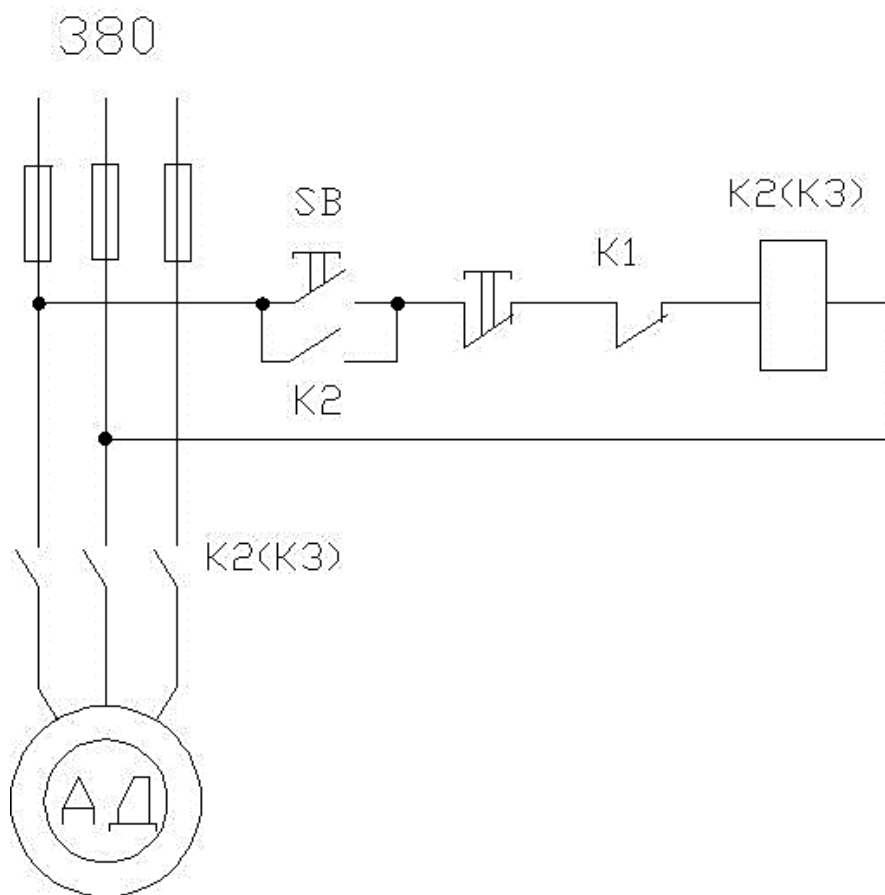


Рис.1.4 – Схема приводу радіального вентилятора ВР 288-46-2,5

1.2. Переваги частотно-керованого електроприводу

Альтернативним рішенням некерованого електропривода вентилятора є застосування частотного регулювання асинхронними двигунами із живленням від напівпровідникового перетворювача частоти. Він забезпечує підтримку такої швидкості обертання ротору двигуна, яка достатня для створення необхідного тиску повітря, шляхом зміни продуктивності вентиляційної установки. Для електроприводу був обраний перетворювач фірми Lifasa серії Starvert iG5A, тип перетворювача SV055 iG5A-4 (рис.1.5). Технічні дані перетворювача наведені в табл. 1.2.



Рис.1.5 Загальний вигляд перетворювача частоти Lifasa Starvert iG5A

Дані перетворювача частоти Lifasa Starvert iG5A

Потужність двигуна	5,5 кВт
Струм при повному навантаженні	12 А
Напруга живлення	3 фази, 380...480 В
Максимальна вихідна частота	400 Гц
Частота комутації ШІМ	1...15 кГц
Перевантажувальна здатність	150% протягом 1 хв. 200% протягом 30 сек.
Закони частотного керування	U/f , $U/f^2 = \text{const}$
Ступінь захисту	IP20
Робочі температури	-10...+55 °С
Вартість перетворювача	2135 грн.
Вартість мережевого дроселя	472 грн.
Загальна вартість	2607 грн.

За схемою (рис.1.6) перетворювач частоти Lifasa Starvert iG5A являє собою дволанковий перетворювач частоти із проміжною ланкою постійного струму на базі автономного інвертора напруги (АІН), й складається з трьох основних частин – мостового некерованого випрямляча (НВ), ємнісного фільтра у ланці постійного струму С та автономного інвертора напруги на IGBT-транзисторах.

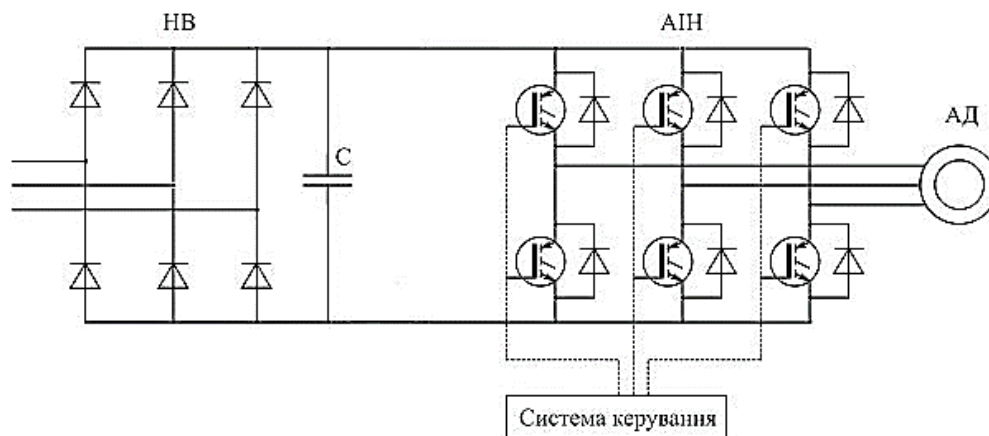


Рис.1.6 Схема силових кіл перетворювача частоти Lifasa Starvert iG5A

Оскільки за схемою перетворювача випрямляч живить постійною напругою конденсатор досить великої ємності, то споживаний з мережі струм буде істотно несинусоїдальним і якщо перетворювач здійснюватиме завеликий електромагнітний вплив на обладнання, то його слід підключити до мережі через дросельний фільтр, що обмежує генерацію перетворювачем вищих гармонік до мережі живлення. Струм на виході перетворювача є близьким до синусоїдального завдяки використанню алгоритмів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) при керуванні транзисторами інвертора. Високочастотні пульсації від частоти модуляції ШІМ, що мають місце у цьому випадку, досить добре відфільтровуються на індуктивностях розсіювання обмоток двигуна.

Взагалі цей тип перетворювачів має добрі експлуатаційні та регульовальні властивості. Основним його недоліком, як це видно з табл. 1.2, є відносно висока вартість, проте міжнародний та вітчизняний досвід свідчить, що витрати на придбання перетворювачів окупаються приблизно за 3...5 років лише за рахунок економії електроенергії.

Зважаючи на високу вартість перетворювача частоти доцільно провести оцінку енергетичних показників електроприводу до і після впровадження частотного

регулювання. Для цього слід розрахувати споживання енергії двигуном на визначених частотах обертання прямого та частотного регулювання. При цьому, для спрощення оцінки, прийняти, що на усіх частотах обертання двигун працює приблизно однакову кількість часу.

Для звичайних електроприводів вибір двигуна здійснювали, як правило, за середньою потужністю. У регульованих приводах слід робити вибір за обертовим моментом, оскільки швидкість змінюється у широкому діапазоні, а момент навантаження, зокрема у підйомних механізмах залишається незмінним.

1.3. Розрахунок моменту навантаження

Аналіз роботи асинхронних короткозамкнених двигунів в системах регульованого ЕП, а також вибір або проектування двигунів для таких систем здійснюються при сумісному розгляді характеристик двигунів і навантажень. З цією метою необхідно мати моделі механічних навантажень, що дозволяють проводити моделювання найпоширеніших виробничих механізмів, для регулювання яких знаходять застосування асинхронні приводи. Моделювання необхідно проводити з урахуванням параметрів, характеристик і режимів роботи цих механізмів.

У сталому режимі роботи ЕП електромагнітний момент двигуна врівноважується моментами опори робочої машини або її виконавських органів. Механічне навантаження на валу двигуна є залежність зміни моменту опору від кутової частоти обертання. Відносно законів зміни статичних моментів виробничі механізми можуть бути розділені на декілька груп. У даному дипломному проекті розглядаються механізми, статичний момент яких характеризується квадратичною (рідше кубічною) залежністю від швидкості. Подібною характеристикою володіють відцентрові насоси, вентилятори, повітродуви, турбокомпресори, центрифуги, димососи, корабельні гвинти і т. п.;

Характеристики виробничого механізму у вищезгаданому вигляді дозволяють визначити який момент навантаження на валу двигуна в сталому режимі буде при різних кутових швидкостях, що задаються механізму з метою регулювання його продуктивності відповідно до технологічних вимог.

З урахуванням вищесказаного момент опору на валу АД є функцією двох змінних - часу t і частоти обертання n і в загальному випадку описується виразом

$$M_c(n) = M_0 + k \cdot n^n ,$$

де: M_0 – початковий момент, Н·м; k – коефіцієнт пропорційності; n – показник, що визначає характер залежності навантаження від частоти обертання, для навантажень, що реально зустрічаються на практиці.

Для наступного аналізу роботи вентилятора при регулюванні частоти обертання приводного двигуна необхідно розрахувати залежність між частотою обертання та моментом навантаження. Для цього скористаємось аеродинамічними характеристиками радіального вентилятора ВР 288-46-2,5, що подані на рис.1.7

З рис.1.7 можна побачити, що у разі незмінного аеродинамічного ККД вентилятора, що, в основному, визначається конфігурацією шляхів проходження повітряного потоку, продуктивність вентилятора приблизно пропорційна частоті обертання, а споживана потужність приблизно пропорційна частоті обертання у кубі. До табл.1.3 занесемо значення частоти обертання, продуктивності та споживаної потужності, що відповідають середньому аеродинамічному ККД $\eta_a=0,25$.

Таблиця 1.3

Значення частоти обертання, продуктивності, споживаної потужності, тиску та аеродинамічного ККД вентиляційної установки

n , об/хв	Q , $10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$	$P_{\text{сп}}$, Вт	ΔP_B , Па	η_{BE} , %
2880	2660	4920	1700	25
1000	500	330	240	10

Момент опору на валу двигуна розрахуємо за наступною формулою:

$$M = \frac{30 \cdot P}{\pi \cdot n} ,$$

та отримані результати занесемо до табл. 1.4

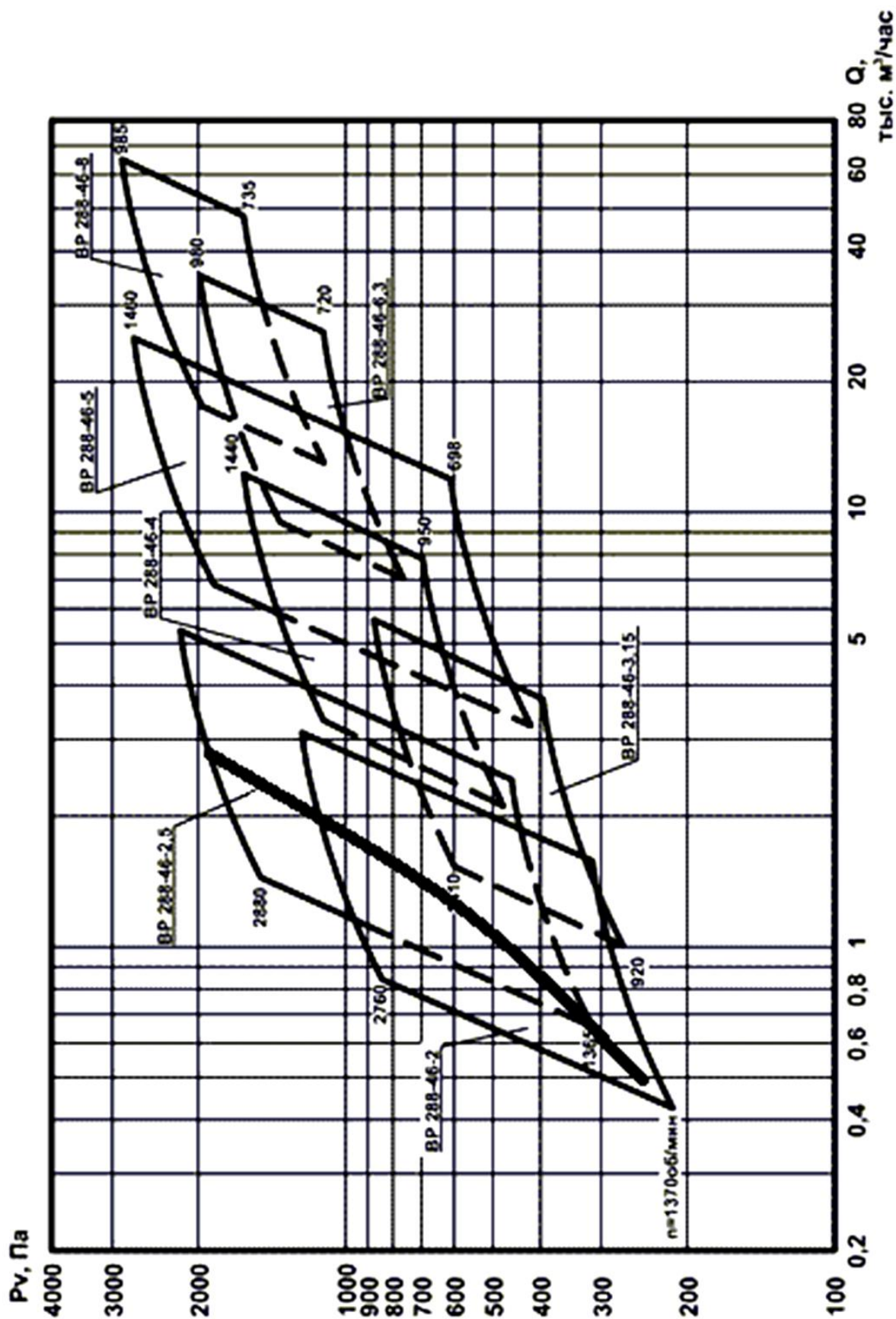


Рис.1.7 Аеродинамічна характеристика радіального вентилятора ВР 288-46-2,5

Таблиця 1.4

Момент опору на валу двигуна та відповідний тиск вентилятора

n , <i>об / хв</i>	$P_{\text{вент.}}$ <i>Вт</i>	M , <i>Н · м</i>
2880	5024	16,66
1000	333,3	3,18

Вважатимемо, що момент навантаження вентилятору ВР 288-46-2,5 характеризується квадратичною залежністю від частоти обертання із деяким початковим моментом.

$$M = M_0 + k \cdot n^2 \quad (1.2)$$

Для подання навантажувальної характеристики у вигляді (1.2) розв'яжемо систему рівнянь

$$\begin{cases} n_1^2 \cdot x_1 + x_2 = M_1 \\ n_2^2 \cdot x_1 + x_2 = M_2 \end{cases} \quad (1.3)$$

Складену за крайніми навантажувальними точками діапазону регулювання $n_1 = 1000$ об / хв, $M_1 = 3,18$ Н · м, $n_2 = 2880$ об / хв, $M_2 = 16,66$ Н · м. При розв'язанні системи будуть визначені коефіцієнти пропорційності k та початковий момент M_0 . Система у матричному виді має вигляд:

$$\begin{vmatrix} k \\ M_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} n_1^2 & 1 \\ n_2^2 & 1 \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} M_1 \\ M_2 \end{vmatrix} \quad (1.4)$$

Розв'язок системи (1.4) дає наступні результати $k = 1.848 \cdot 10^{-6}$, $M = 1.333$.

Таким чином залежність моменту навантаження від частоти обертання можна подати як:

$$M = 1.333 + 1.848 \cdot 10^{-6} \cdot n_2 \quad (1.5)$$

У табл. 1.5 наведені результати розрахунку моментів навантаження для різних частот обертання. Незначна різниця між моментами у табл. 1.4 та 1.5

свідчить про адекватність математичної моделі вентиляторної установки викладеної у табл. 1.5

Таблиця 1.5

Результати розрахунку моментів навантаження

n, об/хв	1000	1500	2000	2300	2880
M, Н·м	3,181	5,491	8,725	11,109	16,661

Загально-промислові двигуни не розроблялися як регульовані машини і були спроектовані для тривалої роботи при незмінних значення частоти і напруги живлення. До того ж слід було задовольняти іноді досить жорстким пусковим умовам, що в результаті призводило до погіршення енергетичних та малогабаритних показників. Частотне регулювання знімає деякі з цих проблем, а сучасні напівпровідникові перетворювачі вдало суміщають у собі функції джерел живлення та захисту електричних машин. Відповідно, наступним кроком у модернізації радіального вентилятора електрообладнання є проектування нового регульованого асинхронного двигуна спеціально для умов роботи у частотному електроприводі.

Проектування абсолютно нової електричної машини “з нуля” є дуже складним і тривалим процесом, тому проектування регульованого двигуна доцільно здійснювати на базі звичайних серійних, зокрема тих що мали замінити штатний двигун із короткозамкненим ротором. При цьому проектування включатиме в себе зміну геометрії активних частин двигунів та обмоткових даних з метою покращення показників приводу. Ця зміна має відбуватися у певних межах із урахуванням технологічних можливостей виготовлення електричних машин аби не викликати різкого збільшення їхньої вартості.

2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВИГУНА ПРИВОДУ РАДІАЛЬНОГО ВЕНТИЛЯТОРА

2.1 Загальні положення

Математична модель (ММ) асинхронного двигуна приводу обертання радіального вентилятора середнього тиску типу ВР 288-46-2,5 являє собою комплексну багаторівневу модель усього приводу, що складена з моделей компонентів, що входять до цього приводу. В структурі частотно-регульованого приводу (рис.2.1) стан асинхронної машини визначається процесами енергообміну між двигуном та напівпровідниковим перетворювачем з електричного боку і між двигуном та навантаженням з механічного боку. Ці процеси в кінцевому результаті впливають на енергообмін між мережею живлення та приводом в цілому.

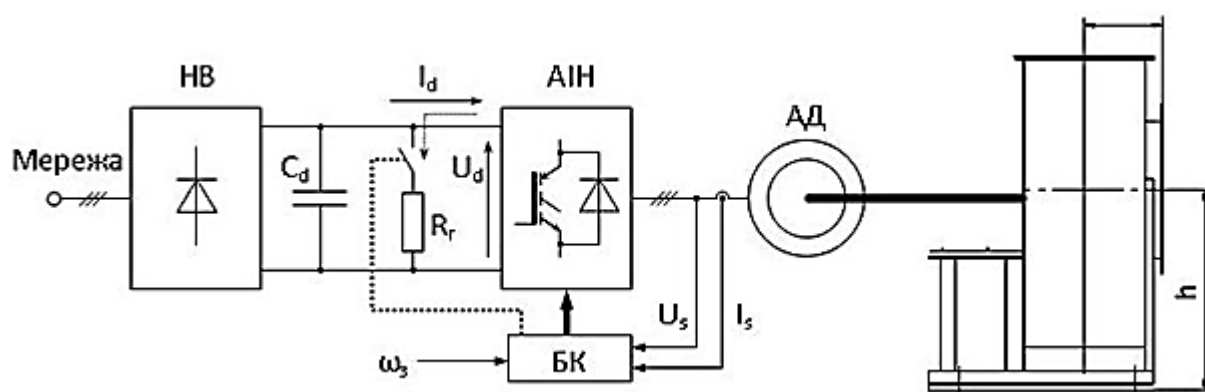


Рис.2.1 Функціональна схема частотно-керованого приводу обертання радіального вентилятора середнього тиску типу ВР 288-46-2,5: НВ – некерований випрямляч; БК – блок керування; В – ВР 288-46-2,5

ММ мають враховувати зміну параметрів живлення двигуна, обмеження перетворювача за максимальними напругою і струмом, зміну параметрів АД при регулюванні, зміну тепловентиляційних властивостей машини, наявність часових вищих гармонічних складових, теплових провідностей, змінних навантажень приводу при різних частотах обертання.

Характер протікання різних процесів у АД визначає ефективність і надійність їхнього використання в системі електропривода. Математичне моделювання

дозволяє детально проаналізувати роботу як всієї системи ЕП, так і окремих її частин. Математичні моделі (ММ) регульованих асинхронних двигунів описують процеси, різні за фізичною природою (електромагнітні, електромеханічні, енергетичні, теплові) і за характером протікання (сталі й нестационарні). Вибір сучасних методик, що є основою ММ, є одним з найбільш важливих питань моделювання роботи РАД.

На сьогоднішній день рівень розвитку обчислювальної техніки відкриває нові можливості для аналізу складних електромагнітних, теплових і інших процесів в електромеханічних системах. Удосконалювання моделювання визначає необхідність коректування ММ, що описують фізичні процеси в електричних машинах, з метою підвищення їхньої адекватності реальним об'єктам. При цьому уточнюються ММ, за рахунок обліку впливу на хід електромагнітних процесів таких явищ, як насичення основних шляхів магнітного потоку, витиснення струмів у струмопровідних елементах і ін.

Різні за своєю фізичною природою процеси і явища в ЕМ повинні розглядатися з урахуванням складного характеру зв'язків між собою й взаємовпливі один на одного. Удосконалювання ММ, що здійснювалось за рахунок впровадження польових методів і алгоритмів, зв'язано зі значним (на кілька порядків) зростанням обсягів обчислювальної роботи. У зв'язку із цим при реалізації розрахункових алгоритмів таких завдань, навіть із використанням потужних ЕОМ і сучасних математичних методик, виникають значні труднощі.

Незважаючи на те, що при використанні польових моделей явища електромагнітної й теплової природи в ЕМ описуються більш точно, у проектних ММ РАД доцільне застосування ланцюгових моделей. Більшою перевагою такого підходу є правильне відбиття фізичної сутності аналізованих явищ при відносній простоті алгоритму [9,10]. Традиційні аналітичні способи обліку явищ насичення, витиснення, розподілу втрат при аналізі електромагнітних і теплових процесів в ЕМ набагато простіше в порівнянні з польовими методами. У зв'язку із цим, з ланцюговими моделями реально здійсненні оптимізаційні розрахунки, які

забезпечуються проектними ММ, що є основою для оптимізаційного проектування АД, що працює в умовах регульованого привода.

Базою для ММ РАД служать моделі АД, у яких враховані основні особливості роботи двигуна в електроприводі:

- наявність вищих гармонік у струмах живлення АД;
- використання в ПЧ різних законів частотного керування;
- у загальному випадку зміна величини моменту опору на валу АД, як при русі на різних швидкостях, так і в процесі переходу з однієї швидкості на іншу.
- зміна теплових втрат при роботі АД в різних режимах роботи;
- переважна робота двигуна в нестаціонарних режимах;
- зміна параметрів схеми заміщення АД при регулюванні, а також у зв'язку з насиченням магнітного кола й витисненням струмів в обмотках;

Як і ММ загальнопромислових двигунів [6,12], ММ регульованих машин [9,10,11,16] також будуються на базі ланцюгових моделей із використанням еквівалентних заступних схем. Адекватність ланцюгових моделей, сформованих на базі еквівалентних заступних схем, істотно зростає при відмові від деяких загальноприйнятих допущень. У використовуваних ММ ураховуються зміни параметрів заступних схем внаслідок явищ насичення й витиснення, втрати в сталі ротора, тощо.

При моделюванні сталих режимів АД в кожній робочій точці діапазону регулювання за результатами моделювання перетворювача і навантажувального механізму визначаються параметри напруги на вході двигуна (амплітуда, частота, спектральний склад) і величина моменту опору на валу машини. Параметри напруги залежать від структури силового кола й налаштувань та параметрів інвертора.

2.2. Моделювання сталих режимів регульованих асинхронних двигунів

Врахування впливу несинусоїдальності джерела живлення, яким у загальному випадку є напівпровідниковий перетворювач, на робочі характеристики АД досить точно виконується поданням реального АД, таким що складається з низки умовних двигунів, які живляться від джерел окремих гармонік. Умовні двигуни представляються у вигляді окремих заступних схем для кожної гармонійної складової напруги або струму живлення. Використання даного методу при аналізі характеристик і показників АД частотно-керованих електроприводів показало добру збіжність результатів моделювання з експериментальними даними.

Використані в розрахунках АД заступні схеми засновані на системах рівнянь електричної рівноваги статорних і роторних кіл машини. Асинхронна машина приводиться до еквівалентної Т- або Г-подібної заступної схеми, що добре відбиває реальні фізичні процеси в асинхронних двигунах. Вибір заступної схеми для формування ММ РАД визначається ефективністю її використання при аналізі певних параметрів двигуна. У даній роботі використовуються Т-подібні заступні схеми. Вони застосовуються для розрахунку електричних, магнітних і енергетичних параметрів РАД.

При формуванні ММ РАД, що живляться від інвертора напруги, як ми вже відзначали, реальний двигун представляється декількома машинами. Частоти й амплітуди джерел живлення відповідних гармонік визначаються в результаті розкладання в гармонійний ряд вихідної напруги АІН. Кількість умовних двигунів і, відповідно, заступних схем (рис.2.2) обмежується номером останньої враховувати гармоніки, що $\nu_{\text{кон}}$. Вибір кількості цих гармонік та їх порядку визначається формою кривої напруги на виході перетворювача, і відповідно результати розкладання цієї кривої в ряд Фур'є. Для перетворювачів із прямокутно-ступінчастою формою вихідної напруги доцільно розглянути декілька вищих гармонік нижчих порядків $\nu = 5, 7, 11, 13$. Для перетворювачів із ШІМ вихідної напруги гармоніки вищевказаних порядків у вихідній напрузі майже відсутні, проте мають місце гармоніки модуляційних порядків, частоти яких кратні частоті модуляції ШІМ. Їхні

амплітуди, особливо на низьких частотах, можуть у декілька разів перевищувати амплітуду основної робочої гармоніки. Обраний для системи приводу перетворювач частоти Lifasa серії Starvert iG5A може працювати як із прямокутною, так і зі сформованою ШІМ вихідною напругою.

Для зменшення вмісту гармонік кратним кількості фаз, для таких АД рекомендується схема з'єднання “Y”. З'єднання обмоток в “Δ” застосовується відносно рідко, лише за певних алгоритмів роботи ШІМ.

При формуванні ММ приймаються деякі допущення: обмотки статора й ротора двигуна симетричні, взаємний вплив вищих часових гармонік магнітного потоку відсутній. Але при цьому варто відмовитись від звичайно використовуваних при аналізі асинхронних приводів допущень, які знижують точність розрахунків – зокрема, приймається, що відносно ВГ двигун перебуває в стані короткого замикання й ковзання для всіх ВГ приймаються рівними 1. Таке допущення некоректно через те, що навіть у режимі ідеального холостого ходу ($s_1 = 0$), ковзання АД щодо ряду вищих гармонійних з найбільшими амплітудами будуть наступними: $s_5 = 1,2$; $s_7 = 0,857$; $s_{11} = 1,091$; $s_{13} = 0,923$. При розрахунку енергетичних показників АД магнітними втратами в роторі звичайно зневажають. Однак, беручи до уваги частоти потоків ВГ, що циркулюють у сталі ротора, у ММ РАД цей вид втрат варто враховувати.

Урахування насичення зводиться до визначення індуктивних опорів розсіювання й кола намагнічування заступної схеми АД. При цьому, для урахування взаємовпливу тимчасових гармонік, прийнято вважати, що рівень насичення магнітних ланцюгів умовних двигунів ВГ залежить від амплітуди магнітного потоку основної гармоніки.

Як ми вже відзначали, РАД отримують живлення від джерела несинусоїдальної напруги. Через досить великий опір кола намагнічування для ВГ контур замикання струмів вищих гармонійних проходить в основному через коло ротора. Зазначена обставина визначає важливість визначення параметрів роторного кола для кожного умовного двигуна.

У зв'язку з викладеними особливостями РАД їхній аналіз і проектування доцільно виконувати на основі ММ, у якій використовується сукупність повних заступних схем для всіх гармонік, що підлягають урахуванню (рис.2.2). Це дає можливість урахувати несинусоїдальність струму живлення двигуна, розраховувати втрати в сталі від ВГ, використати реальні значення ковзань для ВГ і, у зв'язку із цим, більш точно визначати електричні, енергетичні й механічні параметри.

Для визначення параметрів заступних схем умовних двигунів електромагнітний розрахунок виконується в кожній робочій точці діапазону регулювання, тобто при різних сполученнях значень параметрів регулювання, частоти й величини струму статора, і навантажувального моменту. Вихідними даними для електромагнітних розрахунків умовних двигунів є: геометрія магнітної системи, обмотувальні дані й фізичні властивості матеріалів (криві намагнічування, питомі опори й ін.), однозначно визначає варіант, що розраховується. Значення параметрів заступних схем для всіх гармонік, включаючи й основну, є змінними в різних робочих точках і в загальному випадку залежать від коефіцієнта зміни частоти α стосовно номінальної частоти ПЧ, абсолютного ковзання β , коефіцієнта зміни напруги γ стосовно номінальної напруги двигуна й номера гармоніки ν : $R_i = f_{R_i}(\alpha, \beta, \gamma, \nu)$, $X_i = f_{X_i}(\alpha, \gamma, \nu, s_1)$.

Визначення електричних, механічних і енергетичних величин умовних двигунів здійснюється за результатами розрахунків параметрів відповідних схем заміщення ν -х гармонік:

$R_{1\nu}$ – активних опорів обмоток статорів;

$X_{1\nu}$ – реактивних опорів розсіювання обмоток статорів;

$R'_{2\nu}$ – наведених активних опорів обмоток роторів;

$X'_{2\nu}$ – наведених реактивних опорів розсіювання обмоток роторів;

$X_{m\nu}$ – індуктивних опорів взаємодукції статора й ротора;

$R_{m\nu}$ – активних опорів галузей намагнічування.

Амплітуди v -х гармонік напруги на затискачах обмотки статора U_{1v} розраховуються за результатами моделювання ПЧ. Частоти полів v -х гармонік f_{1v} і ковзання щодо них ротора s_v розраховуються з урахуванням напрямку обертання магнітного поля

$$f_{1v} = \alpha \cdot f_{1H} \cdot (\pm v); s_v = 1 - (\alpha - \beta) / (\pm v \cdot \alpha) \quad (2.1)$$

де знак перед v відповідає напрямку обертання поля v -ї гармоніки, наприклад

$$v = (+1, -5, +7, -11, +13, \dots) \dots$$

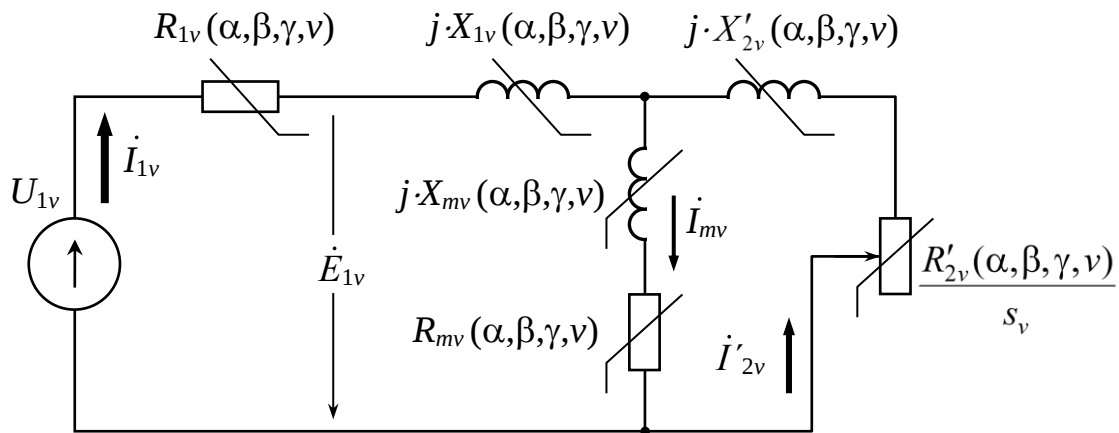


Рис.2.2 – Заступна схема частотно регульованого АД для гармонійних складових

Повний комплексний опір заступної схеми v -ї гармоніки фази АД

$$\underline{Z}_{\phi v} = R_{1v} + j \cdot X_{1v} + \frac{\left(\frac{R'_{2v}}{s_v} + j \cdot X'_{2v} \right) \cdot (R_{mv} + j \cdot X_{mv})}{R_{mv} + \frac{R'_{2v}}{s_v} + j \cdot (X_{mv} + X'_{2v})} \quad (2.2)$$

Струм статора v -ї гармоніки

$$I_{1v} = \frac{U_{1v}}{|\underline{Z}_{\phi v}|} \quad (2.3)$$

Приведений струм ротора v -ї гармоніки

$$I'_{2v} = I_{1v} \cdot \left| \frac{R_{mv} + j \cdot X_{mv}}{R_{mv} + \frac{R'_{2v}}{s_v} + j \cdot (X_{mv} + X'_{2v})} \right| \quad (2.4)$$

Струм намагнічування v -ї гармоніки

$$I_{mv} = I_{1v} \cdot \left| \frac{\frac{R'_{2v}}{s_v} + j \cdot X'_{2v}}{R_{mv} + \frac{R'_{2v}}{s_v} + j \cdot (X_{mv} + X'_{2v})} \right| \quad (2.5)$$

Коефіцієнт потужності за v -ю гармонікою

$$\cos \phi_{1v} = \cos(\text{Arg}(\underline{Z}_{\phi v})) \quad (2.6)$$

де $\text{Arg}(x)$ – функція, що розраховує аргумент комплексного числа x .

Електричні втрати в обмотці статора від струму v -ї гармоніки

$$\Delta P_{e1v} = 3 \cdot R_{1v} \cdot I_{1v}^2 \quad (2.7)$$

у клітці ротора

$$\Delta P_{e2v} = 3 \cdot R_{2v} \cdot (I'_{2v})^2 \quad (2.8)$$

Магнітні втрати

$$\Delta P_{mv} = 3 \cdot R_{mv} \cdot I_{mv}^2 \quad (2.9)$$

Електромагнітний момент v -ї гармоніки

$$M_{emv} = \frac{3p \cdot R'_{2v} \cdot (I'_2)^2}{2\pi \cdot f_{1v} \cdot s_v} \quad (2.10)$$

де p – число пар полюсів двигуна.

Потужність v -ї гармоніки

$$P_{2v} = 3 \cdot R'_{2v} \cdot (I'_2)^2 \cdot \frac{1-s_v}{s_v} \quad (2.11)$$

Споживана активна й реактивна потужність

$$P_{1v} = 3 \cdot I_{1v}^2 \cdot \text{Re}(\underline{Z}_{\phi v}), Q_{1v} = 3 \cdot I_{1v}^2 \cdot \text{Im}(\underline{Z}_{\phi v}) \quad (2.12)$$

За заступними схеми умовних двигунів на основі принципу накладення (суперпозиції) визначаються основні параметри реального ТАД, що живиться несинусоїдальним струмом. При цьому знаходяться:

- діюче значення струму статора

$$I_s = \sqrt{I_{1_1}^2 + I_{1_5}^2 + I_{1_7}^2 + \dots + I_{1_{v_{кін}}}^2} \quad (2.13)$$

- діюче значення напруги на обмотці статора

$$U_s = \sqrt{U_{1_1}^2 + U_{1_5}^2 + U_{1_7}^2 + \dots + U_{1_{v_{кин}}}^2} \quad (2.14)$$

- активна споживана потужність

$$P_1 = \sum_{v=1}^{v_{кин}} P_{1v} + \sum_{v=1}^{v_{кин}} \Delta P_{\partial o \partial v} \quad (2.15)$$

- реактивна споживана потужність

$$Q_1 = \sum_{v=1}^{v_{кин}} Q_{1v} \quad (2.16)$$

- коефіцієнт потужності двигуна

$$\chi = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} \quad (2.17)$$

(в умовах несинусоїдальності або несиметрії фазних струмів і напруг АД, його значення відрізняється від коефіцієнта зрушення перших гармонік струму й напруги $\cos \varphi_1$),

- сумарні втрати, що включають електричні, у сталі, додаткові й механічні

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{v=1}^{v_{кин}} \Delta P_{1v} + \sum_{v=1}^{v_{кин}} \Delta P_{2v} + \sum_{v=1}^{v_{кин}} \Delta P_{mv} + \sum_{v=1}^{v_{кин}} \Delta P_{\partial o \partial v} + \Delta P_{мех} \quad (2.18)$$

- потужність на валу

$$P_2 = \sum_{v=1}^{v_{кин}} \Delta P_{2v} - \Delta P_{мех} \quad (2.19)$$

- коефіцієнт корисної дії

$$\eta = P_2 / P_1 \quad (2.20)$$

Частота обертання реального двигуна визначається по основній частоті живлення й абсолютному ковзанню

$$\omega_p = 2\pi \cdot f_{1н} \cdot (\alpha - \beta) / p, \text{ або в об/хв, } n = 60 f_{1н} \cdot (\alpha - \beta) / p \quad (2.21)$$

Результуючий електромагнітний момент складається з моментів умовних двигунів з урахуванням напрямку їхньої дії. Для більшої точності варто враховувати момент еквівалентний механічним втратам $\Delta P_{мех}$

$$M_{ем} = \sum_{v=1}^{v_{кин}} M_{емv} - \Delta P_{мех} / \omega_p \quad (2.22)$$

3. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ОБМОТОЧНИХ ДАНИХ БАЗОВОГО ДВИГУНА

У дипломній роботі необхідно розглянути і порівняти характеристики та показники частотного електроприводу радіального вентилятора середнього тиску типу ВР 288-46-2,5 із асинхронними двигунами типу 4А100L2, 4А100L4 та 4А100L6.

Для кожного з цих варіантів слід провести розрахунки електромеханічних, енергетичних, теплових показників. Для машин серії 4А ще доцільно провести оптимізацію параметрів та надати рекомендації що до вибору остаточного варіанту.

Перед початком розрахунків слід пересвідчитися у адекватності результатів розрахунків за математичною моделлю, описаною у другому розділі, для синусоїдального режиму із номінальними напругами й частотами результатам заводських лабораторних випробувань та викладених у каталозі. Якщо похибка виявиться незначною, то можна говорити про достовірність результатів розрахунків і для усього діапазону частот живлення. Розрахунки здійснюватимуться за допомогою програми DIMASdrive останньої версії [1], що являє собою середовище для моделювання, аналізу та проектування регульованих асинхронних двигунів, а також програми gts2.exe. Порівняння відбудуватиметься за наступними показниками:

- Номінальна потужність на валу;
- Номінальний фазний струм;
- Частота обертання (ковзання);
- ККД;
- Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$;
- Активний опір обмотки статора;
- Індуктивний опір розсіювання обмотки статора;
- Активний опір обмотки ротора;
- Індуктивний опір розсіювання обмотки статора;
- Взаємоіндуктивний опір кола намагнічування;

- Середнє перевищення температури обмотки статора;
- Кратність пускового струму;
- Кратність пускового моменту;
- Кратність максимального моменту

Вхідні дані для програми DIMASdrive з геометрії активних частин електро-двигунів з довідникових матеріалів зведені в додатку 1, додатку 2 та додатку 3. У тому ж додатку зведено результати перерахунку параметрів заступних схем від Г-подібної заступної схеми до Т-подібної за допомогою програми gts2.exe.

4.1. Вибір двигуна для приводу вентиляційної установки та результати перевірочних розрахунків двигунів

В наступному пункті відбуватиметься вибір двигуна для приводу вентиляційної установки змінної продуктивності та порівняння отриманих даних програмного забезпечення DIMASdrive із даними каталогу [15].

Основним завданням дипломного проектування є тестування серійних асинхронних короткозамкнених двигунів та їх оптимізованих частотно – керованих модифікацій з однаковою віссю обертання та різною кількістю полюсів у складі приводу вентилятора.

Оскільки в основі роботи електричних машин змінного струму лежить принцип обертового магнітного поля, частота обертання n_1 якого визначається частотою мережі f_1 та числом пар полюсів обмотки p .

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (3.1)$$

Виходячи з цього принципу, для того щоб чотирьох полюсний або шести полюсний двигун міг розганятися до синхронної частоти обертання 3000 об/хв. та забезпечувати потрібний нам діапазон керування 1000 – 2880 об/хв., потрібно встановити перетворювач частоти, який буде в змозі видавати частоту вихідної напруги 100Гц та 150Гц відповідно. Чим параметрам відповідає обраний раніше перетворювача частоти Lifasa Starvert серії iG5A. Для приводу вентилятора

середнього тиску типу ВР 288-46-2,5 замість серійного двигуна 4A100L2, нами обрано три асинхронних короткозамкнених двигуна: 4A100L2, 4A100L4 та 4A100L6 із живленням від напівпровідникових перетворювачів частоти, які, як вже зазначалося, дадуть можливість дотримуватися необхідного діапазону керування.

Як вже згадувалось слід пересвідчитися у адекватності результатів розрахунків за математичною моделлю, описаною у другому розділі. До табл.3.1, табл.3.2 та табл.3.3 зведено порівняння основних даних розрахунку, здобутих за допомогою програм DIMASdrive та gts2.exe із довідником.

Таблиця 3.1

Порівнювання каталожних даних з даними, отриманими за допомогою програмного забезпечення DIMASdrive для двигуна 4A100L2

Величина	Одиниці	Данні каталога	Данні ЕОМ
Номінальна потужність на валу, P_2	кВт	5.5	5,5
Номінальний фазний струм, $I_{фн}$	А	10.5	10,1
Номінальне ковзання, s	о.е.	0,034	0,034
Номінальна фазна напруга, U_n	В	220	220
Активний опір обмотки статора, R_1	о.е.	1,02	0,96
Індуктивний опір обмотки статора, X_1	о.е.	1,133	1,39
Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$		0,91	0,905
Максимальне перевищення температури, Q_{max}	$^{\circ}\text{C}$	107	67
ККД	%	87.6	88,1
R_2	Ом	0,68	0,78
X_m	Ом	79,97	73,5
Індуктивний опір обмотки статора, X_2	Ом	2,27	1,7
Число обертів, n	об/хв	3000	2898
K_{ip}	-	7,5	7,2
$K_{мп}$	-	2.0	2
$K_{мах}$	-	2.5	3
Маса двигуна	кг	42	75,93

Таблиця 3.2

Порівнювання каталожних даних з даними, отриманими за допомогою програмного забезпечення DIMASdrive для двигуна 4A100L4

Величина	Одиниці	Данні католога	Данні ЕОМ
Номінальна потужність на валу, P_2	кВт	4	4
Номінальний фазний струм, $I_{фн}$	А	8,6	8,58
Номінальне ковзання, s	о.е.	0,046	0,046
Номінальна фазна напруга, U_n	В	220	220
Активний опір обмотки статора, R_1	о.е.	1,37	1,49
Індуктивний опір обмотки статора, X_1	о.е.	1,98	1,52
Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$		0,84	85,2
Максимальне перевищення температури, Q_{max}	$^{\circ}\text{C}$	107	76
ККД	%	84	85,3
R_2	Ом	1,12	1,35
X_m	Ом	61,47	58,3
Індуктивний опір обмотки статора, X_2	Ом	3,41	2,26
Число обертів, n	об/хв	1500	1431
Кіп	-	6	5,48
Кмп	-	2.0	2
Кмах	-	2.4	3,2
Маса двигуна	кг	42	70,72

Таблиця 3.3

Порівнювання каталожних даних з даними, отриманими за допомогою програмного забезпечення DIMASdrive для двигуна 4A100L6

Величина	Одиниці	Данні католога	Данні ЕОМ
Номінальна потужність на валу, P_2	кВт	2,2	2,2
Номінальний фазний струм, $I_{фн}$	А	5,6	5,637
Номінальне ковзання, s	о.е.	0,051	0,051
Номінальна фазна напруга, U_n	В	220	220
Активний опір обмотки статора, R_1	о.е.	3,15	3,02
Індуктивний опір обмотки статора, X_1	о.е.	4,19	3,23
Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$		0,73	0,764
Максимальне перевищення температури, Q_{max}	$^{\circ}\text{C}$	107	87

ККД	%	81	81,7
R_2	Ом	1,74	2,45
X_m	Ом	74,15	68,2
Індуктивний опір обмотки статора, X_2	Ом	7,49	4
Число обертів, n	об/хв	1000	949
K_{ip}	-	5	5,48
$K_{мп}$	-	2.0	2
$K_{мах}$	-	2.2	2,5
Маса двигуна	кг	42	68,7

Результати розрахунків двигунів 4A100L2, 4A100L4 та 4A100L6, викладені у табл.3.1, табл.3.2 та табл.3.3 свідчать про високий рівень адекватності математичної моделі реальному об'єкту, середня похибка не перебільшує 7%. Що не можна сказати про те, як програмне забезпечення DIMASdrive обчислює масу двигуна, в цьому випадку похибка результатів моделювання майже в 2 рази перевищує каталожні дані, що говорить про некоректність алгоритму розрахунків мас програмою DIMASdrive. Далі був розроблений коректний алгоритм розрахунку маси асинхронних короткозамкнених двигунів для покращення і оптимізації середовища для моделювання, аналізу та проектування регульованих асинхронних двигунів - програми DIMASdrive.

3.2. Результати розрахунку регульовальних характеристик вибраних асинхронних двигунів в приводі вентилятора

В цьому пункті відбудеться моделювання у середовищі DIMASdrive вентиляційної установки з різними типами частотно – керованих асинхронних двигунів: 4A100L2, 4A100L4 та 4A100L6 для визначення найбільш оптимальної конфігурації з найкращими параметрами. Перед моделюванням слід уточнити, що двигун 4A100L2 працює у своєму природному діапазоні керування швидкістю обертання на відміну від машин 4A100L4 та 4A100L6 із живленням від напівпровідникових перетворювачів частоти, які не спроектовані на роботу в цих режимах. Графіки експериментальних робочих та механічних характеристик для двигунів 4A100L2, 4A100L4 та 4A100L6 наведені на рис.3.1 – рис. 3.8.

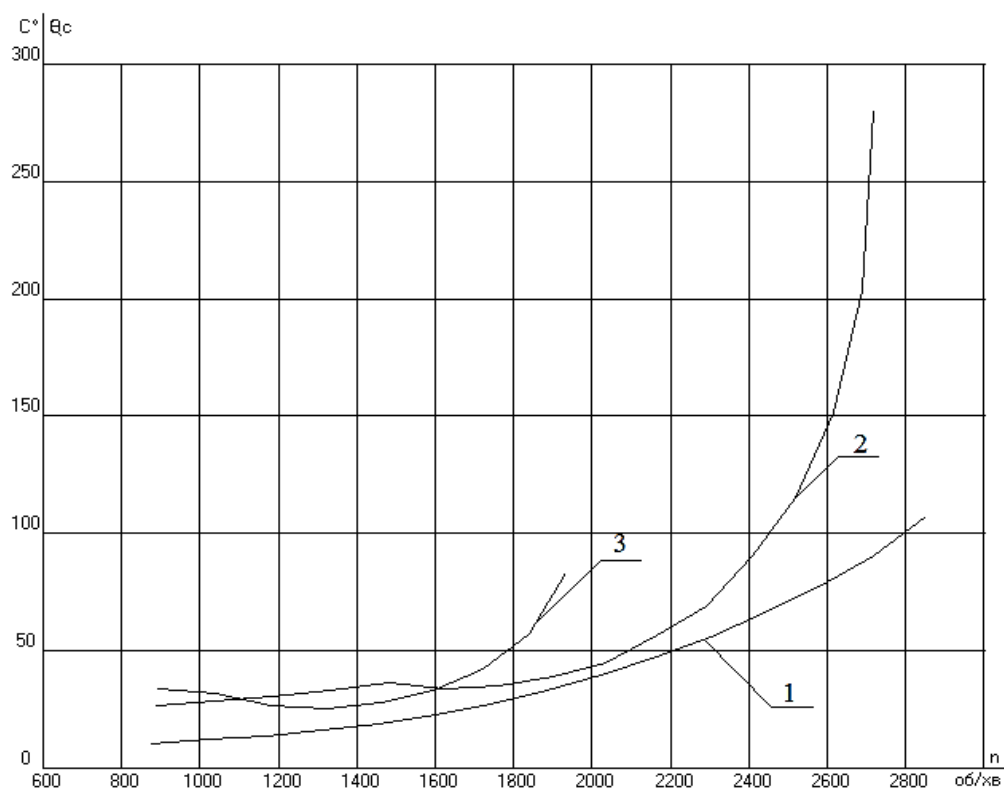


Рис. 3.1 – Перегрівів обмотки статора при тривалій роботі на вентиляторне навантаження двигунів 4A100L2 (1), 4A100L4 (2), 4A100L6 (3)

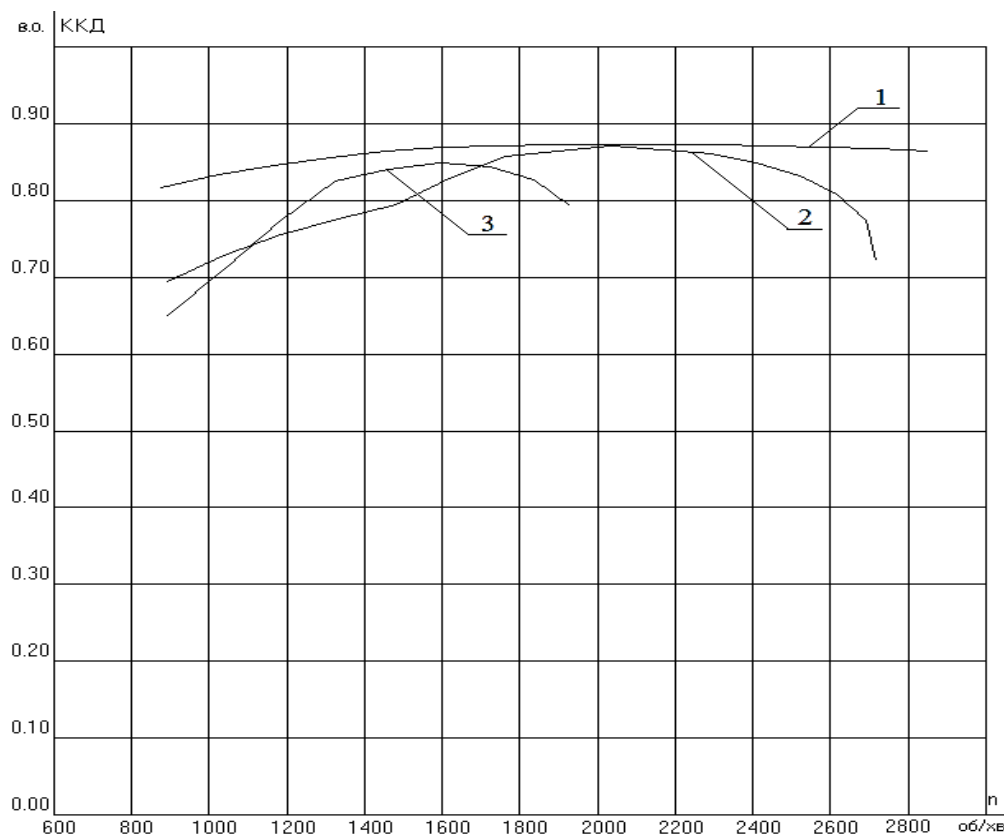


Рис. 3.2 – ККД при тривалій роботі на вентиляторне навантаження двигунів 4A100L2 (1), 4A100L4 (2), 4A100L6 (3)

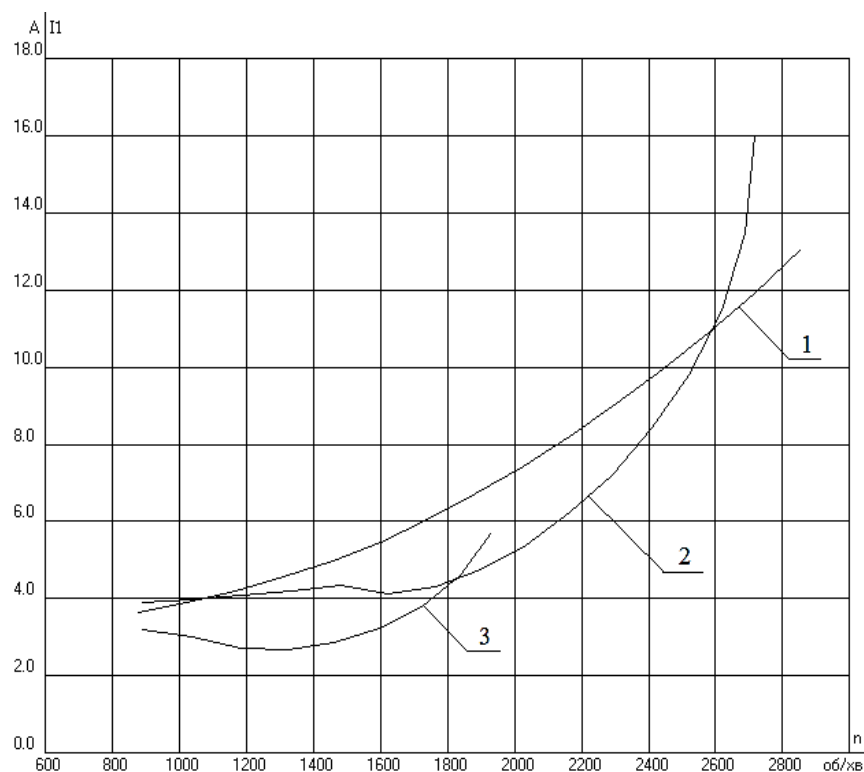


Рис. 3.3 – Фазний струм при тривалій роботі на вентиляторне навантаження двигунів 4A100L2 (1), 4A100L4 (2), 4A100L6 (3)

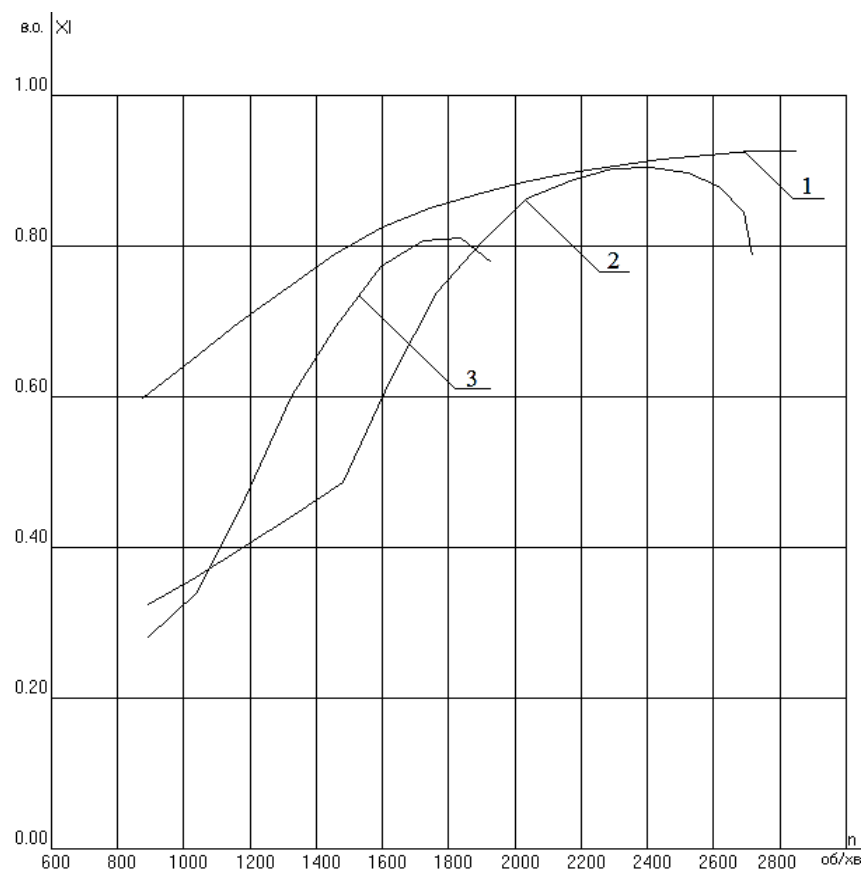


Рис. 3.4 – Коефіцієнт потужності при тривалій роботі на вентиляторне навантаження двигунів 4A100L2 (1), 4A100L4 (2), 4A100L6 (3)

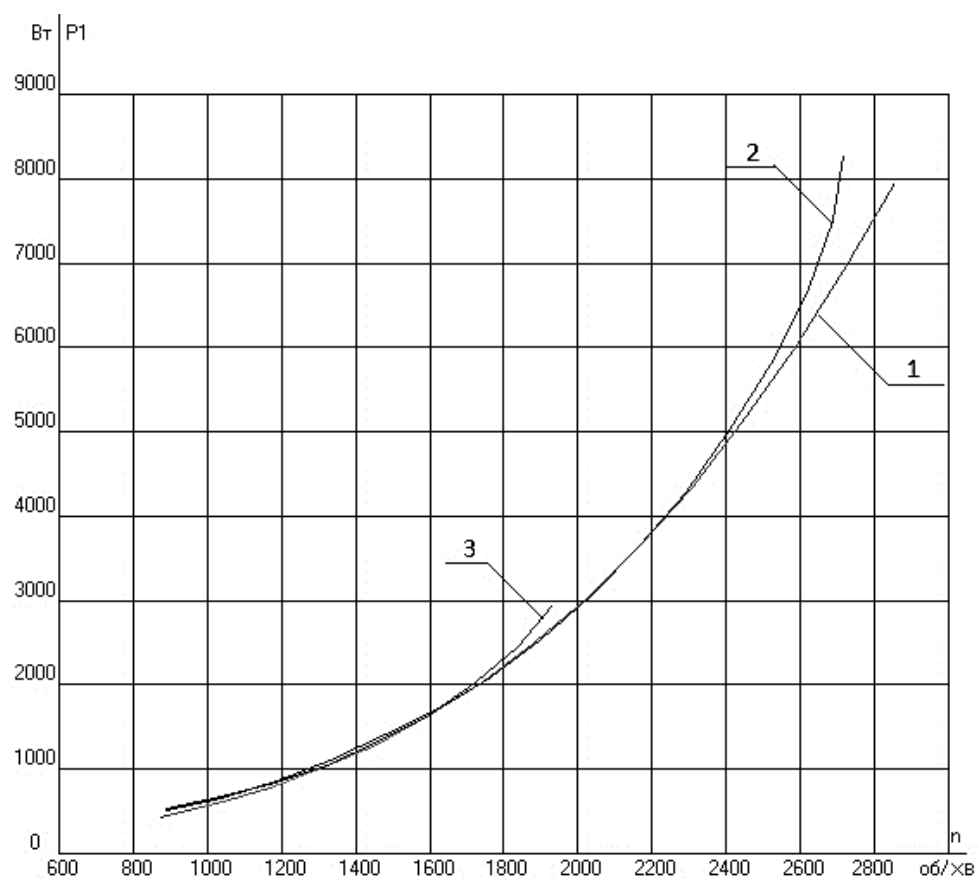


Рис. 3.5 – Споживана потужність при тривалій роботі на вентиляторне навантаження двигунів 4A100L2 (1), 4A100L4 (2), 4A100L6 (3)

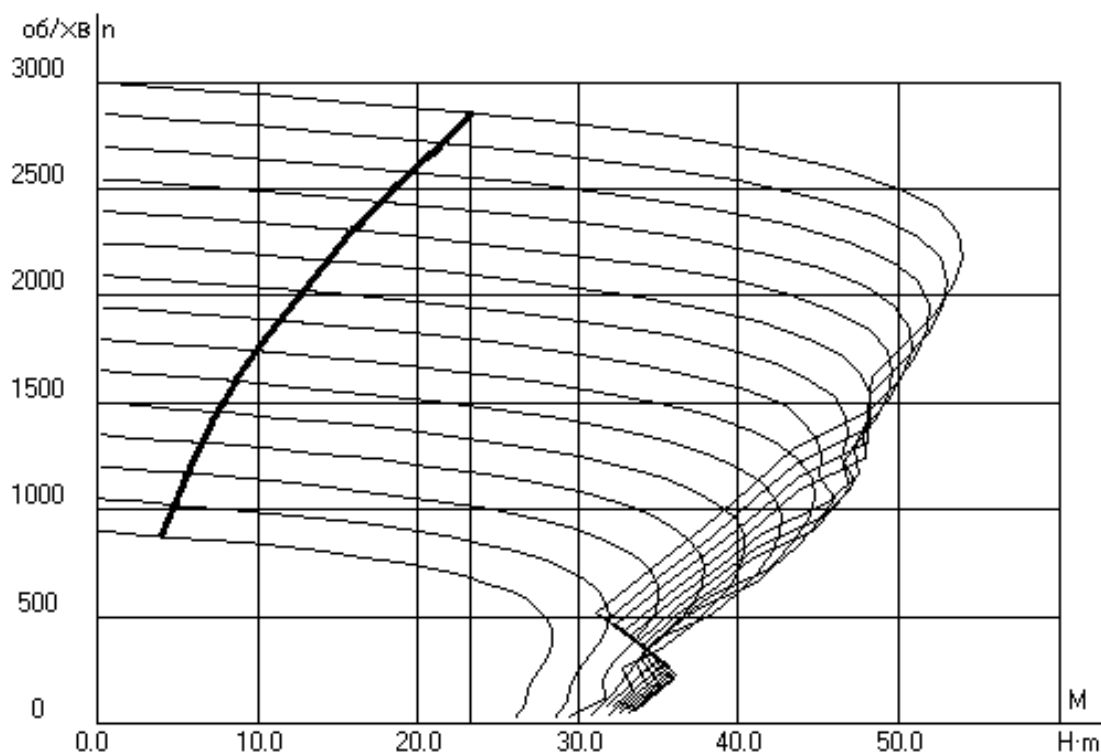


Рис. 3.6 – Сімейство механічних характеристик двигуна 4A100L2

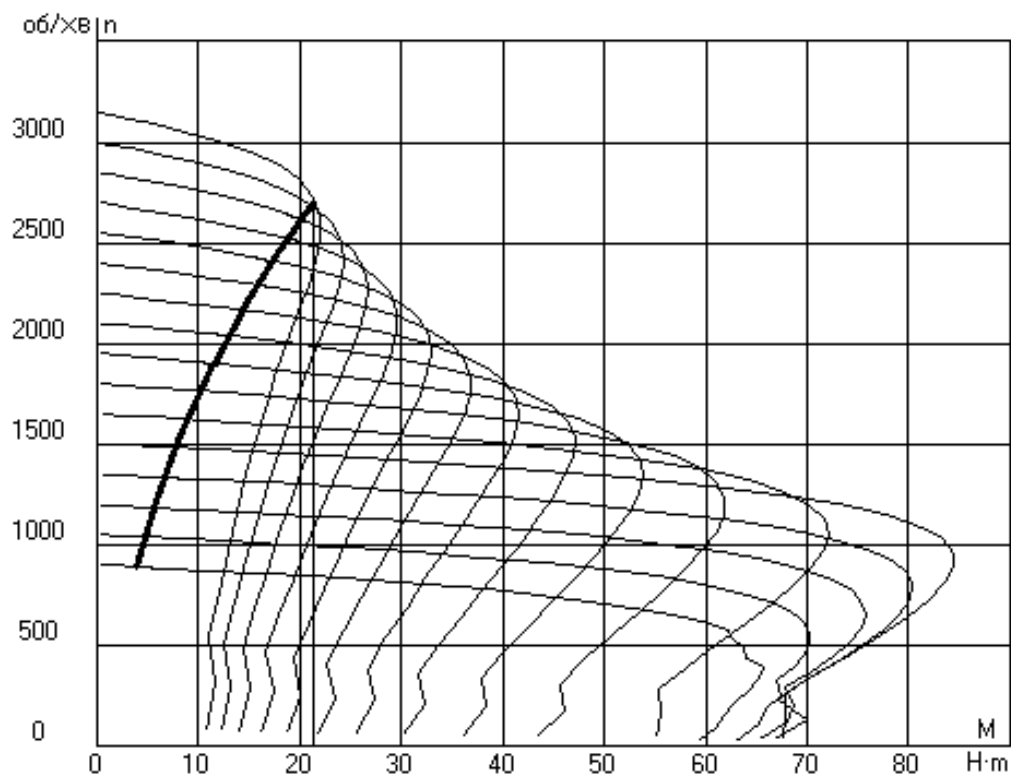


Рис. 3.7 – Сімейство механічних характеристик двигуна 4A100L4

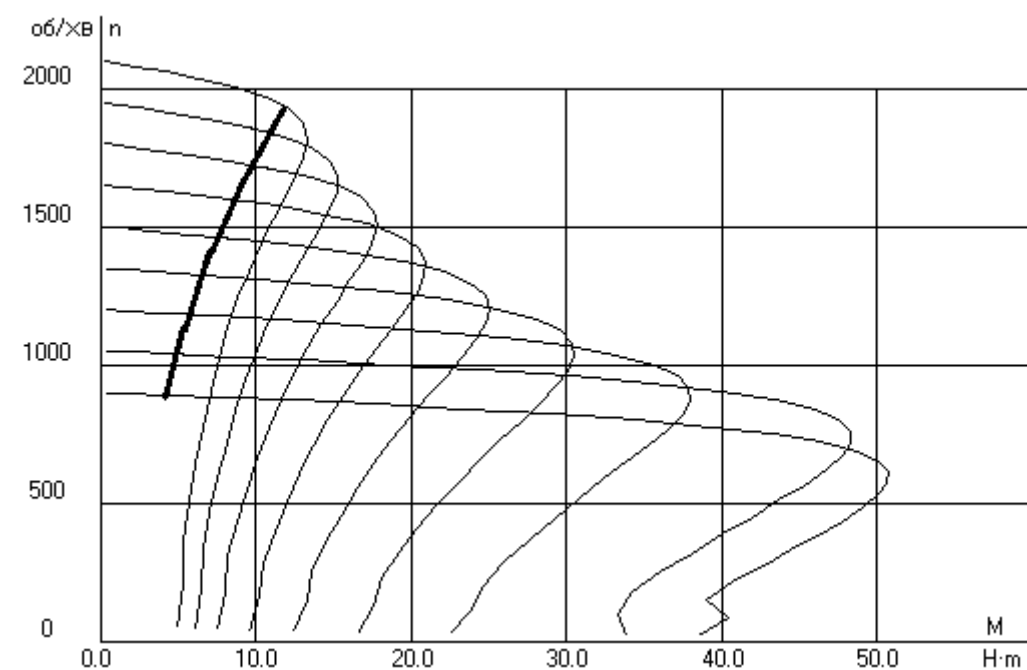


Рис. 3.8 – Сімейство механічних характеристик двигуна 4A100L6

Судячи з отриманих характеристик, можна зробити висновок – найкращі показники має асинхронний частотно – керований короткозамкнений двигун 4A100L2. Інші мають гірші показники внаслідок неузгодження номінальних частот і напруг із діапазоном регулювання. Для узгодження необхідні нові асинхронні

двигуни із новими обмотками, спроектованими для роботи в потрібному діапазоні керування.

3.3. Розрахунок обмоткових даних для двигунів із новими номінальними частотами

Проаналізувавши характеристики, наведені на рис.3.1 – рис. 3.8 можна побачити, що недостатньо лише живлення від напівпровідникових перетворювачів частоти серійних двигунів 4A100L4 та 4A100L6 для можливості роботи в заданому діапазоні і отриманні задовільних показників. Тому слід розрахувати нові обмоткові дані за умов, що $W \cdot f = const$ та $S_{II} \cdot d_{из}^2 = const$. Забігаючи вперед, можна зробити висновок, що двигун типу 4A100L4 з оптимізованими обмотковими даними показав найкращі показники в роботі з вентиляторним навантаженням, тому модернізація обмотки і вибір оптимальних нових параметрів буде на основі двигуна 4A100L4. Нові обмоткові дані представлені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Нові обмоткові дані двигуна 4A100L4

$f, \Gamma\text{ц}$	50	60	75	100
W	168	144	108	84
S_{II}	28	24	18	14
$d_{\Gamma} / d_{из}$	1.3/1.38	1.4/1.48	1.2/1.28	1.3/1.38
n/a	1/1	1/1	2/1	2/1

3.4. Результати моделювання та ефективність оптимізованих обмоток двигуна 4A100L4

Результати моделювання двигуна 4A100L4 з новими обмотками та різні їх конфігурації представлені на рис. 3.9 – рис. 3.13.

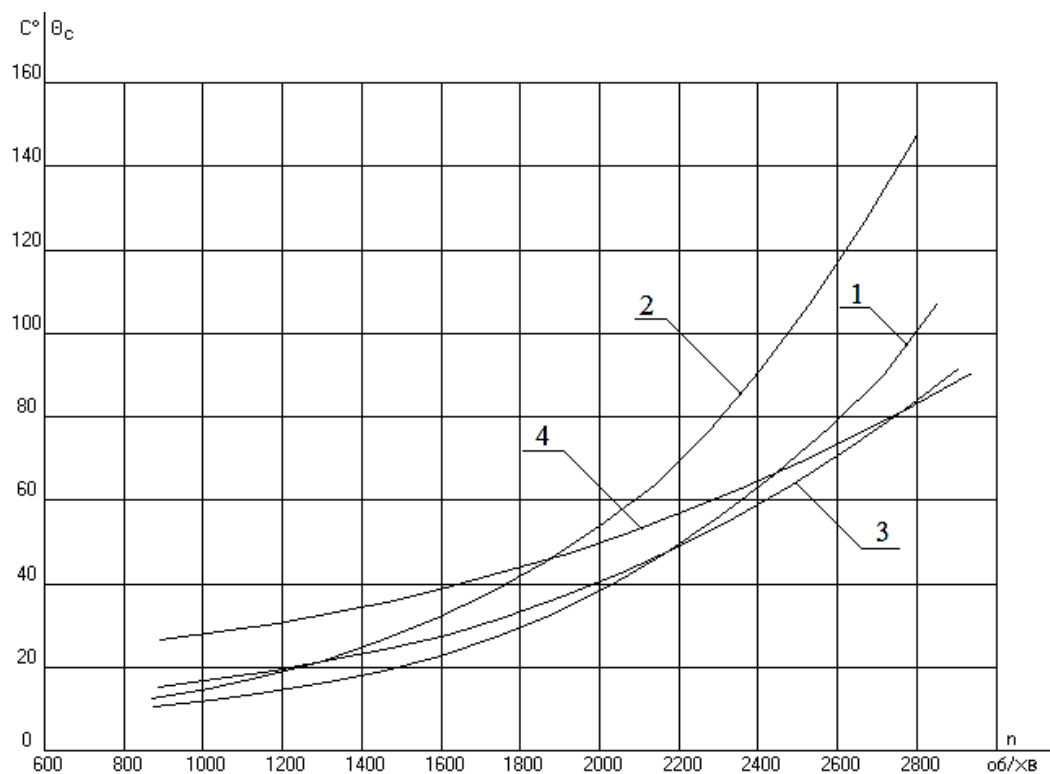


Рис. 3.9 - Перегрів обмотки статора при тривалій роботі на вентиляторне навантаження серійного двигуна 4A100L4 (1) та з оптимізованою обмоткою на 60Гц (2), 75Гц (3) та 100Гц (4)

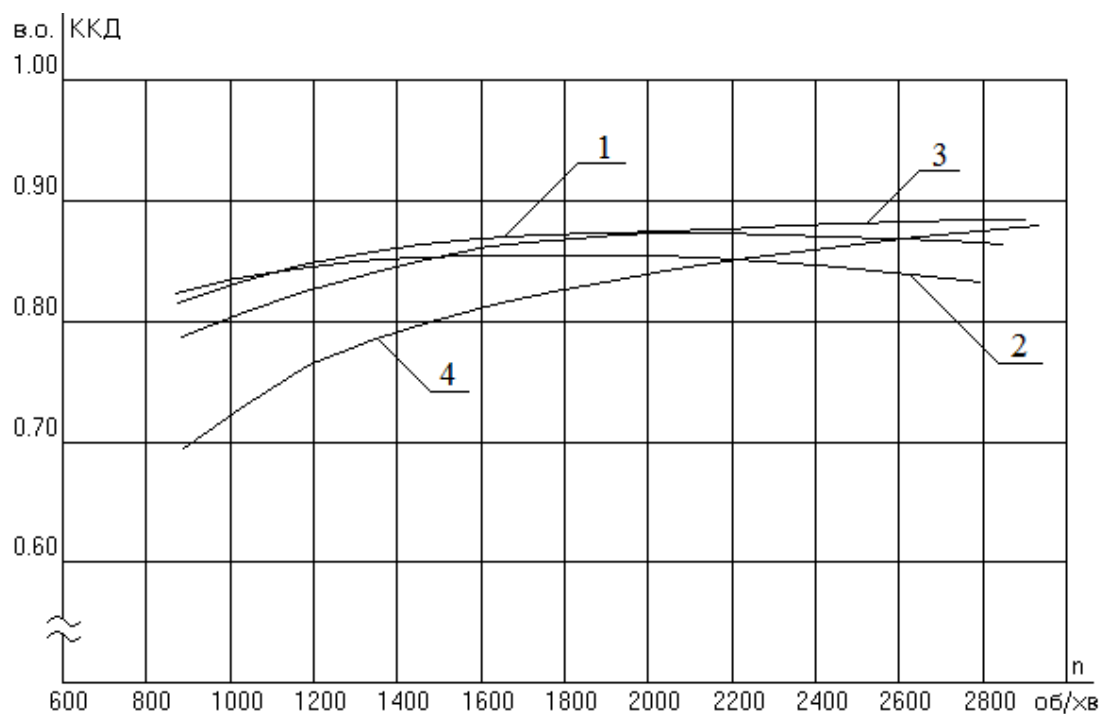


Рис. 3.10 – Коефіцієнт корисної дії при тривалій роботі на вентиляторне навантаження серійного двигуна 4A100L4 (1) та з оптимізованою обмоткою на 60Гц (2), 75Гц (3) та 100Гц (4)

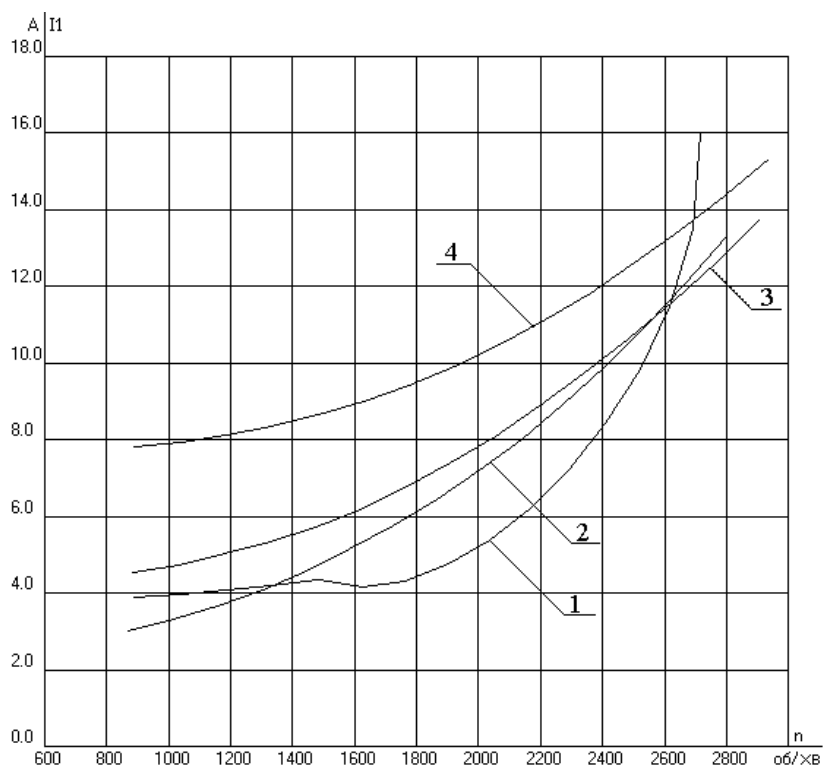


Рис. 3.11 – Фазний струм при тривалій роботі на вентиляторне навантаження серійного двигуна 4A100L4 (1) та з оптимізованою обмоткою на 60Гц (2), 75Гц (3) та 100Гц (4)

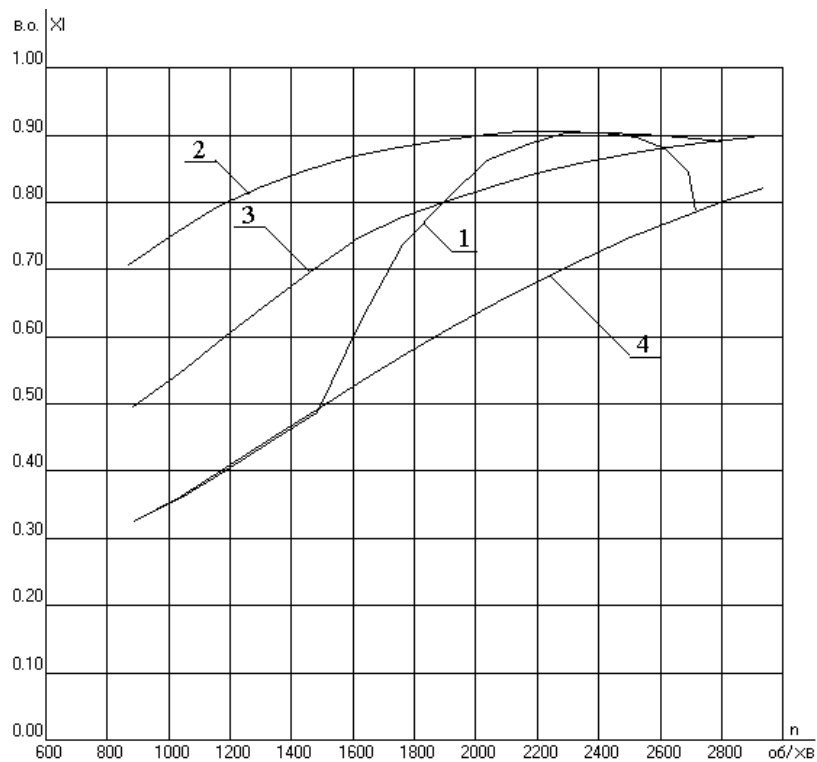


Рис. 3.12 – Коефіцієнт потужності при тривалій роботі на вентиляторне навантаження серійного двигуна 4A100L4 (1) та з оптимізованою обмоткою на 60Гц (2), 75Гц (3) та 100Гц (4)

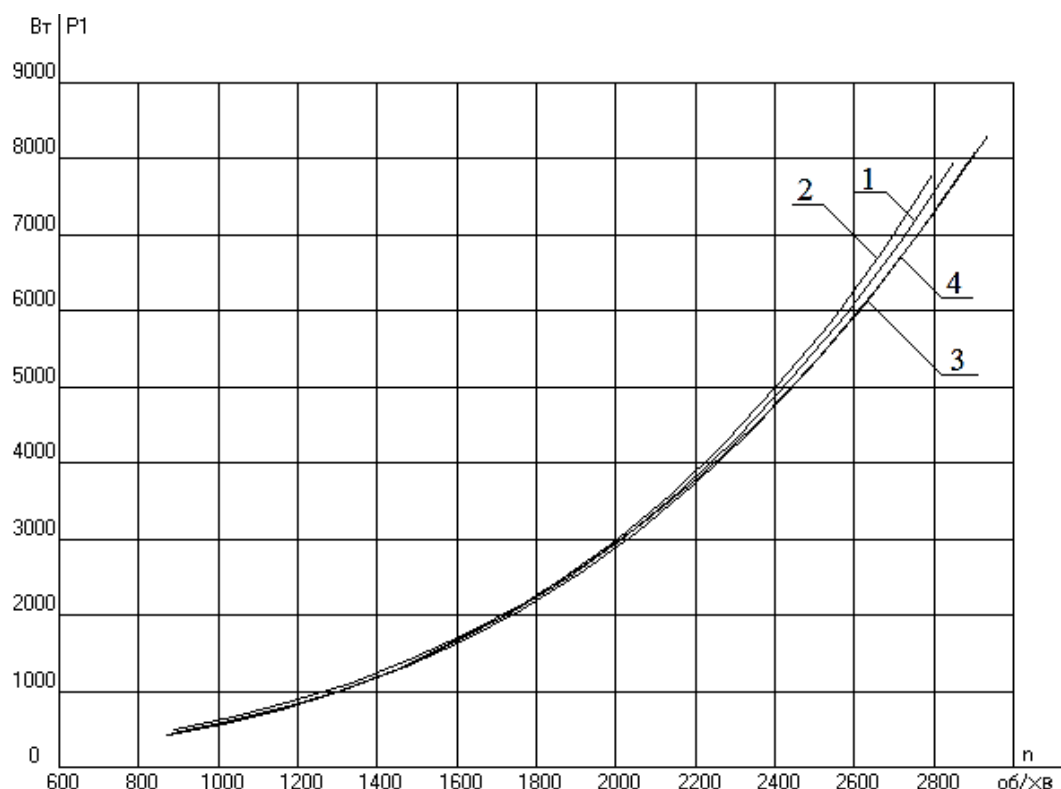


Рис. 3.13 – Споживана потужність при тривалій роботі на вентиляторне навантаження серійного двигуна 4A100L4 (1) та з оптимізованою обмоткою на 60Гц (2), 75Гц (3) та 100Гц (4)

Проаналізувавши характеристики, можна побачити, що двигун з новими обмотками на 75Гц має найліпші показники ККД в діапазоні від 1500 до 2880 об/хв., найліпші показники коефіцієнта потужності в діапазоні від 2700 до 2880 об/хв., непогані показники фазного струму та споживаної потужності на всьому діапазоні керування серед останніх конфігурацій нових обмоток для двигуна 4A100L4.

3.5. Порівняння характеристик серійного двигуна та двигуна з оптимізованою обмоткою при живленні від напівпровідникового перетворювача частоти

Порівняння характеристик серійного двигуна та двигуна з новою обмоткою при живленні від напівпровідникового перетворювача частоти представлені на рис. 3.14 – рис. 3.18.

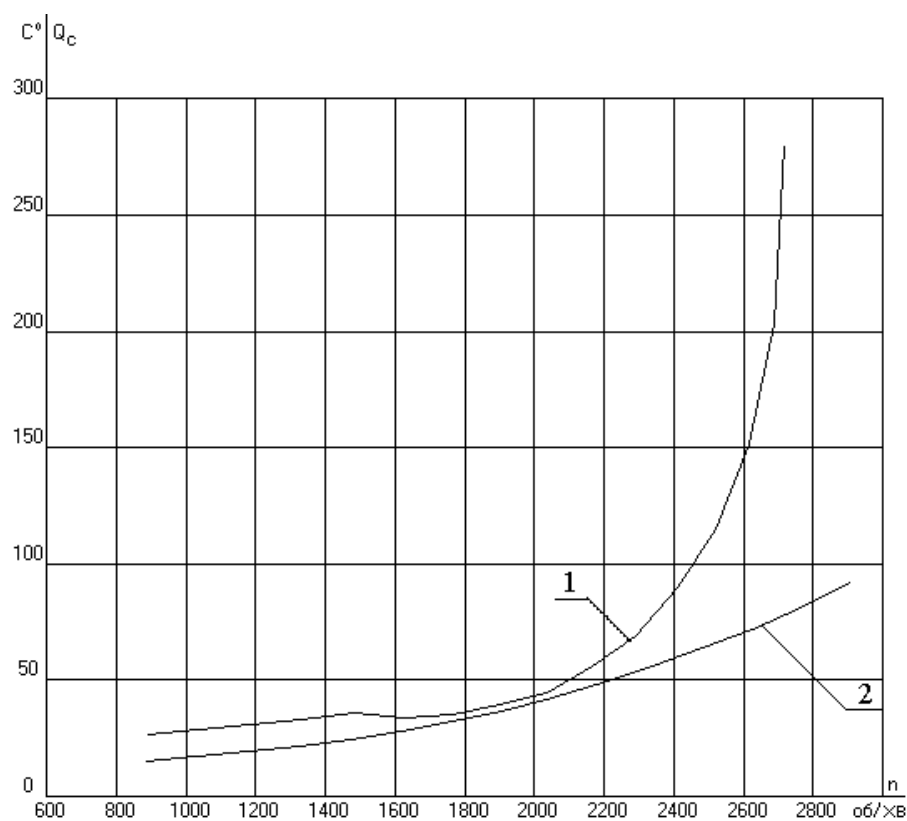


Рис. 3.14 – Перегрів обмотки статора при тривалій роботі на вентиляторне навантаження серійного двигуна 4A100L4 (1) та двигуна з оптимізованою обмоткою на 75Гц (2)

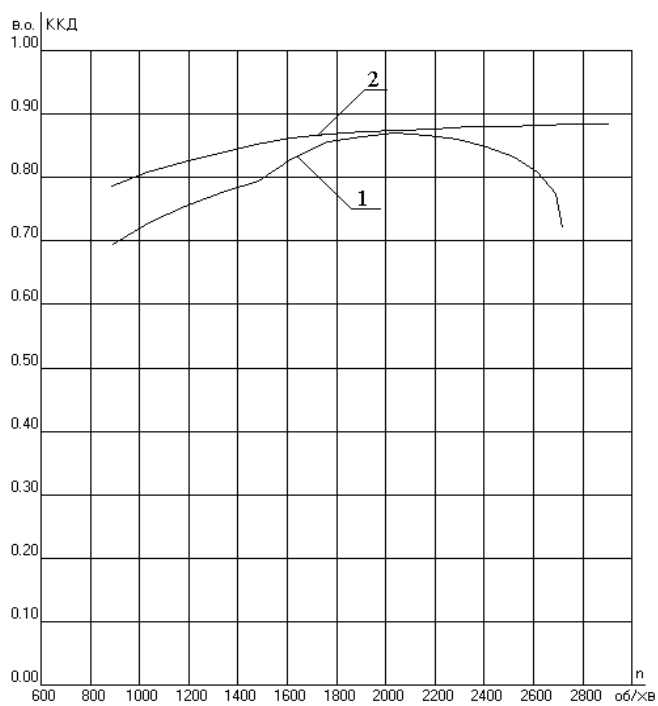


Рис. 3.15 – ККД при тривалій роботі на вентиляторне навантаження серійного двигуна 4A100L4 (1) та двигуна з оптимізованою обмоткою на 75Гц (2)

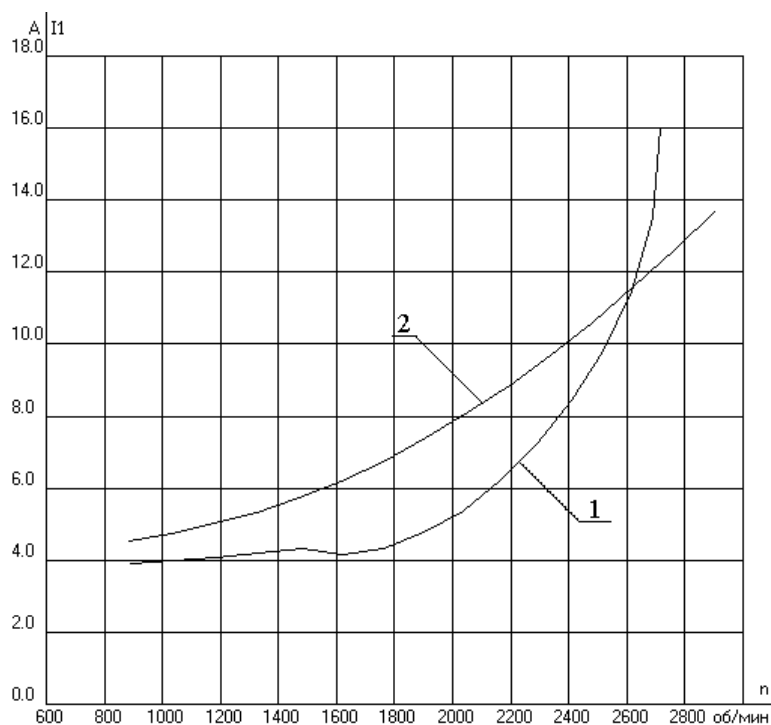


Рис. 3.16 – Фазний струм при тривалій роботі на вентиляторне навантаження серійного двигуна 4A100L4 (1) та двигуна з оптимізованою обмоткою на 75Гц (2)

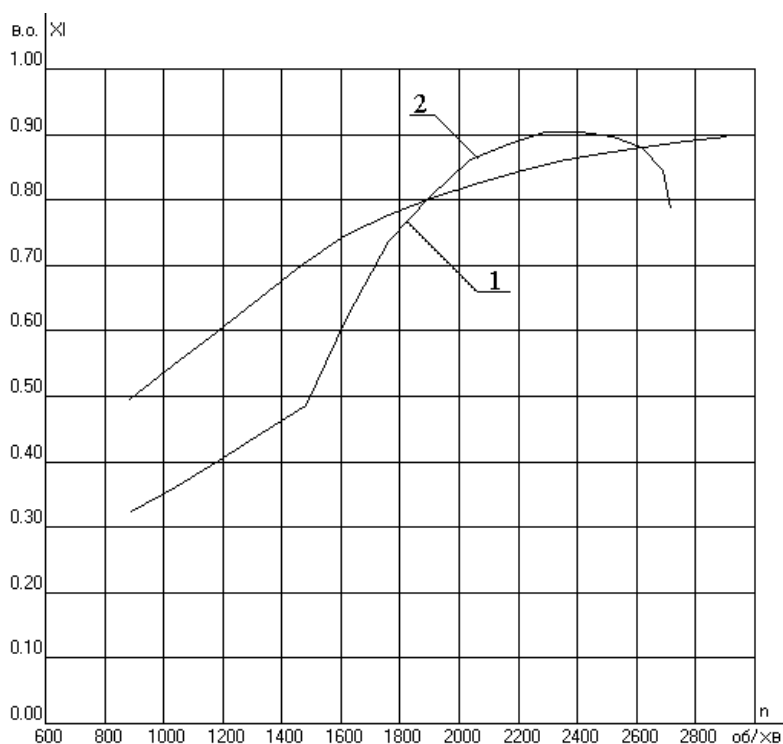


Рис. 3.17 – Коефіцієнт потужності статора при тривалій роботі на вентиляторне навантаження серійного двигуна 4A100L4 (1) та двигуна з оптимізованою обмоткою на 75Гц (2)

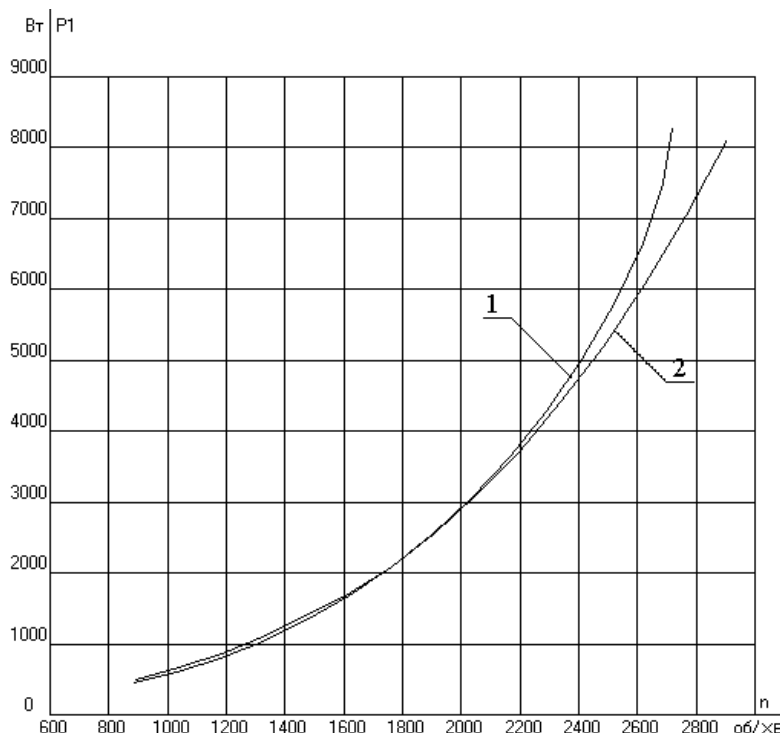


Рис. 3.18 – Споживана потужність статора при тривалій роботі на вентиляторне навантаження серійного двигуна 4A100L4 (1) та двигуна з оптимізованою обмоткою на 75Гц (2)

Проаналізувавши графіки, можна побачити, що перегрів обмотки статора двигуна з оптимізованою обмоткою залишається у межах регламентованих класом ізоляції і значенням у $Q=90^{\circ}\text{C}$ у точці із $n=2880$ об/хв. на відміну від серійного двигуна. Оптимізація обмотки статора серійного двигуна покращила майже всі показники серійного двигуна, що говорить те, що двигун, спроектований для роботи з напівпровідниковим перетворювачем частоти здатний показати на балато ліпші показники ніж серійний. З урахуванням вищесказаного можна рекомендувати АД 4A100L4 для роботи у складі частотно-керованого приводу вентиляційній установці середнього тиску типу ВР 288-46-2,5 у діапазоні 1000...2880 об/хв із базовими значеннями фазної напруги 220 В та частоти 75 Гц.

Висновки до розділу 3

Задачею дипломної роботи, пов'язаного із модернізацією радіального вентилятора середнього тиску типу ВР 288-46-2,5 була заміна електроприводу

радіального вентилятора із нерегульованим асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором на частотно-керований електропривод на базі асинхронного короткозамкненого двигуна 4A100L4 .

Також були розраховані робочі, механічні та регульовальні характеристики двигунів 4A100L2, 4A100L4, 4A100L6 в складі частотно - регульованого електроприводу. На їх базі було спроектовано частотно - регульовані модифікації із покращеними енергетичними показниками.

Проаналізувавши результати моделювання можна зробити декілька висновків:

1. Асинхронний двигун має високі енергетичні показники при живленні від перетворювача частоти в усьому діапазоні регулювання, тобто впровадження регульованого приводу є економічно вигідним.
2. Асинхронний двигун доцільно перепроєктувати (адаптувати до умов живлення від перетворювача частоти), що і було показано на прикладі двигуна 4A100L4.
3. При виборі остаточного варіанту найліпшого за характеристиками двигуна слід враховувати не лише середньдіапазонний ККД, а й середньо діапазонну споживну потужність, особливо у вентиляторних установках.

4. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ ВЕНТИЛЯЦІЇ ПРИМІЩЕНЬ НАДБУДОВИ ТАНКЕРУ

В судновій системі вентиляції необхідно забезпечити спільний приплив повітря на всі приміщення надбудови танкеру. На припливному, а також на витяжних каналах повинні стояти жалюзійні клапани, що контролюються на відкриття при роботі усіх систем та закриття при зупинці роботи (наприклад у випадку пожежі).

На припливному каналі має стояти фільтр для запобігання попадання сміття у вентиляційний канал. Контроль стану фільтра необхідно здійснювати за допомогою пресостату (датчик перепаду тиску), при спрацюванні якого, фільтр необхідно змінювати (або чистити). На припливному вентиляторі необхідно встановити датчик перепаду тиску для індикації роботи вентилятора.

Контроль температури припливного повітря відбувається за допомогою електрокалориферу та компресорно-конденсаторного модуля, сигналізація температури припливного каналу має відбуватися за допомогою датчика температури.

Для керування швидкістю обертання вентиляторів використаний датчик потоку повітря (витратомір), який встановлюється біля кожного з радіальних вентиляторів та налаштовується під конкретний вентилятор. В такому датчику налаштовується пограничне значення потоку (витрат), та, як правило, час спрацювання. В окремих типах витратомірів налаштовуються параметри ПІ-регулятора. Такі витратоміри зазвичай використовуються з вентильними двигунами, в платі керування яких відсутній функціонал ПІ-регулятора, але вони є дорожчими за попередні. Працюють такі датчики потоку наступним чином, датчик визначає поточний потік (витрату) повітря і видає сигнал 0-10 В (або 4-20 мА) для визначення напрямку завдання на керування двигуном. Якщо витратоміри не мають функціоналу ПІ-регулятора тоді данні про наявні витрати повітря передаються в частотний перетворювач, або на плату керування, де присутній регулятор, і де вираховується потрібна швидкість обертання двигуна.

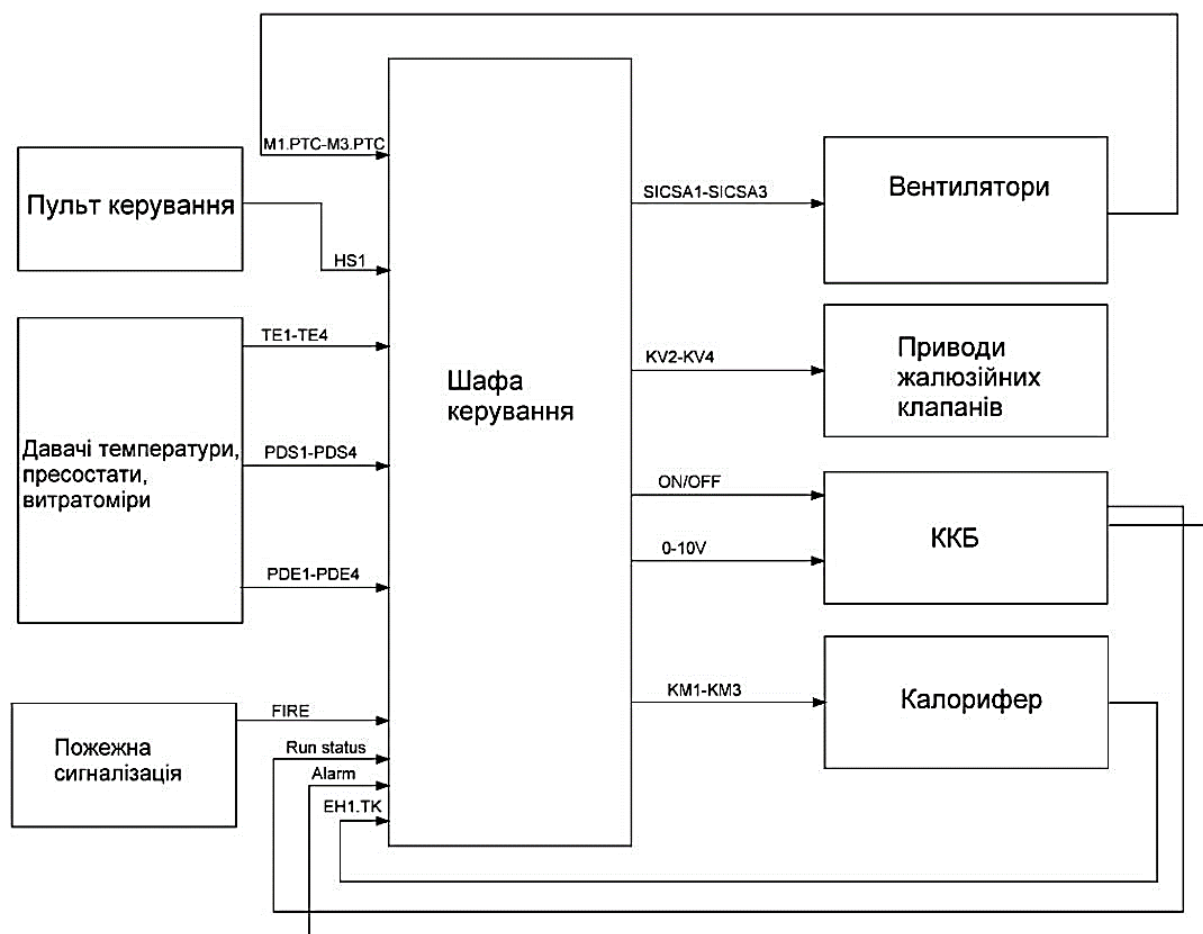


Рис. 4.1 - Структурна схема алгоритму роботи електромеханічної системи вентиляції приміщень надбудови танкеру

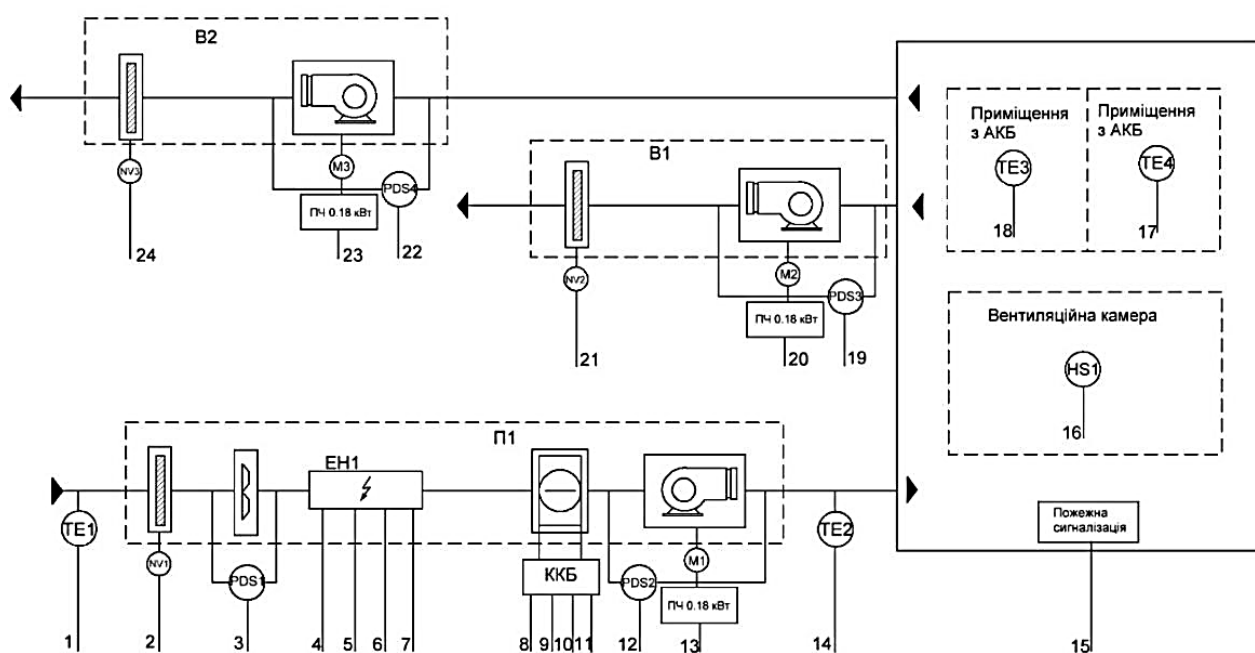


Рис. 4.2 – Функціональна схема системи вентиляції приміщень надбудови танкеру

Для керування електромеханічною системою вентиляції приміщень надбудови танкеру може бути обрано програмований контролер Modicon M340 [5], який має багатофункціональну операційну систему, сумісною з сімейством пристроїв фірми Schneider Electric, що включає програмовані контролери, термінали користувача, шлюзи, пристрої зв'язку та пристрої віддаленого керування. Ці пристрої являють собою потужну систему керування, яку можна легко поєднати з більшістю суднових систем керування.

Програмування контролерів Modicon M340 можна виконувати в середовищі розробки EcoStruxure Machine Expert. В середовищі розробки є можливість використання кількох мов програмування відповідно до правил ІЕС 61131-3 (стандарт програмування для промислового керування), дозволяє легко розробляти нові алгоритми, цілі програми, які потім можна завантажувати на контролери M340 через ПК та кабель програмування.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі сформовані підходи до створення енергоефективної системи вентиляції приміщень надбудови танкеру на базі частотно-керованих асинхронних електроприводів з використанням програмованих контролерів.

Задачею дипломної роботи, пов'язаного із модернізацією радіального вентилятора середнього тиску типу ВР 288-46-2,5 була заміна електроприводу радіального вентилятора із нерегульованим асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором на частотно-керований електропривод на базі асинхронного короткозамкненого двигуна 4A100L4 . Також були розраховані робочі, механічні та регульовальні характеристики двигунів 4A100L2, 4A100L4, 4A100L6 в складі частотно - регульованого електроприводу. На їх базі було спроектовано частотно - регульовані модифікації із покращеними енергетичними показниками.

Проведені основні дослідження можуть бути узагальнені наступними висновками:

1. За результатами розрахунків моменту навантаження системи вентиляції, моделювання та оптимізації параметрів асинхронного двигуна за допомогою програми DIMASdrive розроблена математична модель частотно-керованої електромеханічної системи вентиляції, що може використовуватись при створенні енергоефективних судових систем вентиляції.
2. Асинхронний двигун має високі енергетичні показники при живленні від перетворювача частоти в усьому діапазоні регулювання, тобто впровадження регульованого приводу є економічно вигідним. Асинхронний двигун доцільно перепроєктувати (адаптувати до умов живлення від перетворювача частоти), що і було показано на прикладі двигуна 4A100L4.
3. При виборі остаточного варіанту найліпшого за характеристиками двигуна слід враховувати не лише середньодіапазонний ККД, а й середню діапазонну споживну потужність, особливо у вентиляторних установках.
4. Розроблену математичну модель управління частотою обертання асинхронно-керованого приводу вентилятора за зворотним зв'язком за витратами повітря та відповідний алгоритм автоматизації можна використати

при програмуванні логічних контролерів, наприклад, в середовищі розробки EcoStruxure Machine Expert.

5. Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в розробці системи керування судновою вентиляцією, що забезпечує керування швидкістю вентилятора, плавне регулювання потужності системи суднової вентиляції.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Austin Hughes, Bill Drury. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications 5th Edition. Newnes, 2019. - 511 p.
2. Енергоефективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення. Монографія/Загірняк М.В., Клепиков В.Б., Ковбаса С.М., Михальський В.М., Пересада С.М. Садовой О.В., Шаповал І.А. – Київ, Інститут електродинаміки НАН України, 2018. – 310 с. ISBN 978-966-02-8403-6.
3. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інші. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інші. – К.: Либідь, 2005. Ч1.– 397 с.; Ч2. – 680 с.
4. Казачковський М.М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: навч. посіб. [Електронний ресурс] / М.М. Казачковський ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Електрон. текст. дані. – 2-ге вид., випр. та допов. – Дніпро.: НГУ, 2017. – 324 с. – Режим доступу: <http://nmu.org.ua>
5. Мікроконтролер Modicon M 340. Доступний на сайті: <https://www.se.com/il/en/product-range/1468-modicon-m340>
6. Бондарь Е.С., Гордієнко А.С., Михайлов В.А., Німич Г.В.. Автоматизація систем вентиляції та кондиціонування повітря. ТОВ «Видавничий будинок «Аванпост-Прим» 2005. – 560 с.
7. Моделирование электроприводов: Навч. Посібник /Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз. Я.С. Паранчук. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 404 с.
8. DIMASdrive ver 1.7 - Проектування високоефективних асинхронних двигунів для регульованих електроприводів – Автор проф. Петрушин В.С.
9. M. Mukha PLC-based ship's electromechanical systems laboratory / M. Mukha, A. Drankova, V. Bousher, A. Shestaka// Proceedings of the 13-th International Conference on the Engine Room Simulators, September, 20-21. – Odessa, Ukraine: National University “Odessa Maritime Academy”, 2017. – pp. 183-190, ISBN 978-966-7591-72-4.

10. Mukha M., Drankova A., Krasovskyi I. /The experimental installation for the study and research of electromechanical systems energy-efficient modes // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of automated electrodrive. Theory and practice. Collection of Scientific papers. – Kharkiv NTU "KhPI", No. 4 (1358). – 2020. P.67-71. doi: 10.20998/2079-8024.2020.4.11.
11. Energy efficiency handbook. Toward zero emission ship operations. Helsinki: ABB Marine & Ports, 2020. – 196 p. 9AKK107680A8255 1.9.2020.
<https://new.abb.com/marine/energy-efficiency-handbook>
12. Study of Greenhouse Gas Emissions from Ships. Final Report to the International Maritime Organization. Issue no. 2 – 31 March 2000. – 169 p.
13. DNV GL. 2015. EFFICIENCY FINDER. Accessed Feb 2015.
<http://www.dnvgl.com/maritime/enhanceperformance/efficiency-finder.aspx>.
14. How to Optimize Time-Synchronization and Data Recording for EcoStruxure™ Power Digital Applications. Technical Guide. Ref: ESXP2TG001EN 11/2019.
<https://www.se.com/ww/en/download/document/ESXP2TG001EN>
15. Marine air conditioning and ventilation plant. HANJIN HEAVY INDUSTRIES & CONSTRUCTION Co., Ltd. HHIC NCP0153. – 824 p.