МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАОЧНОЇ ФОРМИ ЗДОБУТТЯ ОСВІТИ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему: Підвищення енергоефективності електропривода витяжного вентилятора

Виконав: студент 4 курсу
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)
А.О. Славогородський
(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доц., Дьяченко В.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент к.т.н., доц., Башлій С.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут заочної форми здобуття освіти
Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва)
Спеціалізація
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
В.О. к.т.н., доц. Д.М. Морозов
«_____» 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Славогородський Андрій Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи: Підвищення енергоефективності електропривода витяжного вентилятора
керівник роботи Дьяченко В.В., к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «23» 12 2025 року № 1833 - с
2 Строк подання студентом роботи 20 травня 2026 р.
3 Вихідні дані до роботи: Технічна характеристика, навантажувальні діаграми роботи електропривода, характеристика існуючої системи керування електроприводом механізму вентиляційної установки
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналітичний огляд джерел та постановка задач дослідження 2) Розрахунок потужності двигуна та модернізація системи електропривода вентиляційної установки 3) Дослідження математичної моделі перетворювач частоти–асинхронний двигун (ПЧ-АД)
5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1) постановка задачі дослідження; 2) схема до реконструкції; 3,4) математичні моделі електропривода; 5) дослідження динамічних властивостей електропривода; 6) Графіки перехідних процесів

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Дьяченко В.В. к.т.н., доц.		
Розділ 2	Дьяченко В.В. к.т.н., доц.		
Розділ 3	Дьяченко В.В. к.т.н., доц.		

7 Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд джерел та постановка задач дослідження	10.03.2026	
2	Розрахунок потужності двигуна та модернізація системи електропривода вентиляційної установки	10.04.2026	
3	Дослідження математичної моделі перетворювач частоти–асинхронний двигун (ПЧ-АД)	15.05.2026	

Студент _____ А.О.Славогородський
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ В.В. Дьяченко
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ С.В. Башлій
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Славогородський Андрій Олександрович: Тема роботи: Підвищення енергоефективності електропривода витяжного вентилятора

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти бакалавра за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник к.т.н., доц., Дьяченко В.В.,. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні заочної форми здобуття освіти. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2026.

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання підвищення енергоефективності електропривода витяжного вентилятора промислової вентиляційної установки шляхом модернізації існуючої системи керування та впровадження сучасного частотно-регульованого електропривода. Актуальність теми дослідження обумовлена постійним зростанням вартості електроенергії, необхідністю зниження енерговитрат промислових підприємств, а також потребою підвищення ефективності функціонування електромеханічних систем вентиляції. Значна частина електроенергії у промисловості витрачається саме на електроприводи насосів, компресорів і вентиляторів, тому модернізація таких систем є важливим напрямом енергозбереження та підвищення конкурентоспроможності виробництва.

У роботі проведено аналітичний огляд науково-технічних джерел, присвячених питанням енергозбереження в системах електропривода турбомеханізмів. Встановлено, що більшість вентиляційних установок на промислових підприємствах працює з використанням нерегульованих асинхронних двигунів, які експлуатуються у режимах неповного навантаження. Це призводить до нераціонального використання електроенергії, підвищення

механічних навантажень, погіршення умов роботи обладнання та збільшення експлуатаційних витрат. Досліджено вплив якості електричної енергії, аеродинамічного опору мережі, режимів роботи вентилятора та параметрів навантаження на енергетичні характеристики електропривода.

Об’єктом дослідження є електропривод витяжного вентилятора промислової вентиляційної установки.

Предметом дослідження є процеси регулювання швидкості обертання, енергоспоживання та режими роботи асинхронного електропривода вентилятора при використанні частотного керування.

Метою роботи є підвищення енергоефективності електропривода витяжного вентилятора шляхом впровадження частотно-регульованого електропривода та оптимізації режимів його роботи відповідно до змінних умов технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети у роботі були вирішені такі задачі:

проведено аналіз сучасного стану систем вентиляції та електроприводів вентиляторних установок;

досліджено особливості технологічного процесу витяжного вентилятора;

виконано аналіз базової схеми електропривода вентилятора;

здійснено вибір шляхів модернізації системи керування;

виконано розрахунок параметрів вентилятора та приводного електродвигуна;

побудовано механічні характеристики вентилятора та асинхронного двигуна;

досліджено режими роботи електропривода при різних способах регулювання;

виконано вибір частотного перетворювача та розроблено схему його підключення;

оцінено енергетичну ефективність модернізованої системи електропривода.

У роботі досліджено технологічний процес роботи витяжного вентилятора ВЦ 4-75 №12,5, який використовується у системах промислової вентиляції для видалення забрудненого та нагрітого повітря з виробничих приміщень. Встановлено, що ефективність роботи вентилятора значною мірою залежить від параметрів вентиляційної мережі, аеродинамічного опору повітропроводів та режиму роботи електропривода. При збільшенні опору мережі або використанні дроселювання виникають додаткові втрати енергії, що негативно впливає на економічність системи вентиляції.

Для приводу вентилятора було розглянуто асинхронний двигун типу АДЧР225М8 потужністю 30 кВт. Виконано розрахунок основних параметрів електродвигуна та вентилятора, зокрема продуктивності, тиску, механічної потужності, моменту навантаження та механічних характеристик. Побудовано навантажувальні характеристики вентилятора та проведено аналіз роботи системи при зміні швидкості обертання робочого колеса. Дослідження показали, що для вентиляторних механізмів характерна квадратична залежність моменту навантаження від швидкості обертання, а споживана потужність змінюється пропорційно кубу швидкості. Саме тому навіть незначне зниження швидкості обертання вентилятора дозволяє суттєво скоротити споживання електроенергії.

У роботі виконано порівняльний аналіз двох способів регулювання продуктивності вентилятора: дроселювання та частотного регулювання. Встановлено, що при дроселюванні значна частина електричної енергії витрачається на подолання додаткового аеродинамічного опору, що призводить до низької енергоефективності системи. Натомість використання частотного перетворювача дозволяє змінювати швидкість обертання двигуна залежно від фактичної потреби у повітрообміні, забезпечуючи при цьому плавне регулювання, зниження пускових струмів та мінімізацію енергетичних втрат.

Для модернізації електропривода було обрано перетворювач частоти серії ALTIVAR 212 фірми Schneider Electric, який спеціально призначений для роботи у вентиляційних системах. У роботі розглянуто особливості його налаштування, схему підключення, функції захисту та можливості інтеграції у систему автоматичного керування вентиляційною установкою. Використання частотного перетворювача дозволяє реалізувати плавний пуск електродвигуна, автоматичне регулювання продуктивності вентилятора, зниження механічних навантажень та підвищення ресурсу роботи обладнання.

У процесі виконання роботи були використані методи математичного моделювання, теорії автоматизованого електропривода, електротехнічного аналізу, математичної статистики, чисельних методів та комп'ютерного моделювання. Для побудови механічних характеристик та дослідження режимів роботи електропривода використовувалися аналітичні залежності, математичні моделі асинхронного двигуна та програмні засоби розрахунку технічних параметрів.

Результати проведених досліджень підтвердили, що впровадження частотно-регульованого електропривода дозволяє значно підвищити енергоефективність вентиляційної установки, забезпечити стабільність технологічного процесу, скоротити експлуатаційні витрати та покращити умови експлуатації електромеханічного обладнання. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для модернізації промислових вентиляційних систем підприємств металургійної, гірничодобувної, машинобудівної та енергетичної галузей.

Ключові слова: електропривод, асинхронний двигун, витяжний вентилятор, вентиляційна установка, енергоефективність, частотний перетворювач, частотне регулювання, автоматизований електропривод, механічна характеристика, енергозбереження, вентиляційна система,

модернізація, асинхронний електродвигун, промислова вентиляція, регулювання швидкості.

ABSTRACT

Slavhorodskyi Andrii Oleksandrovych. Qualification thesis topic: **“Improving the Energy Efficiency of the Exhaust Fan Electric Drive.”** Bachelor’s qualification thesis in Specialty 141 “Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics.” Scientific supervisor – PhD in Engineering, Associate Professor V.V. Diachenko. Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebnia, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, 2026.

The qualification thesis considers the issue of improving the energy efficiency of the electric drive of an industrial exhaust fan ventilation system through modernization of the existing control system and implementation of a modern variable frequency drive. The relevance of the research topic is determined by the constant increase in electricity costs, the necessity to reduce energy consumption at industrial enterprises, and the need to improve the efficiency of electromechanical ventilation systems. A significant share of electrical energy in industry is consumed by electric drives of pumps, compressors, and fans; therefore, modernization of such systems is an important direction of energy saving and increasing industrial competitiveness.

The thesis presents an analytical review of scientific and technical literature devoted to energy saving issues in electric drive systems of turbomachinery. It was established that most industrial ventilation systems operate using unregulated induction motors functioning under partial load conditions. This leads to irrational electricity consumption, increased mechanical loads, deterioration of operating conditions, and growth of maintenance costs. The influence of power quality, aerodynamic resistance of the ventilation network, operating modes of the fan, and load parameters on the energy characteristics of the electric drive has been investigated.

The object of the research is the electric drive of an industrial exhaust fan ventilation system.

The subject of the research is the processes of speed control, energy consumption, and operating modes of the induction motor drive under variable frequency control conditions.

The purpose of the work is to improve the energy efficiency of the exhaust fan electric drive through the implementation of a variable frequency drive and optimization of its operating modes according to changing technological process conditions.

To achieve the stated goal, the following tasks were solved:

analysis of the current state of ventilation systems and fan electric drives;

investigation of the technological process of the exhaust fan;

analysis of the basic electric drive circuit;

selection of modernization methods for the control system;

calculation of fan and drive motor parameters;

construction of mechanical characteristics of the fan and induction motor;

investigation of operating modes under different control methods;

selection of a frequency converter and development of its connection scheme;

evaluation of the energy efficiency of the modernized electric drive system.

The operation process of the VTs 4-75 No. 12.5 exhaust fan used in industrial ventilation systems for removing polluted and heated air from industrial premises was studied in the thesis. It was established that the efficiency of the fan operation significantly depends on the parameters of the ventilation network, aerodynamic resistance of air ducts, and operating modes of the electric drive. When the network resistance increases or throttling control is applied, additional energy losses occur, negatively affecting the efficiency of the ventilation system.

An induction motor of type ADChR225M8 with a rated power of 30 kW was considered as the fan drive motor. The main parameters of the motor and the fan,

including capacity, pressure, mechanical power, load torque, and mechanical characteristics, were calculated. Load characteristics of the fan were constructed, and the operation of the system at different rotational speeds of the impeller was analyzed. The studies showed that fan mechanisms are characterized by a quadratic dependence of load torque on rotational speed, while power consumption changes proportionally to the cube of the speed. Therefore, even a slight reduction in fan speed significantly decreases electricity consumption.

A comparative analysis of two methods of fan capacity control was carried out: throttling control and variable frequency control. It was established that throttling causes a considerable part of electrical energy to be consumed for overcoming additional aerodynamic resistance, resulting in low energy efficiency. In contrast, the use of a frequency converter allows changing the motor speed according to the actual air exchange demand, ensuring smooth regulation, reduction of starting currents, and minimization of energy losses.

For modernization of the electric drive system, the ALTIVAR 212 frequency converter manufactured by Schneider Electric was selected. This converter is specifically designed for ventilation systems. The thesis considers its configuration features, connection diagram, protection functions, and possibilities of integration into the automatic control system of the ventilation installation. The implementation of the frequency converter enables smooth motor starting, automatic regulation of fan performance, reduction of mechanical stresses, and increase of equipment service life.

The research methods used in the thesis include mathematical modeling, electric drive theory, electrical engineering analysis, mathematical statistics, numerical methods, and computer simulation. Analytical dependences, mathematical models of induction motors, and software tools for technical calculations were used for constructing mechanical characteristics and investigating operating modes of the electric drive.

The obtained results confirmed that implementation of a variable frequency electric drive significantly improves the energy efficiency of the ventilation installation, ensures stable operation of the technological process, reduces operating costs, and improves the operating conditions of electromechanical equipment. The practical significance of the work lies in the possibility of applying the obtained results for modernization of industrial ventilation systems in metallurgical, mining, machine-building, and energy enterprises.

Keywords: electric drive, induction motor, exhaust fan, ventilation installation, energy efficiency, frequency converter, variable frequency control, automated electric drive, mechanical characteristic, energy saving, ventilation system, modernization, industrial ventilation, speed control.

ЗМІСТ

ВСТУП……...15

1 Аналітичний огляд джерел та постановка задач дослідження …….17

1.1 Аналіз стану питання за науково – технічними джерелами……17

1.2 Аналіз особливостей технологічного процесу витяжного вентилятора та його електропривода …….....18

1.3 Складання схеми базового електропривода вентилятора та її стислий опис .....……20

1.4 Вибір шляхів та постановка задачі модернізації і дослідження електропривода вентилятора …….....23

2 Розрахунок потужності двигуна та модернізація системи електропривода вентиляційної установки .....……..26

2.1 Вибір системи електропривода вентилятора ……....26

2.2 Розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна…....29

2.2.1 Побудова механічної характеристики та навантажувальної діаграми вентилятора……32

2.3 Модернізація системи регулювання витрати повітря вентилятора шляхом впровадження перетворювача частоти……35

2.3.1 Регулювання при постійній частоті обертання валу вентилятора дроселюванням……35

2.3.2 Регулювання витрати повітря вентилятора зміною швидкості обертання валу привода……..36

2.3.3 Вибір перетворювача частоти для електропривода вентилятора .39

2.3.4 Розрахунок параметрів схеми заміщення та побудова механічних характеристик частотного регулювання……..45

3 Дослідження математичної моделі перетворювач частоти—асинхронний двигун (ПЧ—АД)…….....53

3.1 Розробка математичної моделі перетворювача частоти……...53

3.2 Розробка математичної моделі асинхронного двигуна……....55
3.3 Дослідження результатів отриманих при моделюванні ПЧ−АД....59
3.4 Побудова математичної моделі визначення температури АД…….62
3.4.1 Визначення джерел тепла асинхронного двигуна……..62
3.4.2 Визначення зовнішніх факторів, що впливають на теплові процеси в асинхронному двигуні…….64
3.4.3 Створення математичної моделі визначення інтегральної температури асинхронного двигуна……..67
3.4.4 Дослідження впливу зміни частоти на теплові процеси в АД при живленні від ПЧ……..72
3.4.5 Енергозбереження……..76
ВИСНОВКИ……..……....78
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……..…..79

ВСТУП

Метою даної випускної роботи є дослідження динамічних властивостей та модернізація електропривода витяжного вентилятора.

У зв'язку з існуючою проблематикою енергозбереження на промислових підприємствах України все більша увага приділяється впровадженню заходів, здатних забезпечити виконання основних технологічних процесів зі значною економією енергоресурсів. На багатьох підприємствах широко використовується нерегульований електропривод, в якості основного обладнання якого більш ніж в 90% випадків застосовується асинхронний двигун(АД) з короткозамкненим ротором. Це обумовлено простотою конструкції останнього, і, як наслідок його високою надійністю, низькою вартістю і мінімальними експлуатаційними витратами. При організації електропостачання та електроспоживання існує одна загальна і досить серйозне завдання - поліпшення і оптимізація показників якості електричної енергії з метою підвищення ефективності її використання та забезпечення надійності роботи електрообладнання [1].

В даний час накопичений багатий досвід в області дослідження впливу якості електроенергії на роботу асинхронних двигунів. Низька якість електроенергії в цехах промислових підприємств зумовлює зростання прямих виробничих витрат внаслідок збільшення обсягів її споживання. Крім цього, зростають і непрямі витрати, пов'язані зі скороченням термінів служби електричних машин. Як відомо, нормативний термін експлуатації загально промислових асинхронних двигунів становить близько десяти років. Однак це відповідає тільки тим випадкам, коли дотримуються певні умови. Головним з них є відповідність теплового режиму електричної машини класу використовуваної ізоляції. Зниження якості електроенергії призводить до зростання втрат на перегріванні і, відповідно температури ізоляції. Це, в поєднанні з перевантаженнями, призводить до істотного скорочення терміну

служби електродвигунів. Внаслідок цього зменшуються техніко-економічні показники двигуна, такі як коефіцієнт потужності і коефіцієнт корисної дії і збільшується обсяг споживаної реактивної потужності.

Своєчасна оцінка показників якості електроенергії та забезпечення відповідних режимів експлуатації електрообладнання в конкретних умовах є важливим науково-практичним завданням.

Використовуючи регулювання частоти обертання приводних асинхронних двигунів можна значно знизити енергоспоживання вентиляторів. Доцільність застосування частотно-регульованого приводу для систем вентиляції досить повно обгрунтована численними дослідженнями. Ефективність таких систем підтверджена вітчизняним і зарубіжним досвідом.

Зачачею дослідження є розробка основ вибору ефективних та економічно доцільних засобів підвищення енергоефективності АД, які працюють в конкретних цехових мережах з неякісною електроенергією і розробка частотно-регульованого електроприводу вентиляційної установки з розширеним діапазоном регулювання.

При вирішенні завдань дослідження використовувалися теорія ймовірності, математична статистика, теорія диференціального обчислення, чисельного інтегрування, фундаментальні положення електротехніки - для складання математичних моделей асинхронного двигуна і перевірки їх адекватності.

1 Аналітичний огляд джерел та постановка задач дослідження

1.1 Аналіз стану питання за науково – технічними джерелами

Асинхронні двигуни турбомашин (насосних станцій, компресорних установок, вентиляторів тощо) використовують не менш 20-25% всієї виробленої електроенергії. Електроприводи зазначених механізмів, як правило, є нерегульованими, що не дозволяє забезпечити режим раціонального енергоспоживання й витрата води, пару, повітря й т.п. при зміні технологічних потреб у широких межах. Обрані, виходячи з максимальної продуктивності, ці механізми значну частину часу працюють з меншим навантаженням, що визначається зміною потреби в різні періоди роботи [2].

Специфічні умови формування енергобалансу з підвищеними рівнями всіх складових потужності (активної, реактивної та ін.) обумовлені [2, 3]: неефективним регулюванням турбомеханізмів (до 95 % насосних, компресорних, вентиляторних та ін. пристроїв цього класу обладнано нерегульованим електроприводом); неповним використанням силового обладнання (двигунів, перетворювачів, трансформаторів) по встановленій потужності та навантаженню; відсутністю ефективних за технічною реалізацією методів та засобів компенсації реактивних складових потужності, а також пристроїв та систем оперативного контролю споживання електроенергії безпосередньо в вузлах живлення та управління енергетичними об’єктами.

Робочі машини, агрегати та механізми без яких практично неможливо уявити не одне підприємство пройшли довгий шлях свого розвитку перш ніж прийняли вигляд сучасного обладнання.

Будь який виробничий агрегат або машина чи обладнання складається із значного числа різноманітних деталей, окремих частин та апаратів, які виконують окремі функції але всі вони у сукупності реалізують необхідний технологічний процес.

Невід’ємною складовою більшості робочих машин є електропривод робочих органів. Спочатку керування електроприводу будувалось на основі простих релейних елементів, потім вони ускладнювались, що призвело до розвитку автоматизованого електроприводу.

З появою можливості змінювати частоту обертання асинхронних двигунів завдяки застосуванню перетворювачів частоти з’явився регульований електропривод, який тривалий час вважався найбільш ефективним.

Останнім часом мікропроцесорні системи керування, побудовані на мікроконтролерах різного роду дозволяють перейти до наступного рівня - регульованого електроприводу [4].

Вкрай незадовільний рівень використання можливостей регулювання силових електроприводів турбомеханізмів призводить до підвищеного енергоспоживання і знижує конкурентоздатність вітчизняних виробництв.

Спільне використання сучасних схем регулювання витрат електроенергії силових електроприводів дозволяє підвищити конкурентоздатність продукції металургійного комплексу. Наявний науково-технічний потенціал вітчизняних розробок у галузі енергозбереження цілком достатній для забезпечення прогресу в галузі.

1.2 Аналіз особливостей технологічного процесу витяжного вентилятора та його електропривода

До складу установки вентилятора входять: безпосередньо вентилятор, підставка, фільтр, заслінка регулювання тиску повітря.

Технологічний процес роботи витяжного вентилятора є важливою складовою систем вентиляції промислових, комунальних та побутових об’єктів. Основним призначенням витяжного вентилятора є видалення

забрудненого, нагрітого або вологого повітря із приміщення та забезпечення необхідного повітрообміну відповідно до санітарно-гігієнічних і технологічних вимог. Ефективність його роботи безпосередньо впливає на мікроклімат приміщення, умови праці персоналу, безпеку технологічних процесів та енергетичні витрати підприємства.

Технологічний процес функціонування витяжного вентилятора базується на створенні різниці тисків між внутрішнім середовищем приміщення та вентиляційною системою. Під час роботи електродвигун приводить у рух робоче колесо вентилятора, яке створює розрідження у повітропроводі. Внаслідок цього забруднене повітря всмоктується через вентиляційні канали та транспортується за межі приміщення. При цьому характер руху повітряного потоку залежить від конструкції вентилятора, параметрів мережі повітропроводів, а також від аеродинамічного опору системи.

Однією з ключових особливостей технологічного процесу є залежність продуктивності вентилятора від параметрів вентиляційної мережі. Зі збільшенням опору повітропроводів, засміченням фільтрів або зміною конфігурації каналів знижується витрата повітря та підвищується навантаження на електропривод. Це може призводити до зростання енергоспоживання, перегріву електродвигуна та зниження загальної ефективності системи вентиляції.

Важливою особливістю роботи витяжного вентилятора є змінний характер навантаження. У реальних умовах експлуатації обсяг повітря, який необхідно видаляти, може змінюватися залежно від температури, вологості, концентрації шкідливих речовин або режиму роботи технологічного обладнання. Саме тому сучасні вентиляційні системи часто оснащуються автоматизованими системами керування, датчиками температури, тиску та якості повітря, а також частотними перетворювачами для регулювання швидкості обертання вентилятора.

Особливу увагу під час аналізу технологічного процесу приділяють

енергоефективності системи вентиляції. Значна частина електроенергії у промисловості витрачається саме на вентиляційне обладнання. Використання частотного регулювання дозволяє змінювати швидкість обертання вентилятора відповідно до поточних потреб системи та суттєво знижувати споживання електроенергії.

Також важливо враховувати механічні та експлуатаційні фактори: вібрації, дисбаланс робочого колеса, зношення підшипників, забруднення лопаток та вплив агресивного середовища. Ці фактори можуть призводити до аварійних режимів роботи, підвищення шуму та скорочення ресурсу обладнання.

Таким чином, технологічний процес витяжного вентилятора є складною електромеханічною системою, ефективність якої залежить від узгодженої роботи електропривода, вентиляційної мережі та систем автоматичного керування. Аналіз особливостей цього процесу дозволяє оптимізувати режими роботи обладнання, підвищити енергоефективність та забезпечити стабільне підтримання необхідних параметрів повітряного середовища.

Управління заслінкою здійснюється від диференціального датчика тиску, розташованого на задній стінці камери.

1.3 Складання схеми базового електропривода вентилятора та її стислий опис

На рисунку 1.1наведено принципову електричну схему електопривода.

Схема складається з силового кола і кола керування. У силове коло включені: автоматичний вимикач QF1, силові контакти магнітного пускача КМ1, нагрівальні елементи електротеплового реле КК1 і електродвигун М1.

У цьому колі можуть проходити великі струми до 100 А і більше.

У коло управління включаються котушки електромагнітних апаратів, режимів керування електроприводом, кнопки управління і апарати захисту ланцюга. У цьому колі струми не перевищують 1 А.

Перед початком пуску електродвигуна включають автоматичний вимикач QF1.

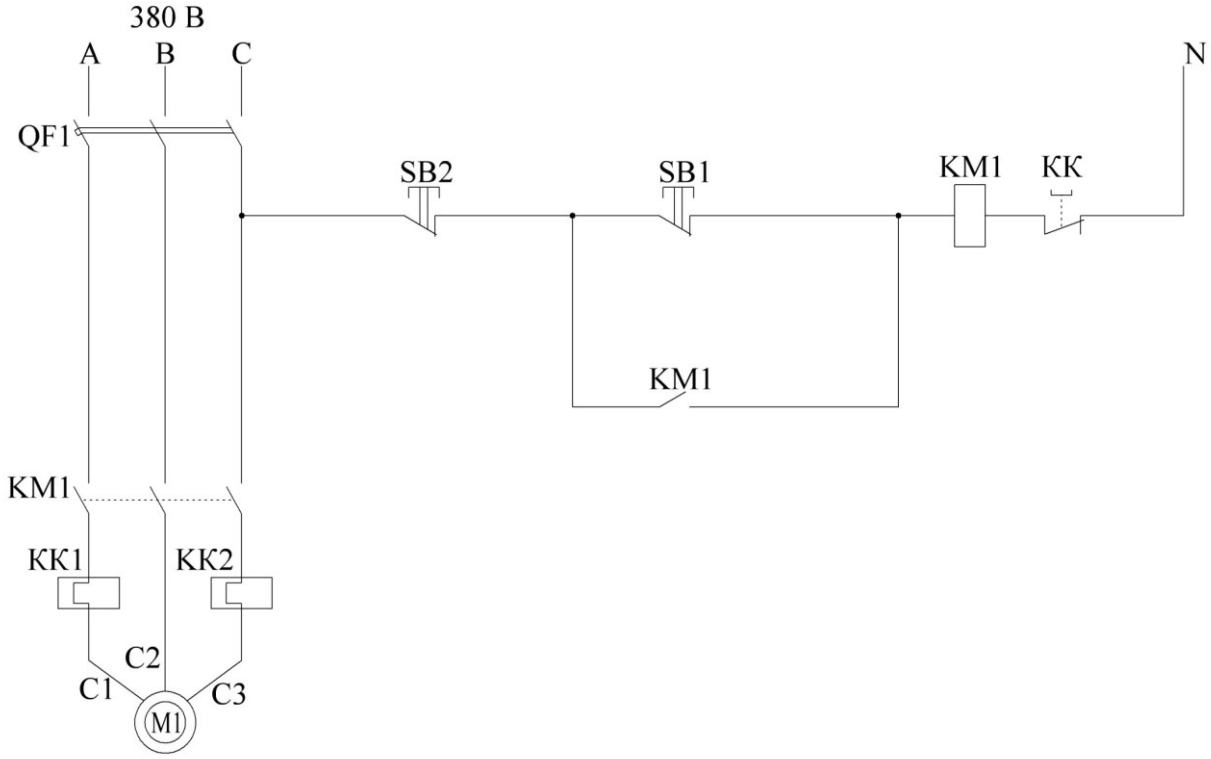


Рисунок 1.1 – Принципова електрична схема для керування електроприводом вентилятора

Включення електродвигуна М1 відбувається натискненням на кнопку управління SB1 (пуск) подається живлення на котушку магнітного пускача КМ1, який спрацьовує і замикає свої силові контакти КМ1 в колі електродвигуна М1.

Електродвигун включається в роботу і передає обертання до робочої машини, тобто до вентилятору. Одночасно замикаються блок-контакти КМ1 в колі управління, які шунтируют кнопку SB1.

Після цього кнопку SB1 можна відпустити. Струм на катушку КМ1 будет надходити через блок-контакт КМ1.

Для відключення електродвигуна М1 необхідімо натиснути на кнопку управленія SB2 (стоп), контакти якої розривають коло живлення катушки КМ1 і магнітний пускач відключається.

Всі його контакти приймають первинний стан.

Максимальний захист електродвигуна здійснюється електромагнітним розщеплювачем автоматичного вимикача QF1, а захист від перевантаження - електротепловим реле КК1 і тепловим розщеплювачем автоматичного вимикача QF1.

Захист від струмів короткого замикання ланцюга управління здійснюється плавким запобіжником FU.

В таблиці 1.1 наведені технічні данні асинхронного електродвигуна вентилятора, а в таблиці 1.2– технічні дані вентилятора ВЦ 4-75 №12,5

Таблиця 1.1 – Технічні дані асинхронного електродвигуна типу АИР225М8

Параметри двигуна	Значення параметра
Потужність, $P_н$	30 кВт
Частота обертання, $n_н$	735 об/хв
Номінальний струм, $I_н$	62,2 А
Коефіцієнт потужності, cosφ	0,81
ККД, $\eta_н$	90,5 %
Номінальна напруга , $U_н$	380 В
Тривалість включення, $ТВ_{ст}$	100 %

Таблиця 1.2 – Технічні дані вентилятора ВЦ 4-75 №12,5

Параметри вентилятора	Значення параметра
Діаметр робочого колеса, D_n	1250 мм
Ширина робочого колеса, b_2	800 мм
Швидкість обертання колеса, ω	690 об/хв

Кількість лопаток, z	12 шт
ККД, $\eta_в$	72%
Маса, m	920 кг
Температура повітря, t	-40….+40 °С

1.4 Вибір шляхів та постановка задачі модернізації і дослідження електропривода вентилятора

Вентилятор печі приводиться в рух асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором типу АИР225М8 потужністю 30 кВт і частотою обертання 735 об/хв.

Регулювання витрати повітря забезпечується дроселюванням, тобто введенням в мережу додаткового опору.

Вентилятори, на відміну від інших турбомеханізмів, завжди працюють на мережу без противотиску, внаслідок чого залежність моменту статичного опору на валу приводного двигуна від швидкості носить квадратичний характер, а потужність яка підводиться до вентилятора без урахування втрат на тертя в підшипниках пропорційна кубу швидкості.

Вентилятори мають великий момент інерції, іноді на порядок і більше перевищує момент інерції приводного двигуна, що ускладнює їх пуск, а в деяких випадках вимагає застосування електричного гальмування для швидкої зупинки робочого колеса.

Вентилятори як виробничі механізми характеризуються тривалим режимом роботи з постійним навантаженням і з великою тривалістю роботи протягом року. Перевантаження електроприводу технологічно неможливі, бажаний плавний пуск. Необхідний діапазон регулювання швидкості для вентиляторів зазвичай не перевищує 2: 1.



Рисунок 1.2 Зовнішній вид вентилятора ВЦ 4-75 №12,5

Застосування "звичайного" двигуна (без незалежної вентиляції) в регульованому режимі обмежена роботою самовентиляції. Так як при зменшенні частоти обертання валу знижується ефективність охолодження асинхронного двигуна вбудованим вентилятором, він перегрівається і, в результаті, сильно зменшується термін експлуатації або він може просто

згоріти, а іноді і неможливо використовувати стандартний двигун в складі частотно-регульованого приводу.

В значній мірі зменшується навантажувальна здатність асинхронного електродвигуна.

Зазначеним вимогам найбільш повно відповідає частотно-регульований асинхронний електропривод вентилятора. При цьому, як правило, можна обмежитися використанням простих і недорогих систем скалярного управління. Застосовуючи перетворювачі частоти можна зменшити споживану потужність двигуна з мережі. З точки зору економії електроенергії даний метод є найефективнішим [5-7].

Метою дослідження є модернізація електропривода вентилятора шляхом інтеграції в існуючу систему керування перетворювача частоти з мікропроцесорною системою керування.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішені наступні задачи.

1. Розробка основ вибору ефективних та економічно доцільних засобів підвищення енергоефективності АД, які працюють в конкретних цехових мережах з неякісною електроенергією.

2. Розробка частотно-регульованого електроприводу вентилятора подачі повітря з розширеним діапазоном регулювання.

3. Складання математичних моделей асинхронного двигуна і перевірка їх адекватності.

При вирішенні завдань дослідження використовувалися теорія ймовірності, математична статистика, теорія диференціального обчислення, чисельного інтегрування, фундаментальні положення електротехніки.

2 Розрахунок потужності двигуна та модернізація системи електропривода вентиляційної установки

2.1 Вибір системи електропривода вентилятора

Регульований електропривод набуває все більшого поширення як ефективний електромеханічний перетворювач енергії. Завдяки зручності транспортування електричної енергії та широкому застосуванню механічної енергії, електропривод міцно увійшов до нашого життя. Близько 80% всього парку електричних машин складають асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Тому особливий інтерес викликає асинхронний регульований електропривод.

Відзначимо, що, якщо у керівника підприємства виникне бажання порівняти можливості устаткування підприємства, які з'явилися після застосування частотно-регульованого асинхронного електроприводу, з тими, що були до його застосування, то асинхронний електропривод дозволяє перейти на старий режим роботи всього протягом чверті години. Перетворювач частоти у складі регульованого електроприводу забезпечує гнучкість технологій і економію електроенергії. Перш за все, регульований електропривод вигідно застосовувати у випадках, коли на підприємстві (або конкретному устаткуванні, обладнанні) спостерігається наступне:

- змінюється кількість продукції, що випускається, в одиницю часу;
- змінюється вхідний матеріал для різних видів продукції;
- можна поліпшити технологічний процес, використовуючи плавне регулювання його параметрів;
- технологічне устаткування, насоси, вентилятори працюють із змінним, або неповним навантаженням;
- потрібні часті пуски, зупинки, реверс приводних двигунів, і виникає необхідність знизити навантаження на устаткування та витрати енергії в перехідних режимах, продовжити термін служби трубопроводів, усунувши

гідроудари в них, зробивши плавний пуск насосів, виникає необхідність зменшити витрати на обслуговування устаткування, замінивши приводи з редукторами і варіаторами на регульовані асинхронні електроприводи;

- є перевитрата електроенергії.

Регулювання швидкості обертання є природним способом досягнення необхідного робочого стану процесу, містить в собі ряд переваг, цінність яких безпосередньо може бути виміряна грошима: зручність регулювання і роботи системи (м'який пуск, регульовані час прискорення і уповільнення, точна швидкість, можливість дистанційного керування, сполучення з ЕОМ). Переваги дозволяють понизити капіталовкладення, експлуатаційні затрати, трудові затрати, спростити конструкцію машин, підвищити ступінь автоматизації і ін., що дозволяє зберегти гроші.

Використання регульованих електроприводів дозволяє понизити знос устаткування і скоротити витрати на техобслуговування, оскільки при зниженні швидкості часто знижується також момент, тиск і механічне навантаження на деталі машини. Регулювання швидкості обертання виключає різкі шкідливі зміни навантаження, дозволяє отримати м'який пуск і м'якшу роботу приводу, скоротити потребу в ремонті і понизити витрати на техобслуговування устаткування.

Використання регульованих електроприводів дозволяє одночасно збільшити випуск продукції і підвищити її якість. Звичайне збільшення об'єму продукції знижує якість, а підвищення якості приводить до зменшення випуску продукції. Це часто пов'язано з питанням оптимізації, яке важко вирішити на стадії проектування. Якщо змінити об'єм продукції регулюванням швидкості, то оптимізацію кількості і якості продукції можна виконати пізніше.

Використання регульованих електроприводів дозволяє економити енергію за рахунок зменшення споживаної потужності оптимізацією роботи приводу [8] через регулювання швидкості обертання. Значна економія спостерігається в приводах насосів і вентиляторів, в яких споживання

потужності знижується пропорційно третій степені від швидкості. У багатьох насосів економія перевищує 50 %, що при великих потужностях означає заощадження великої суми грошей.

У сучасних котельних установках застосовуються вентилятори димових газів, які підвищують продуктивність і ККД паливних котлів. При зміні тиску повітря і потреби в тепловій енергії, необхідно регулювати тягу. Найкращим способом регулювання відсмоктування димових газів - є спосіб регулювання швидкості обертання двигуна насосу, що дозволяє заощадити енергію, поліпшити ефективність роботи котла, зменшити знос устаткування, а також шум [9].

Що стосується пристроїв регулювання швидкості, частотний перетворювач є єдиною системою, яка може забезпечити повне резервування без додаткових пристроїв. Частотний перетворювач має унікальну перевагу: виникнення несправності не вимагає простою обладнання і, отже, великих збитків у виробництві. Коли в якості приводного двигуна служить короткозамкнений електродвигун, перетворювач може бути просто зашунтованим, наприклад, на час перевірки або у разі перешкоди в його роботі. Інші системи регулювання швидкості не дають такої можливості без дорогих дублюючих систем, котрі вимагають додаткового місця. Частотний перетворювач дозволяє наблизитися до магічної межі 100 %-ї ефективності застосування.

Таким чином, регульований асинхронний електропривод на базі перетворювача частоти є ефективним засобом вирішення цілої низки технологічних виробничих завдань та має унікальні характеристики: термін повернення інвестицій становить, як правило, від шести місяців до одного року; безризиковість (незалежно від ринкових змін електропривод може змінити власника лише за умови згоди останнього), швидке повернення інвестицій; термін експлуатації електроприводу становить близько 10 років, що в більшості випадків означає 9-18 кратне повернення інвестицій, пов'язаних з його придбанням та встановленням.

2.2 Розрахунок потужності та вибір приводного електродвигуна

Згідно паспортних даних радіальний вентилятор ВЦ 4-75 № 12,5 має діаметр робочого колеса D_n=1250 мм, ширину робочого колеса b_2 = 800 мм і швидкість обертання колеса 680 об/хв, що визначає безпосереднє з'єднання з електродвигуном. Для розрахунку потужності вентилятора необхідно визначити його витрати Q і напір H. Розрахунок проводимо за методиками [10-12].

Визначимо швидкість обертання зовнішнього обода робочого колеса [10]:

$$u_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n}{60} = \frac{3{,}14 \cdot 1{,}25 \cdot 680}{60} = 44{,}481 \ \frac{м}{с}. \qquad (2.1)$$

Визначаємо абсолютну швидкість газу на виході [4]:

$$C_2 = U_2 \cdot \frac{\sin \beta_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)} = 44{,}48 \cdot \frac{\sin 30^\circ}{\sin(30^\circ + 45^\circ)} = 23{,}002 \ \frac{м}{с}, \qquad (2.2)$$

де α – кут між дотичною зовнішнього діаметра колеса і перпендикуляром до площини лопатки;

β – кут між дотичною зовнішнього діаметра колеса і прямої, проведеної як продовження лопатки.

Визначаємо тангенціальну складову швидкості газу на виході з робочого колеса:

$$C_t = C_2 \cdot \cos \alpha_2 = 23{,}002 \cdot \cos 30^\circ = 19{,}92 \ \frac{м}{с}. \qquad (2.3)$$

Визначаємо коефіцієнт, який враховує вплив кількості лопастей і наявність направляючого апарату:

$$k = \left(1 + 2 \cdot \frac{\varphi}{z} \cdot \frac{1}{1 - (\frac{r_1}{r_2})^2}\right)^{-1} = \left(1 + 2 \cdot \frac{1,2}{12} \cdot \frac{1}{1 - (\frac{73}{103})^2}\right)^{-1} = 0,714, \quad (2.4)$$

де φ – коефіцієнт, що враховує наявність направляючого аппарату;

z – кількість лопатей робочого колеса даного вентилятора;

r_1 і r_2 – радіус лопастей на вході і виході в робоче колесо турбіни.

На підставі цих даних визначаємо номінальну висоту напору [10]:

$$H = \frac{U_2 \cdot C_t}{g} \cdot k \cdot \eta = \frac{44,48 \cdot 19,92}{9,8} \cdot 0,714 \cdot 0,7 = 45,18 \text{ м. вод. ст.} \quad (2.5)$$

Визначаємо номінальний тиск, який розвиває вентилятор (Па):

$$p = \rho \cdot g \cdot H = 1,2 \cdot 9,8 \cdot 45,18 = 531,41 \text{ Па}, \quad (2.6)$$

де ρ -щільність повітря ρ = 1,2 кг/м^3.

Визначаємо номінальну продуктивність вентилятора:

$$Q = \pi \cdot D_2 \cdot c_2 \cdot \sin\alpha \cdot b_2 = 3,14 \cdot 1,25 \cdot 23,002 \cdot \sin 30^\circ \cdot 0,8 = 36,1 \frac{м^3}{с} \quad (2.7)$$

Тоді потужність вентилятора споживана в номінальному режимі:

$$N = k \cdot \frac{p \cdot Q}{\eta_в} = 1,1 \cdot \frac{531,41 \cdot 36,1}{1000 \cdot 0,72} = 29,312 \text{ кВт}, \quad (2.8)$$

де k−коефіцієнт запасу, що враховує зростання споживаної потуності вентилятора при різних режимах;

$\eta_в$ − ККД вентилятора.

Виберемо електродвигун з таких умов:

$$P_{ном} \geq P_{дв}; \quad (2.9)$$

$$30 \text{ кВт} \geq 29{,}312 \text{ кВт}.$$

Обираємо асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу АДЧР225М8, який призначений для роботи у складі регульованого приводу на основі перетворювача частоти, технічні дані двигуна наведені в таблиці 2.1, згідно [10].

Таблиця 2.1 – Технічні дані асинхронного електродвигуна типу АДЧР225М8

Параметри двигуна	Значення параметра
Потужність, $P_н$	30 кВт
Частота обертання, $n_н$	723 об/хв
Номінальний струм, $I_н$	62,2 А
Коефіцієнт потужності, cosφ	0,81
ККД, $\eta_н$	90,5%
Номінальна напруга , $U_н$	380 В
Максимальний момент, M_m	871,8 Н·м
Номінальний момент, $M_н$	396,25Н·м
$M_п/M_н$	1,8
Тривалість включення, $ТВ_{ст}$	100 %
Номінальне ковзання, $s_н$	0,036

Перевірка електродвигуна за пусковим моментом [11]:

$$M_{пуск.дв.} \geq (1{,}2...1{,}3) \cdot M_{тр.р.м.,} \quad (2.10)$$

де $M_{пуск.дв}$ - пусковий момент двигуна;

$M_{тр.р.м.}$ - момент тертя робочої машини (береться з навантажувальної діаграми робочої машини для нульового значення її швидкості).

$$M_{тр.р.м} = 1{,}3 \cdot 18{,}76 = 23{,}517 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$792{,}5 \text{ Н·м} > 23{,}517 \text{ Н·м}.$$

Електродвигун АИР225М8, який встановлений у даний час для вентилятора не призначений для роботи у складі регульованого електропривода. Так як застосування стандартного двигуна (без незалежної вентиляції) в регульованому режимі обмежена роботою самовентиляції. При такій схемі охолодження двигуна при регулюванні по нижній межі - на низьких оборотах втрачається продуктивність вентиляції, що призводить до перегріву двигуна. Тому приймаємо рішення, щодо встановлення двигуна типу АДЧР225М8, який повністю розкриє потенціал перетворювача частоти.

2.2.1 Побудова механічної характеристики та навантажувальної діаграми вентилятора

Механічна характеристика машини являє собою залежність між моментом опору та кутовою швидкістю, тобто Мс = f (ω).

Механічна характеристика вентилятора в загальному випадку описується рівнянням:

$$M_c = \left(M_{в.ном} - M_{тр.р.м}\right) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 + M_{тр.р.м}\,. \qquad (2.11)$$

Для розрахунку механічної характеристики визначаємо номінальний момент вентилятора :

$$M_{в.ном} = \frac{Q_{ном} \cdot p_{ном}}{\omega_{ном} \cdot \eta_{в.ном}} = \frac{36{,}1 \cdot 531{,}41}{75{,}71 \cdot 0{,}72} = 351{,}9\ Н \cdot м\,. \qquad (2.12)$$

Момент тертя приймаємо в розмірі 5,3% від номінального моменту вентилятора, згідно [12]:

$$M_{тр.р.м} = 0{,}053 \cdot M_{в.ном} = 0{,}053 \cdot 351{,}9 = 18{,}76\ Н \cdot м\,. \qquad (2.13)$$

Задаємося кутовою швидкістю ω вентилятора та розраховуємо момент статичного опору вентилятора:

$$M_c = (351{,}9\ - 18{,}76) \cdot \left(\frac{\omega_i}{75{,}71}\right)^2 + 18{,}76.$$

Розрахункові дані наведені в таблиці 2.2.

Графік механічної характеристики представлений на рисунку 2.1.

Таблиця 2.2 – Розрахункові дані характеристики вентилятора

ω_i	0	7,85	15,7	31,4	39,25	47,1	62,8	70,65	78,5
M_c	18,76	22,325	33,018	75,794	107,875	147,086	246,894	307,493	375,22

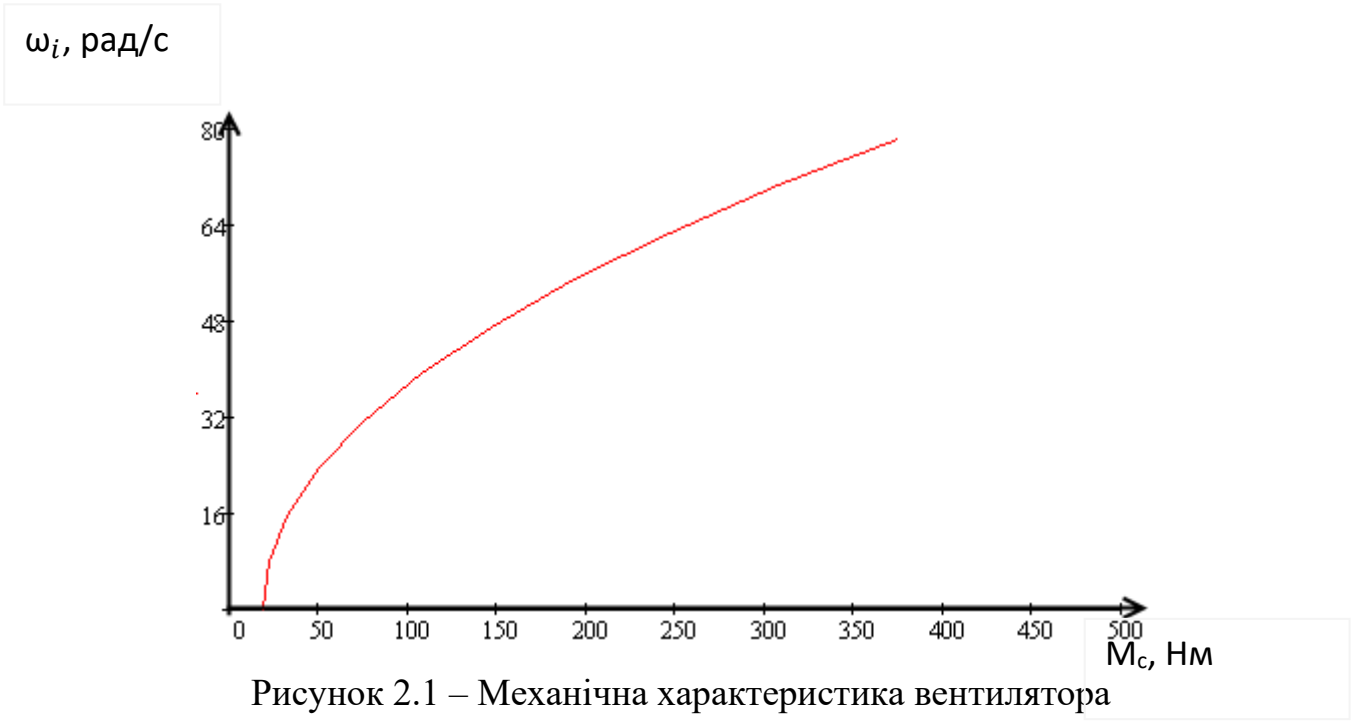


Рисунок 2.1 – Механічна характеристика вентилятора

Навантажувальна діаграма робочої машини представляє залежність моменту опору від часу, тобто Мс=f(t), при постійній швидкості. Тому для вентиляторів, навантажувальна діаграма будуються як залежність приведеного до валу двигуна моменту опору від часу. Для вентиляторної характеристики характерний спокійний пуск і постійний момент опору, рівний розрахованому вище. Навантажувальна діаграма представлена на рисунку 2.2.

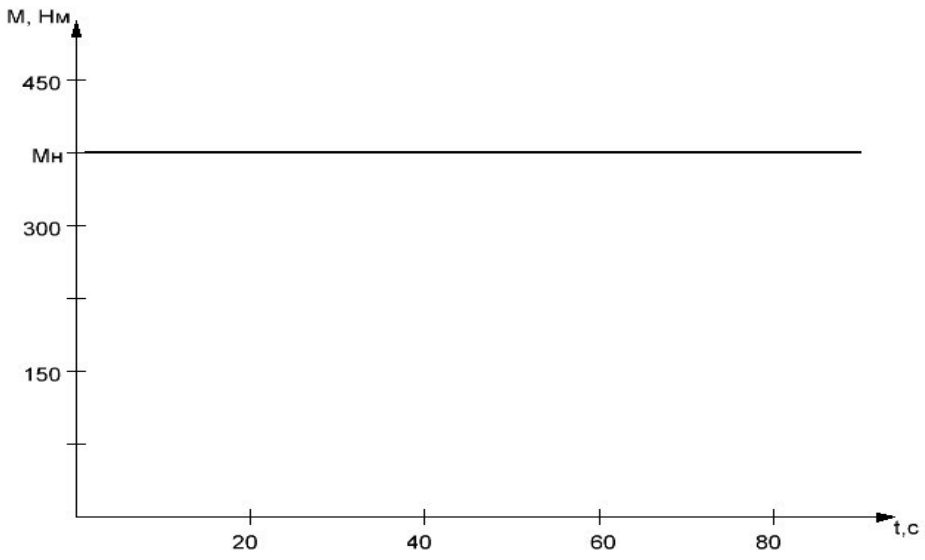


Рисунок 2.2 – Навантажувальна характеристика вентилятора

2.3 Модернізація системи регулювання витрати повітря вентилятора шляхом впровадження перетворювача частоти

2.3.1 Регулювання при постійній частоті обертання валу вентилятора дроселюванням

Регулювання продуктивності вентилятора введенням в мережу додаткового опору (дроселюванням) на практиці застосовується досить часто. На рисунку 2.3 представлена залежність споживаної потужності і розвиваємого тиску від витрат при регулюванні дроселюванням.

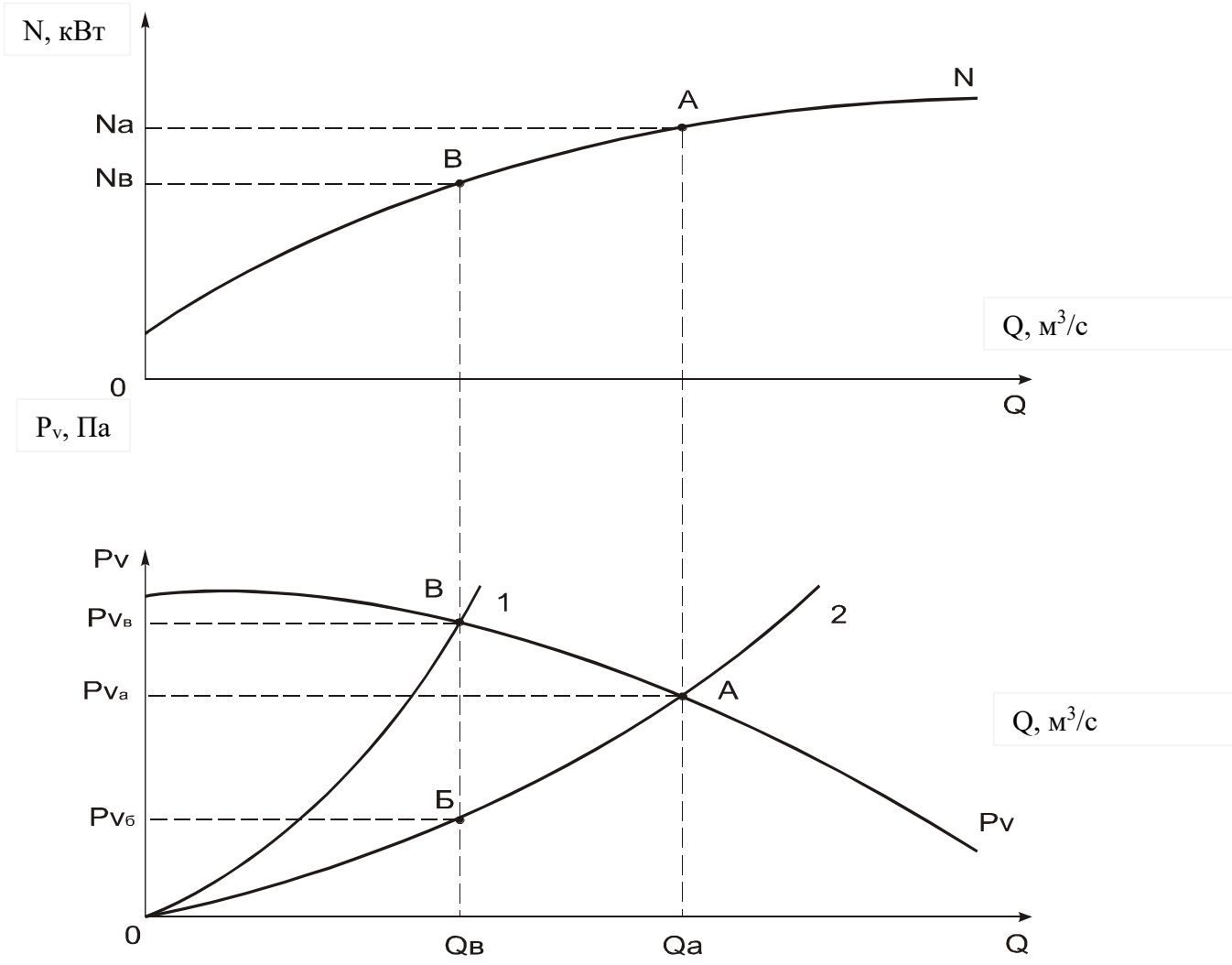


Рисунок 2.3 – Залежність споживаної потужності і розвиваємого тиску від витрат при регулюванні дроселюванням.

При введенні в мережу додаткового опору крива переміщається вліво на графіку. Робоча точка вентилятора також переміщається вліво, в результаті чого знижується його продуктивність. Якщо до введення додаткового опору (дроселя) в мережу вентилятор продуктивністю Q_A при тиску P_{vA} споживав потужність:

$$N = \frac{Q_A \cdot P_{VA}}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta} \qquad (2.14)$$

Після введення дроселя продуктивність знизилася до величини $Q_в$ при тиску $P_м$, то споживана потужність, що витрачається на подолання опору мережі з дроселем, стала дорівнювати:

$$N_в \cong \frac{Q_в P_{Vв}}{\eta_в} \cong \frac{(Q_в P_{Vв}/\eta_в) \cdot P_{Vб}}{P_{Vб}} \cong \frac{N_б P_{Vв}}{P_{Vб}} \qquad (2.15)$$

Тобто значна частина споживаної вентилятором потужності витрачається на подолання опору дроселя.

Перевагою даного методу є можливість плавного регулювання вниз від номінальної витрати, простота методу. Недоліком є енергетична неефективність [13-14].

2.3.2 Регулювання витрати повітря вентилятора зміною швидкості обертання валу привода

При регулюванні швидкості обертання валу привода змінюється швидкість потоку повітря, при цьому змінюється тиск розвиваємий

вентилятором і відповідно витрати повітря в системі. Застосовуючи перетворювачі частоти, змінюючи частоту обертання можна зменшити споживану потужність двигуна з мережі. Наочно зміну напору і витрату повітря вентилятора при регулюванні зміною частоти обертання можна побачити при побудові напірно-витратних характеристик. Напірно-витратна характеристика - графічне відображення залежності напору вентилятора від його подачі. Їх можна побудувати за допомогою коефіцієнтів апроксимації, згідно [15]. Для цього необхідно визначити дві точки на характеристиці.

Одна з них відома, це номінальний режим вентилятора:

H=45,18 м.вод. ст. Q=36,1 м^3/с.

Другу точку приймемо при:

Q=30 м^3/с H=50,4 м.вод. ст.

Напір створюваний вентилятором при витраті рівним нулю приймається на 10-20% більше, ніж номінальний напір [12]:

$$H_0=H_{ном}\cdot 1,2=45,18\cdot 1,2=54,216 \text{ м.вод. ст.} \quad (2.16)$$

Рівняння напору з апроксимаційними коефіцієнтами має вигляд :

$$H = A_2 \cdot \nu^2 + B_2 \cdot Q \cdot \nu \ + C_2 \cdot Q^2 \ , \quad (2.17)$$

де ν – відносна зміна швидкості обертання при зміні частоти мережі живлення, яка дорівнює відношенню швидкості обертання в даному режимі до швидкості обертання при частоті мережі 50Гц.

Коефіцієнт A_2 дорівнює напору при нульовій витраті, A_2=54,216. Вирішуючи систему рівнянь отримуємо коефіцієнти апроксимації:

B_2=0,739 C_2=-0,024

Рівняння має вигляд:

$$H = 54{,}216 \cdot \nu^2 + 0{,}739 \cdot Q \cdot \nu \ - 0{,}024 \cdot Q^2$$

За допомогою програми Mathcad виконуємо побудову для частот 50, 40, 30, 20 Гц, змінюючи продуктивність від 0 до 36,1 м^3/с, графік яких зображений на рисунку 2.4.

На цьому ж графіку будуємо криві Q-H, які характеризують мережу при зміні її опору:

$$H = R \cdot Q^2 \ . \tag{2.18}$$

Аеродинамічний опір мережі визначаємо з виразу при номінальному напорі і продуктивності:

$$R = \frac{45{,}18}{36{,}1^2} = 0{,}0345 \text{ Ом.} \tag{2.19}$$

Змінюючи в різних межах вгору отримуємо криві, які характеризують мережу при різних опорах.

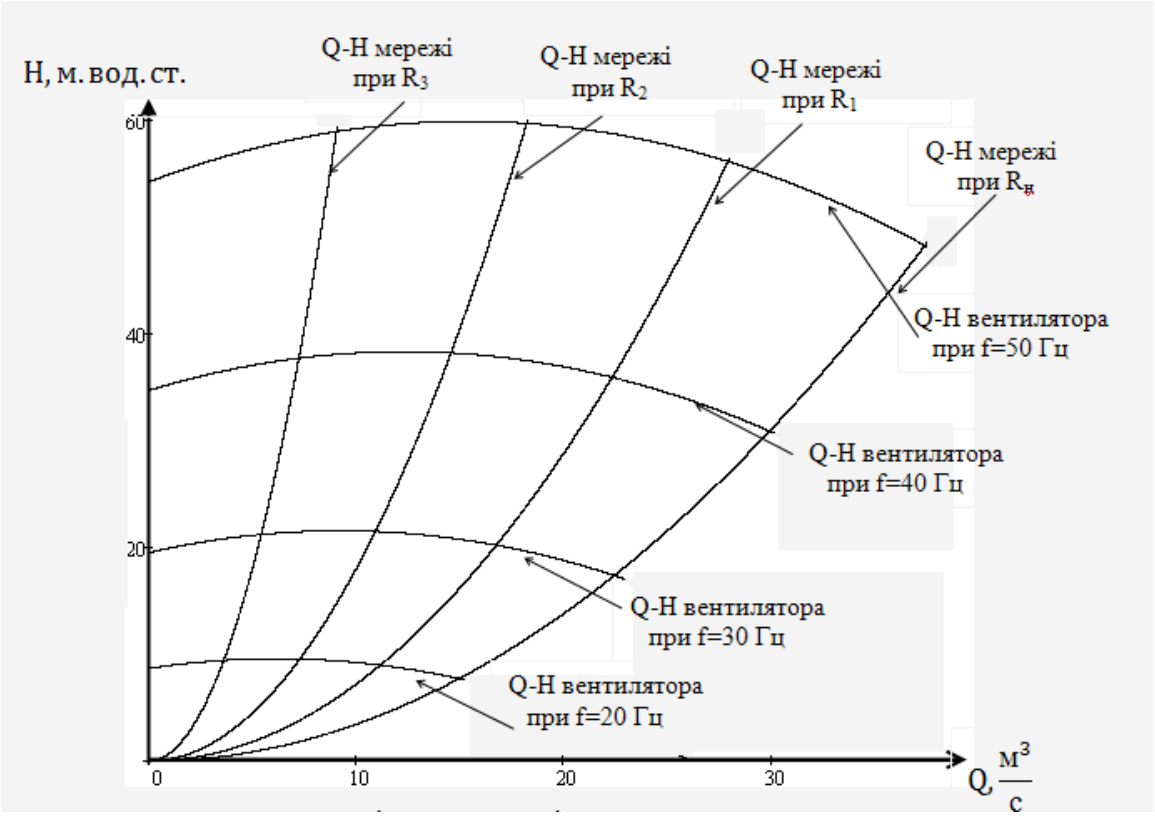


Рисунок 2.4 - Напірно-витратні характеристики вентилятора при регулюванні швидкості обертання вентилятора та опору мережі.

Як видно з рисунків 2.3 та 2.4 при збільшенні аеродинамічного опору мережі, характеристика стає більш крутою і робоча точка вентилятора пересувається з положення А по характеристиці вентилятора вліво вгору, визначаючи нові значення параметрів - положення Б і В. Дроселювання зменшує потужність на валу електродвигуна і разом з тим підвищує частку енергії, що витрачається при регулюванні вентилятора. Чим глибше процес регулювання вентилятора, тим більше непродуктивно витрачається потужність.

Точка, в якій перетинаються характеристики вентилятора і системи, називають робочою точкою. Це означає, що в цій точці має місце рівновага між корисною потужністю вентилятора і потужністю, споживаної мережею. Напір вентилятора завжди дорівнює опору системи. Від цього залежить також подача, яка може бути забезпечена вентилятором.

Для регулювання витрати і подачі відповідно до потреби застосовуємо перетворювач частоти. В такий спосіб ми зможемо змінювати подачу в досить широких межах. При цьому ККД установки зміниться несуттєво, істотно скорочуються експлуатаційні витрати. З точки зору економії електроенергії даний метод є найефективнішим.

2.3.3 Вибір перетворювача частоти для електропривода вентилятора

Відповідно до рекомендацій [16-18] для регульованого асинхронного електропривода вентилятора печі в умовах ТПЦ доцільно використовувати перетворювачі частоти серії ALTIVAR 212 фірми Schneider Electric.

Для вибору перетворювача частоти розраховуємо повну потужність, що споживає двигун $S_{ндв}$:

$$S_{ндв} = \sqrt{3} \cdot U_{лн} \cdot I_{лн} \cdot 10^{-3} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 62{,}2 \cdot 10^{-3} = 40{,}89 \text{ кВА} \quad (2.20)$$

Вибір перетворювача частоти здійснюємо за умовами:

$$U_н \geq U_{лн}, \qquad I_н \geq I_{лн.дв}, \qquad S_н \geq S_{ндв}; \qquad (2.21)$$

$$380 \text{ В} \geq 380 \text{ В}, \quad 79 \text{ А} > 62{,}2 \text{ А}, \quad 45{,}3 \text{ кВА} > 40{,}89 \text{ кВА},$$

де $U_н, I_н, S_н$ - номінальні значення відповідно напруги, струму та потужності на виході перетворювача частоти;

$U_{лн}, I_{лн.дв}, P_{ндв}$ - номінальні значення відповідно лінійної напруги, лінійного струму та потужності АД.

Обираємо перетворювач частоти (ПЧ) моделі ATV212HD37N4, параметри якого наведені в таблиці 2.3. Схема підключення ПЧ зображена на рисунку 2.5, згідно [18].

Таблиця 2.3 – Паспортні параметри ПЧ ATV212HD37N4

Номінальне значення потужності, $P_н$	37 кВт
Повне значення потужності, $S_н$	45,3 кВА
Номінальній струм, $I_н$	79 А
Перевантаження по струму 60, с, $I_н$	86,9
Номінальна напруга $U_н$	380 В ÷ 480 В

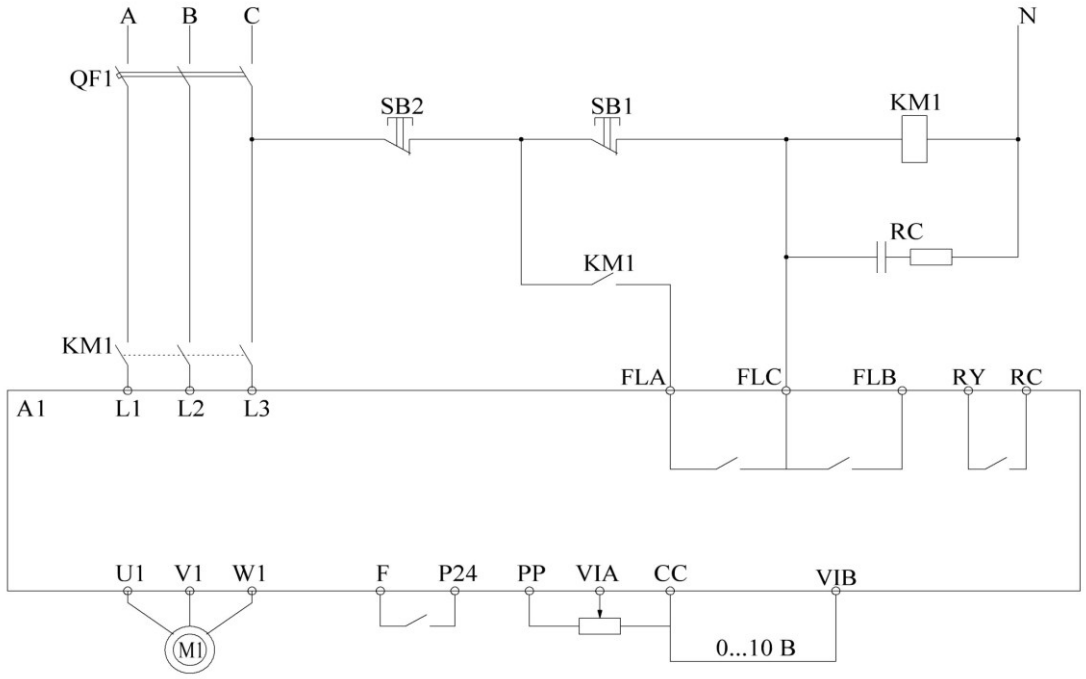


Рисунок 2.5 – Схема підключення перетворювача частоти ATV 212

Загальні технічні дані перетворювача частоти серії ALTIVAR 212:

– вихідна частота 0,5-200 Гц;

– перевантажувальна здатність 120% протягом 1хвилини;

– ступінь захисту UL тип 12/IP 55%;

– температура навколишнього середовища поряд з перетворювачем частоти -10...+ 50 °С без погіршення характеристик, + 60 °С з погіршенням;

– умови навколишнього середовища класи 3С1 і 3S2;

– один аналоговий вхід, конфігурується перемикачем як вхід по струму або вхід по напрузі, також може конфігуруватися як дискретний вхід;

– один аналоговий вхід по напрузі, конфігурується як аналоговий вхід або як вхід датчиків PTC;

– один аналоговий вихід, конфігурується перемикачем як вихід за струмом або вихід по напрузі;

–три програмовані дискретні входи 24В, відповідають рівню 1 ПЛК, відповідно до стандарту МЕК (IEC) / EN 61131-2, 1 вхід з позитивною логікою (Source) та 1 вхід з негативною логікою (Sink);

–один конфігурований релейний вихід з НО контактом, НЗ контактом і виведенням загальної точки , 1 реле з НО контактом.

Завдяки значній кількості вбудованих функцій перетворювач частоти Altivar 212 без затримок інтегрується в системи управління і вводиться в роботу, забезпечуючи надійну роботу і захист устаткування.

Функції для використання в вентиляційних установках:

– зниження шуму завдяки зміні частоти комутації, частота комутації може змінюватися до 16 кГц під час роботи;

– автоматичне підхоплення обертового механізму з автоматичним визначенням швидкості;

– адаптація обмеження струму в залежності від швидкості;

– калібрування і обмеження завдання;

– можлива робота перетворювача частоти в аварійному режимі при використанні функції форсування з забороною зупинки по несправності; задаються напрямок обертання і швидкість;

– енергозбереження, квадратичний закон напруги / частота;

– адаптація струмообмеження при наборі швидкості обертання;

– усунення шумів і резонансних явищ за рахунок підбору під час роботи оптимальної частоти ШІМ-модуляції до 16 кГц;

– можливості роботи на 7-ми фіксованих швидкостях;

– вбудований ПІД-регулятор;

– лічильник споживаної електроенергії і часу роботи;

Захисні функції:

– система димовидалення, форсировка роботи з блокуванням аварійного відключення;

– контроль положення заслонки, якщо заслонка закрита, електродвигун зупиняється;

– пропуск зони резонансних частот;

– тепловий захист двигуна і частотного регулятора за сигналами теморезисторів PTC;

– захист від струмових перевантажень.

Частотний перетворювач ATV212 призначений для керування трифазним асинхронним двигуном серії АДЧР225М8 потужністю 30 кВт був спеціально розроблений для застосування в вентиляційних станціях. Перетворювач ATV212 легко інтегрується в систему обслуговування за рахунок використання різних комунікаційних карт і має вбудований ПІД-регулятор.У конструкції ATV212 була використана новітня технологія зменшення ємності конденсаторів ланцюга постійного струму. Це дозволило істотно зменшити розміри регулятора, зробити його більш стійким до зовнішніх електромагнітних перешкод.

FLA, FLC і FLB – релейний дискретний вихід з одним НЗ і НР контактами загальною точкою. Можуть бути використані як реле несправності для дистанційного контролю стану частотного регулятора. Контакти реле змінюють свій стан тільки при виникненні аварії. Максимальний робочий струм: при активному навантаженні – 5 А, 250 В змінного або 30 В постійного струму; при індивідуальному навантаженні – 2 А / 250 В змінного або 30 В постійного струму. RY і RC-HP контакти реле замикаються при роботі вентилятора. Можуть бути використані для управління приводом повітряної заслонки. VIB – керуючий сигнал 0-10 В, при програмуванні діапазону регулювання від 25 до 50 Гц, сигналу 0 В відповідає частота 25 Гц, а 10 В – частота 50 Гц.

F і P24 – зовнішній запуск частотного регулятора. При замиканні вентилятор починає обертатися із заданою швидкістю. Якщо контакти замкнути, то двигун вентилятора можна вкл / викл подачею живлення. CC і VIA – керуючий сигнал від зовнішнього потенціометра (4,7 – 15 кОм); при програмуванні діапазону регулювання від 25 до 50 Гц, опору нуль відповідає частота 25 Гц, а 15 кОм частота 50 Гц. Для спрощення управління

вентилятором, частотний регулятор ATV212 може бути підключений до пульта дистанційного керування ПУ ATV.

Всі дії по включенню/вимиканню вентилятора і плавному регулюванню швидкості обертання можуть проводитися з пульта. При цьому вентилятор змінює свою продуктивність приблизно в два рази, а створюваний тиск в 4 рази. Пульт ПУ ATV може бути встановлений на дверцятах щитка управління або на стіну недалеко від вентилятора. Довжина з'єднувальних проводів від регулятора до пульта управління повинна бути не більше 10 м. При необхідності винести управління від частотного регулятора на відстань до 13 м можна використовувати вхід 0–10 В.

Для роботи з пультом управління ПУ ATV ПЧ ATV212 програмується згідно налаштувань приведених на рисунках 2.6 та 2.7.

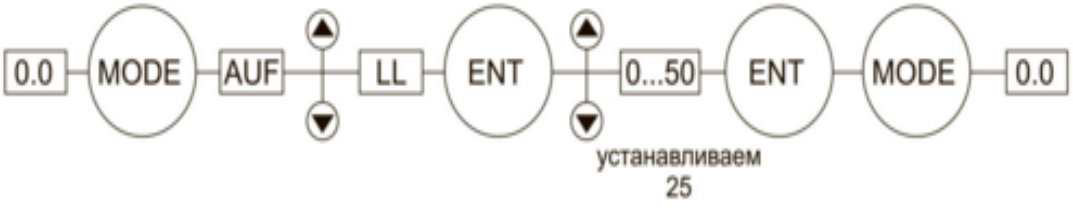


Рисунок 2.6 – Установка нижньої межі регулювання 25 Гц

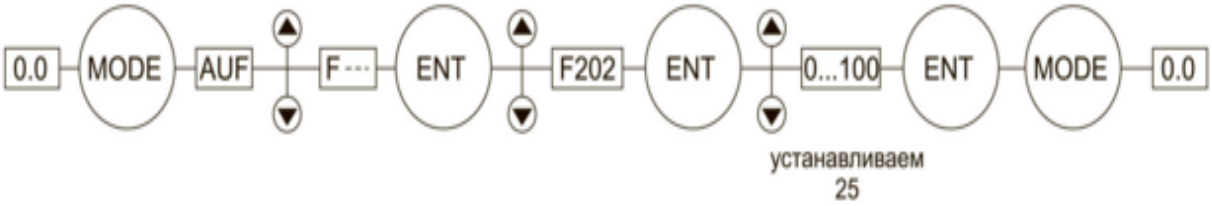


Рисунок 2.7 – Установка нижньої межі регулювання 25 Гц від зовнішнього змінного резистора

2.3.4 Розрахунок параметрів схеми заміщення та побудова механічних характеристик частотного регулювання

Згідно механічної характеристики вентилятора та приймаючи до уваги, що діапазон регулювання швидкості вентиляторів невеликий і механізми такого класу не вимагають забезпечення високої кратності пускового і максимального моменту, в якості способу регулювання U_1/f_1 приймемо закон U_1/f_1^2=const.

Для побудови механічних характеристик та дослідження математичної моделі розрахуємо параметри схеми заміщення за паспортними даними двигуна, які наведені в таблиці 2.1. Приймаємо Т – подібну схему заміщення, згідно [10], яка зображена на рисунку 2.8.

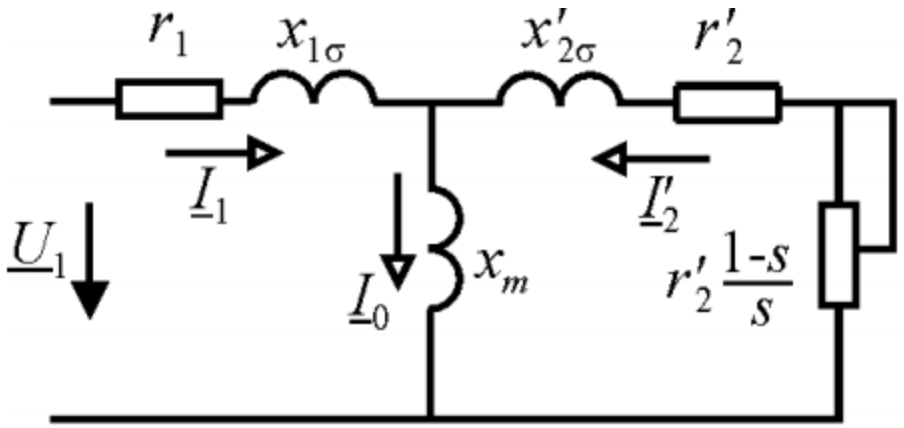


Рисунок 2.8 – Т – подібна схема заступна двигуна

r_1 – активний приведений опір статора АД; r_2 – активний приведений опір ротора АД; $x_{\sigma 1}$ – індуктивний опір розсіювання статора АД; $x_{\sigma 2}$ – індуктивний опір розсіювання ротора АД; U_1 – фазна напруга живлення АД.

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \cdot 723}{60} = 75{,}71 \text{ рад/с} . \qquad (2.22)$$

Критичне ковзання:

$$s_k = \frac{s_n}{c_1}\left(\lambda_{max} + \sqrt{\lambda_{max}{}^2 - 1}\right) = \frac{0{,}036}{1{,}035}\left(2{,}2 + \sqrt{2{,}2^2 - 1}\right) = 0{,}145. \quad (2.23)$$

Споживана потужність:

$$P_{1n} = \frac{P_{2n}}{\eta_н} = \frac{30000}{0{,}905} = 33150 \text{ Вт.} \quad (2.24)$$

Номінальний приведений струм ротора:

$$I_{2n} = I_{1n}\cos\varphi_н \sqrt{\frac{2\lambda_{max}s_n}{s_k}} = 62{,}2 \cdot 0{,}81 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2{,}2 \cdot 0{,}036}{0{,}145}} = 52{,}6 \text{ А.} \quad (2.25)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{30000}{75{,}71} = 396{,}25 \text{ Н} \cdot \text{м}\,. \quad (2.26)$$

Максимальний момент:

$$M_k = \lambda_{max}M_n = 2{,}2 \cdot 396{,}25 = 871{,}8 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.27)$$

Пусковий момент:

$$M_p = \lambda_{pusk}M_n = 1{,}8 \cdot 396{,}25 = 792{,}5 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.28)$$

Мінімальний момент:

$$M_{min} = \lambda_{min}M_n = 1{,}2 \cdot 396{,}25 = 475{,}5 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.29)$$

Загальні втрати потужності:

$$\Delta P = P_{1n} - P_{2n} = 33150 - 30000 = 3150 \text{ Вт.} \quad (2.30)$$

Механічні втрати:

$$\Delta P_{мех} = P_{1n} k_{мех} = 33150 \cdot 0{,}01 = 331{,}5 \text{ Вт.} \quad (2.31)$$

Активний опір статора:

$$r_1 = \frac{P_{1n} - P_{2n}}{m {I_{1n}}^2} = \frac{33150 - 30000}{3 \cdot 62{,}1^2} = 0{,}272 \text{ Ом.} \quad (2.32)$$

Повний індуктивний опір двигуна:

$$x_k = \frac{m {U_{nф}}^2}{2\omega_0 c_1 M_k} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 78{,}54 \cdot 1{,}035 \cdot 871{,}8} = 1{,}024 \text{ Ом.} \quad (2.33)$$

Індуктивний опір розсіювання статора:

$$x_{1\sigma} = \frac{x_k}{1 + {c_1}^2} = \frac{1{,}024}{1 + 1{,}035^2} = 0{,}494 \text{ Ом.} \quad (2.34)$$

Індуктивний опір розсіювання ротора:

$$x_{2\sigma} = \frac{x_k - x_{1\sigma}}{c_1} = \frac{1{,}024 - 0{,}494}{1{,}035} = 0{,}512 \text{ Ом.} \quad (2.35)$$

Активний приведений опір ротора :

$$r_2 = s_k\sqrt{{r_1}^2 + {x_k}^2} = 0{,}145 \cdot \sqrt{0{,}272^2 + 0{,}931^2} = 0{,}154 \text{ Ом}. \quad (2.36)$$

Реактивна повна проводимість:

$$b_k = \frac{c_1 x_k}{\left(c_1 r_1 + {c_1}^2 \frac{r_2}{s_n}\right)^2 + (c_1 x_k)^2} =$$

$$= \frac{1.035 \cdot 1.024}{\left(1{,}035 \cdot 0{,}272 + 1{,}035^2 \cdot \frac{0.148}{0.036}\right)^2 + (1{,}035 \cdot 1{,}024)^2} = 0{,}047. \quad (2.37)$$

Базовий опір двигуна:

$$z_b = \frac{U_n}{I_{1n}} = \frac{220}{62{,}1} = 3{,}543 \text{ Ом}. \quad (2.38)$$

Індуктивний опір намагнічування :

$$x_\mu = \frac{1}{c_1 \cdot \left(\frac{\sqrt{1 - \cos{\varphi_н}^2}}{z_b} - b_k\right)} =$$

$$= \frac{1}{1.035 \cdot \left(\frac{\sqrt{1 - 0{,}81^2}}{3{,}543} - 0{,}047\right)} = 8{,}152 \text{ Ом}. \quad (2.39)$$

Індуктивність розсіювання статора :

$$L_{1\sigma} = \frac{x_{1\sigma}}{\omega_0} = \frac{0{,}494}{78{,}54} = 0{,}0063 \text{ Гн}. \quad (2.40)$$

Індуктивність розсіювання ротора:

$$L_{2\sigma} = \frac{x_{2\sigma}}{\omega_0} = \frac{0{,}512}{78{,}54} = 0{,}00652 \text{ Гн.} \quad (2.41)$$

Індуктивність намагнічування:

$$L_{\mu} = \frac{x_{\mu}}{\omega_0} = \frac{8{,}152}{78{,}54} = 0{,}104 \text{ Гн.} \quad (2.42)$$

Індуктивність статора :

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_{\mu} = 0{,}0063 + 0{,}104 = 0{,}1103 \text{ Гн} \quad (2.43)$$

Індуктивність ротора:

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_{\mu} = 0{,}00652 + 0{,}104 = 0{,}1105 \text{ Гн.} \quad (2.44)$$

За формулою Клосса запишемо вираз згідно [7] для моменту АД, підставляючи в нього значення параметрів з урахуванням частоти напруги живлення

$$M = \frac{3 \cdot U_{\phi}^{\,2}(f) \cdot \frac{r_2'}{s(f)}}{\omega_0 \cdot (f) \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s(f)} \right)^2 + x_{\acute{e}}^2 \cdot (f) \right]}, \quad (2.45)$$

де $U_{\phi} \cdot (f) = f^2$, – залежність для закону регулювання.

Функція ковзання з урахуванням зміни частоти, від номінальної:

$$s(f) = \frac{\omega_0 \cdot f^* - \omega}{\omega_0 \cdot f^*} \tag{2.46}$$

В результаті перетворень підставивши у вираз ковзання і функцію напруги, отримаємо остаточні вирази для побудови механічних характеристик

$$M_{f^2} = \frac{3 \cdot (U_{ô.íîì} \cdot f^{*2})^2 \cdot \frac{r_2^{'} \cdot \omega_{0í} \cdot f^*}{\omega_{0í} \cdot f^* - \omega}}{\omega_{0í} \cdot f^* \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r_2^{'} \cdot \omega_{0í} \cdot f^*}{\omega_{0í} \cdot f^* - \omega} \right)^2 + (x_ê \cdot f^*)^2 \right]}, \tag{2.47}$$

де $f^* = \frac{f}{f_n}$, $f = (10,20....50)$ Гц – частоти для різних характеристик.

Підставивши різні значення частоти напруги живлення $10 \le f \le 50$ і швидкості від 0 до ω_0 в формулу 2.47, отримаємо значення моменту для механічних характеристик при різних частотах, які наведені на рисунках 2.9.

Підставивши різні значення частоти напруги живлення в модель електропривода, можна отримати сімейство механічних характеристик асинхронного двигуна для різних режимів роботи. Аналіз отриманих характеристик показує, що зміна частоти живлення суттєво впливає на швидкість обертання двигуна, величину електромагнітного моменту та стійкість роботи системи. При зменшенні частоти характеристики зміщуються в область менших швидкостей, що забезпечує можливість плавного регулювання режимів роботи вентилятора залежно від потреб технологічного процесу.

Для вентиляторних механізмів та витяжних систем така особливість є надзвичайно важливою, оскільки продуктивність вентилятора повинна змінюватися відповідно до реального навантаження системи вентиляції. У виробничих приміщеннях інтенсивність повітрообміну може змінюватися

залежно від температури, вологості, концентрації пилу, шкідливих газів або режиму роботи технологічного обладнання. Використання частотного регулювання дозволяє автоматично підтримувати необхідні параметри вентиляції без перевитрат електроенергії.

Дослідження механічних характеристик показує, що зі зменшенням швидкості обертання значно знижується навантаження на електродвигун та елементи механічної передачі. Це позитивно впливає на довговічність підшипників, робочого колеса вентилятора та інших вузлів електропривода. Крім того, плавний пуск двигуна дозволяє уникнути різких механічних ударів і великих пускових струмів, які негативно впливають на електричну мережу та обладнання.

Важливою перевагою частотно-керованого електропривода є підвищення енергоефективності вентиляційної установки. При роботі вентилятора на знижених швидкостях суттєво скорочується споживання електроенергії, що особливо важливо для промислових підприємств із безперервним режимом роботи вентиляційних систем. У сучасних умовах питання енергозбереження є одним із ключових напрямів модернізації електромеханічного обладнання.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування частотного регулювання для електроприводів витяжних вентиляторів. Такий підхід забезпечує стабільність технологічного процесу, зменшення експлуатаційних витрат, покращення умов праці персоналу та підвищення надійності функціонування вентиляційної системи в цілому.

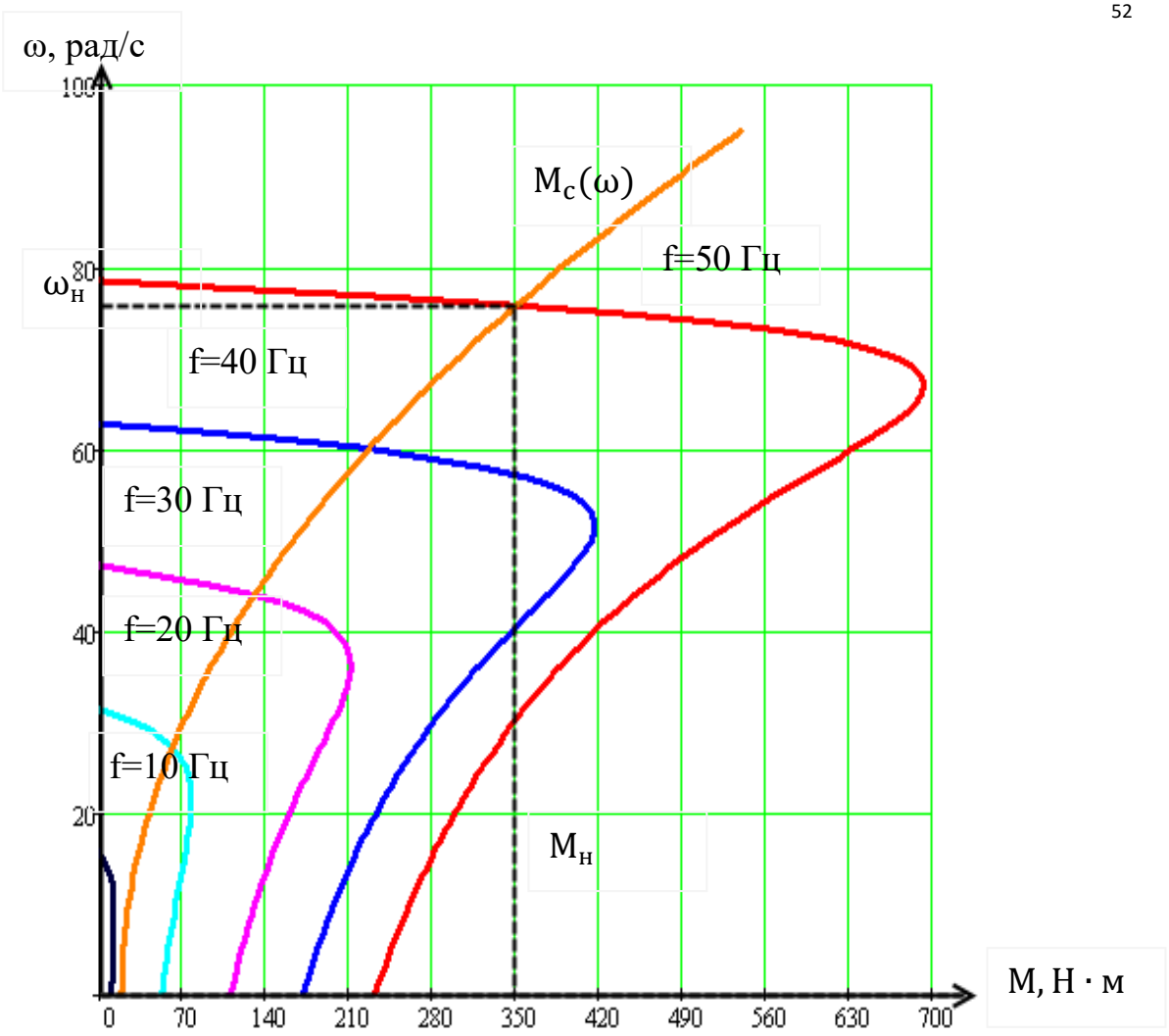


Рисунок 2.9 – Механічні характеристики двигуна для закону регулювання $U_\phi \cdot (f) = f^2$ та характеристика навантаження $M_c(\omega)$

Точкою перетину характеристики електропривода з механічною характеристикою вентилятора є момент навантаження при відповідній швидкості. Отримані механічні характеристики необхідні для знаходження моменту навантаження при різній частоті та будуть використані при подальшому моделюванні перехідних процесів.

3 Дослідження математичної моделі перетворювач частоти−асинхронний двигун (ПЧ-АД)

3.1 Розробка математичної моделі перетворювача частоти

На даний момент в основному застосовуються перетворювачі частоти з ланкою постійного струму [15, 16]. Напруга живлення $U_н$ подається безпосередньо на ключі інвертора напруги або струму. Розглянемо роботу трифазного інвертора напруги при ШІМ.

Трифазна система напруг інвертора утворює симетричну врівноважену систему [18]:

$$U_A + U_B + U_C = 0. \quad (2.48)$$

У той же час система фазних напруг плечей інвертора, яка відраховується від середньої точки джерела вхідної напруги, не є врівноваженою:

$$\frac{(U_{A0} + U_{B0} + U_{C0})}{3} = U_0. \quad (2.49)$$

Тоді фазні напруги інвертора:

$$u_A = u_{A0} - u_0 = \frac{(2 \cdot u_{A0} - u_{B0} - u_{C0})}{3}, \quad (2.50)$$

$$u_B = u_{B0} - u_0 = \frac{(2 \cdot u_{B0} - u_{A0} - u_{C0})}{3}, \quad (2.51)$$

$$u_C = u_{C0} - u_0 = \frac{(2 \cdot u_{C0} - u_{B0} - u_{A0})}{3}. \quad (2.52)$$

Перетворимо отримані вирази в систему координат α, β прив'язаних до частоти поля статора. Так узагальнений вектор в цих координатах:

$$\dot{u} = u_\alpha + ju_\beta = \frac{2}{3}(u_A + au_B + a^2 u_C), \quad (2.53)$$

Одиничний оператор повороту на 120^0:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (2.54)$$

Одиничний оператор повороту на 240^0

$$a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (2.55)$$

Підставивши (2.54) і (2.55) в (2.53) отримаємо залежність для вектора напруги в координатах α, β від фазної напруги інвертора:

$$\dot{u} = u_\alpha + ju_\beta = u_A + j\frac{u_B - u_C}{\sqrt{3}} = u_A + j\frac{u_{BC}}{\sqrt{3}}. \quad (2.56)$$

Модуль вектора напруги:

$$|\dot{u}| = \sqrt{{u_\alpha}^2 + {u_\beta}^2}. \quad (2.57)$$

Фаза напруги інвертора:

$$\Theta = \text{arctg}\frac{u_\beta}{u_\alpha}. \qquad (2.58)$$

Функціональна схема перетворювача частоти наведена на рисунку 2.10

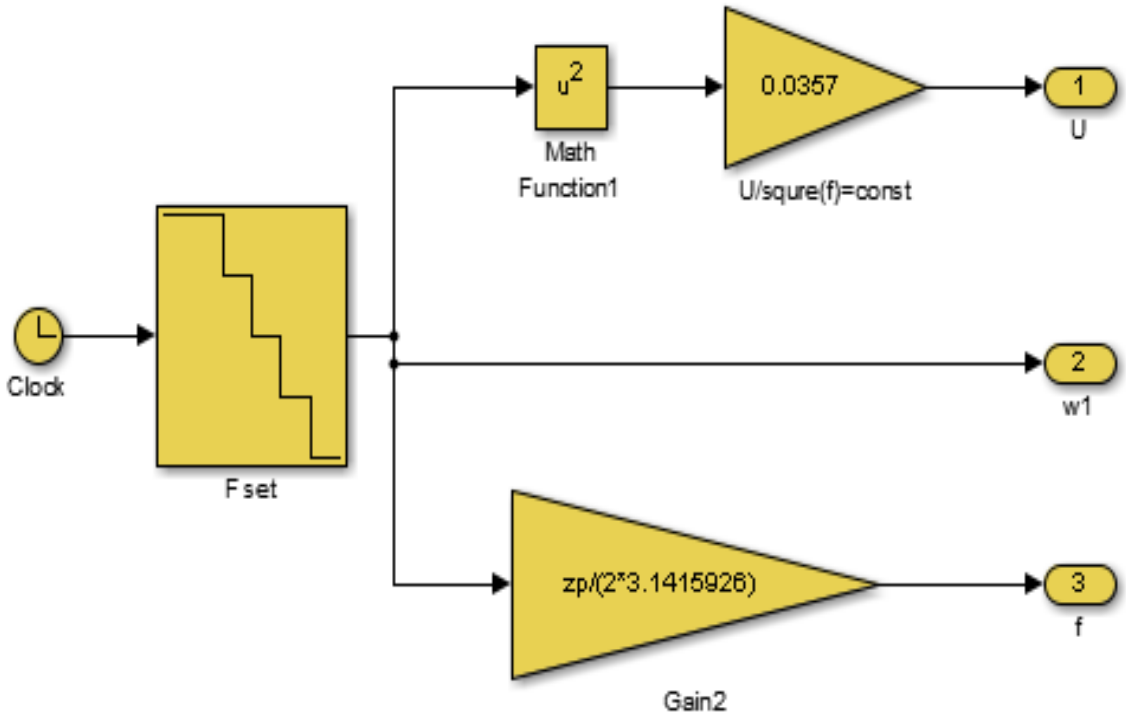


Рисунок 2.10 – Функціональна схема перетворювача частоти

3.2 Розробка математичної моделі асинхронного двигуна

Приймемо систему координат, згідно [19] прив'язану до швидкості обертання статора, такої як інвертора. Тоді кутова частота буде визначатись кутовою частотою обертання поля мережі ω_1, а ротора $\omega_2 = \omega_1 - \omega$. Електричні рівняння приймуть вигляд:

$$\underline{u_1} = \underline{i_1} r_1 + \frac{d\underline{\Psi_1}}{dt} + j\omega_1 \underline{\Psi_1}; \quad (2.59)$$

$$0 = \underline{i_2} r_2 + \frac{d\underline{\Psi_2}}{dt} + j\omega_2 \underline{\Psi_2}\,. \quad (2.60)$$

Для обчислення модуля електромагнітного моменту АД використовуємо вектори потокозчеплення статора $\underline{\Psi_1}$ і струму ротора $\underline{i_2}$, підставивши у вираз моменти:

$$m = \frac{3}{2} z_p L_m \left(\underline{i_2} \times \underline{i_1}\right) = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m}{L_2} \left(\Psi_2 \times \underline{i_1}\right); \quad (2.61)$$

$$\underline{i_1} = \frac{\Psi_1 - \underline{i_2} L_m}{L_1} = \frac{\Psi_1}{L_1} - \underline{i_2} k_1\,. \quad (2.62)$$

Вираз для моменту прийме вигляд:

$$m = \frac{3}{2} z_p k_1 \left(\underline{i_2} \times \underline{\Psi_1}\right) = -\frac{3}{2} z_p k_1 \left(-\Psi_{1y} i_{2x} + \Psi_{1x} i_{2y}\right) =$$

$$= \frac{3}{2} z_p k_1 \left(\Psi_{1y} i_{2x} - \Psi_{1x} i_{2y}\right), \quad (2.63)$$

де $k_1 = \frac{L_m}{L_1}$ – коефіцієнт зв′язку статора.

За винятком потоку $\Psi_2 = \Psi_1 k_1 + \grave{L_2} i_2$ і струм $\underline{i_1} = \frac{\Psi_1}{L_1} - \underline{i_2} k_1$ підставивши у вираз (2.36), отримаємо:

$$\underline{u_1} = \Psi_1 \left(\frac{1}{T_1} + p + j\omega_1\right) - i_2 k_1 r_1; \quad (2.63)$$

$$0 = \Psi_1(p + j\omega_2) + i_2\frac{\left(r_2 + \grave{L_2}p + j\omega_2\grave{L_2}\right)}{k_1}, \quad (2.64)$$

де $\grave{L_2} = \frac{L_2L_1 - {L_m}^2}{L_1} = L_2\sigma -$ приведена індуктивнсть;

$\sigma = 1 - \frac{{L_m}^2}{L_2L_1}$ – коефіцієнт розсіювання;

$T_1 = \frac{L_1}{r_1}$ – електромагнітна постійна статора.

Зробивши перетворення, отримаємо вираз:

$$\underline{u_1} = \Psi_1\left(\frac{1}{T_1} + j\omega_1\right) + i_2\frac{\grave{r}\left(1 + p\grave{T}\right) + j\omega_2\grave{L_2}}{k_1}, \quad (2.65)$$

де $\grave{r} = {k_1}^2r_1 + r_2 -$ приведений опір;

$\grave{T} = \frac{\grave{L_2}}{\grave{r}} -$ постійна часу.

Розділимо рівняння (2.65) на дійсні і уявні частини:

$$u_{1x} = \left(\Psi_{1x} + j\Psi_{1y}\right)\left(\frac{1}{T_1} + j\omega_1\right) + \left(i_{2x} + ji_{2y}\right)\frac{\grave{r}\left(1 + p\grave{T}\right) + j\omega_2\grave{L_2}}{k_1} \quad (2.66)$$

Струм ротора в проекціях:

$$i_{2x} = \frac{k_1}{\grave{r}(1 + p\grave{T})}\left(\frac{\Psi_{1x}}{T_1} - \Psi_{1y}\omega_1 - u_{1x} + i_{2y}\omega_2\frac{\grave{L_2}}{k_1}\right); \quad (2.67)$$

$$i_{2y} = \frac{k_1}{\grave{r}(1 + p\grave{T})}\left(\frac{\Psi_{1y}}{T_1} + \Psi_{1x}\omega_1 - i_{2x}\omega_2\frac{\grave{L_2}}{k_1}\right). \quad (2.68)$$

Необхідно виразити потокозчеплення статора, для отримання моменту двигуна:

$$\Psi_{1x} = \frac{T_1}{(1 + pT_1)}\left(u_{1x} + i_{2x}k_1r_1 + \Psi_{1y}\omega\right); \qquad (2.69)$$

$$\Psi_{1y} = \frac{T_1}{(1 + pT_1)}\left(i_{2y}k_1r_1 - \Psi_{1x}\omega\right). \qquad (2.70)$$

Функціональна схема асинхронного двигуна наведена на рисунку 2.11.

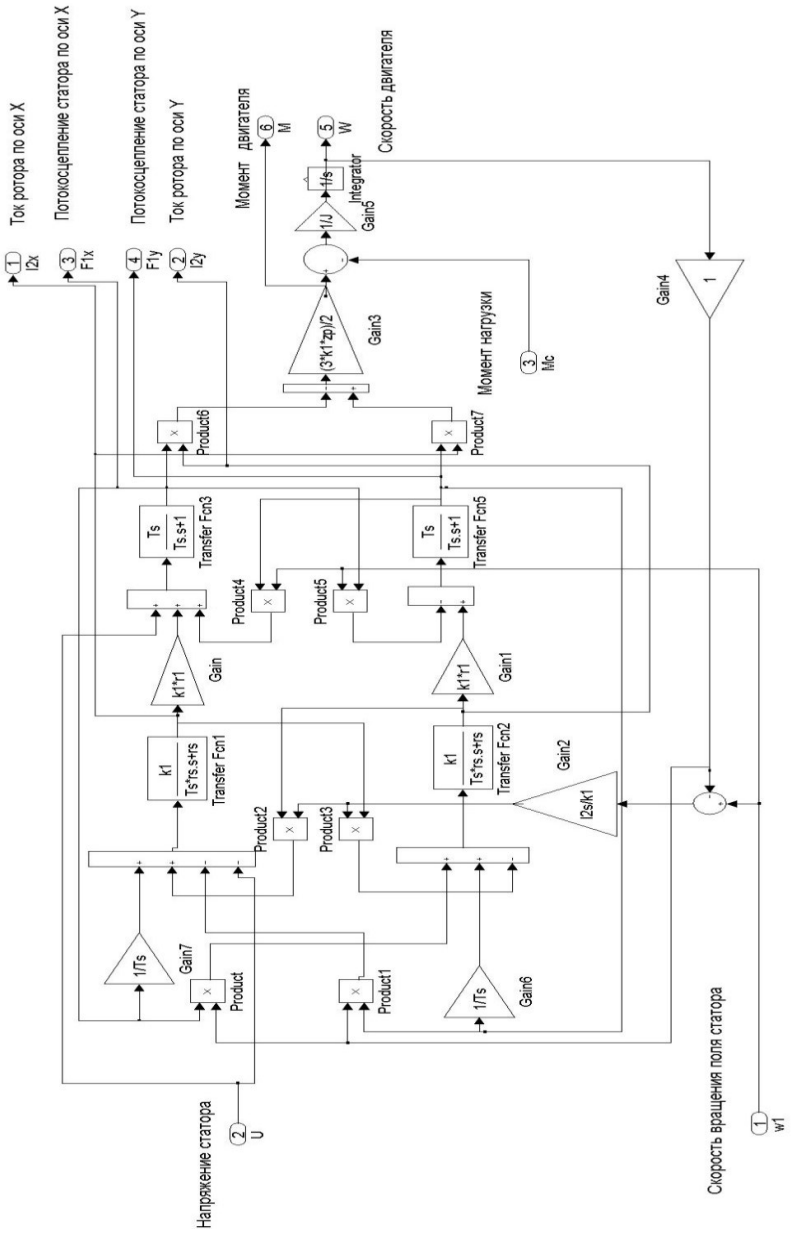


Рисунок 2.11 – Функціональна схема асинхронного двигуна

3.3 Дослідження результатів отриманих при моделюванні ПЧ-АД

Змодельована поведінка двигуна на холостому ході при переході на різні значення швидкості зображена на рисунках 2.12 і 2.13. Представлені перехідні процеси швидкості і моменту на рисунках 2.14 та 2.15. Також побудована динамічна залежність моменту від швидкості при пуску з навантаженням на рисунку 2.16.

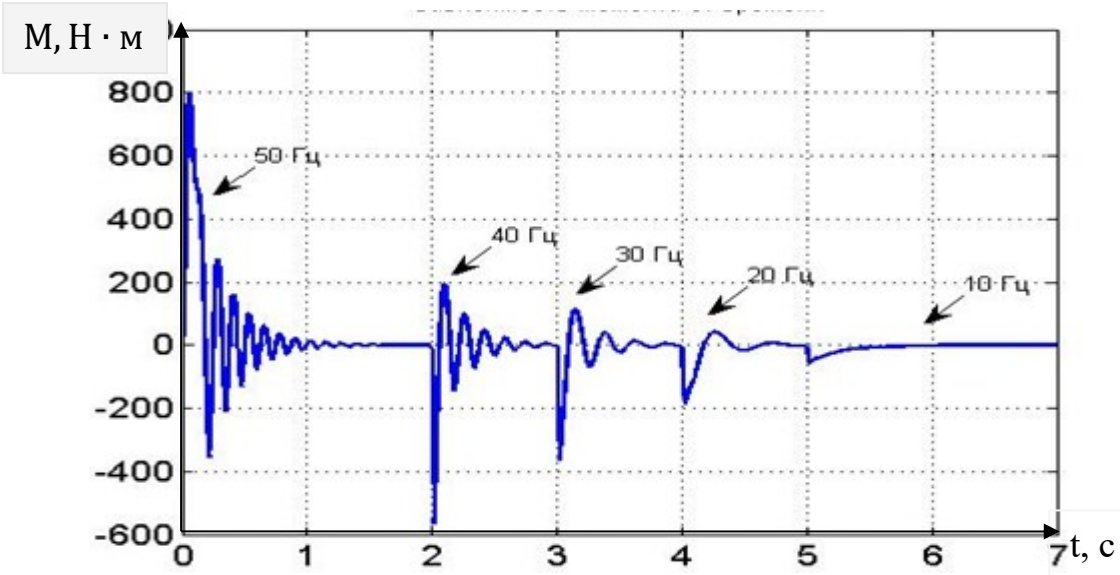


Рисунок 2.12 – Пуск двигуна на холостому ходу, залежність моменту від часу при законі регулювання $U_ф \cdot (f) = f^2$

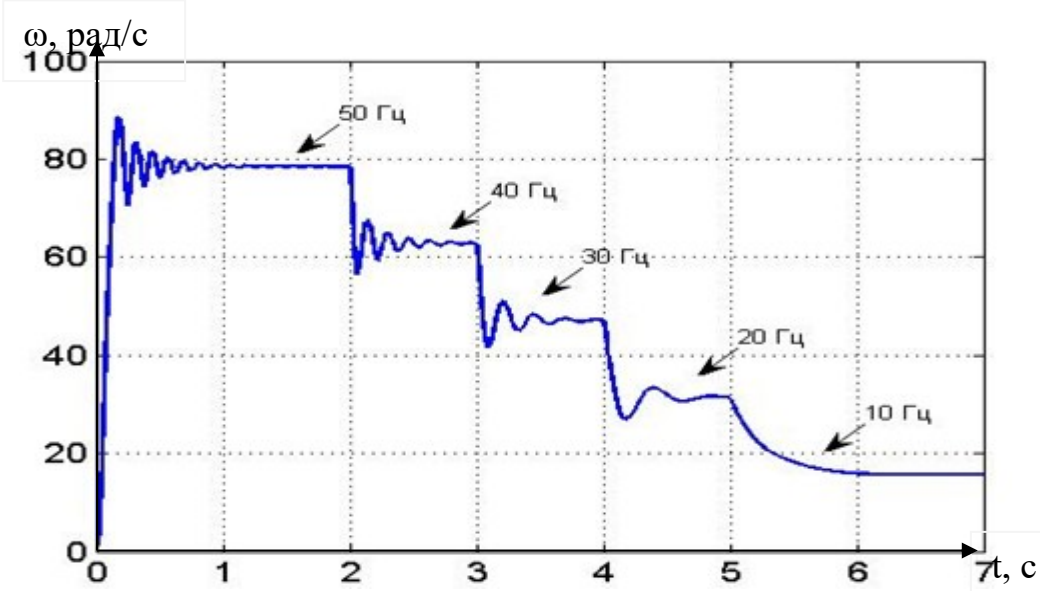


Рисунок 2.13 – Пуск двигуна на холостому ходу, залежність швидкості від часу при законі регулювання $U_ф \cdot (f) = f^2$

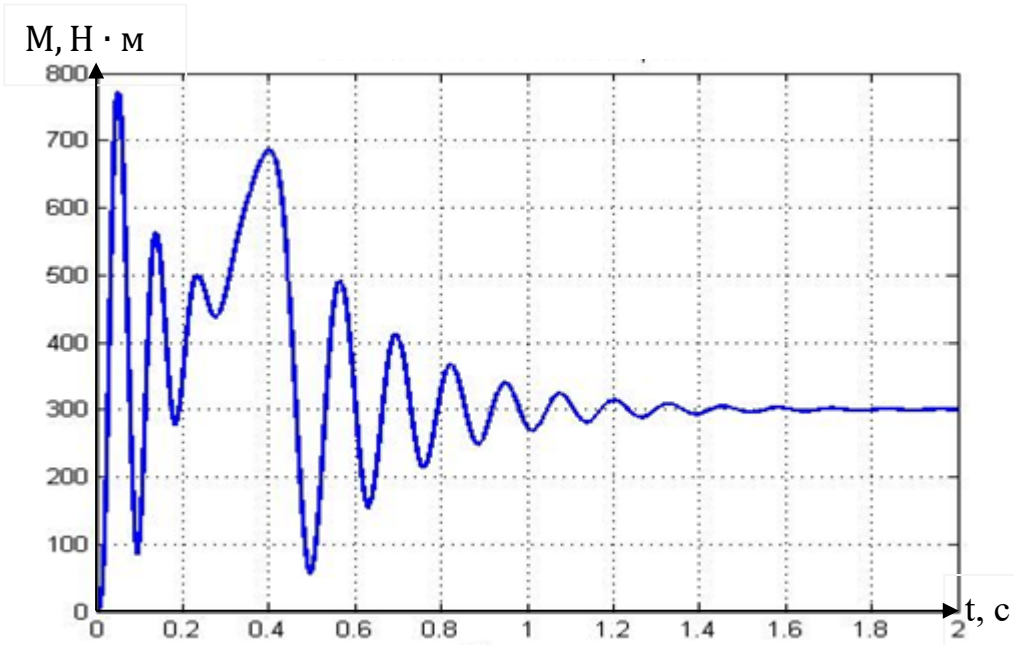


Рисунок 2.14– Пуск двигуна під навантаженням, залежність моменту від часу, при частоті 50 Гц та моменті навантаження 300 Н·м

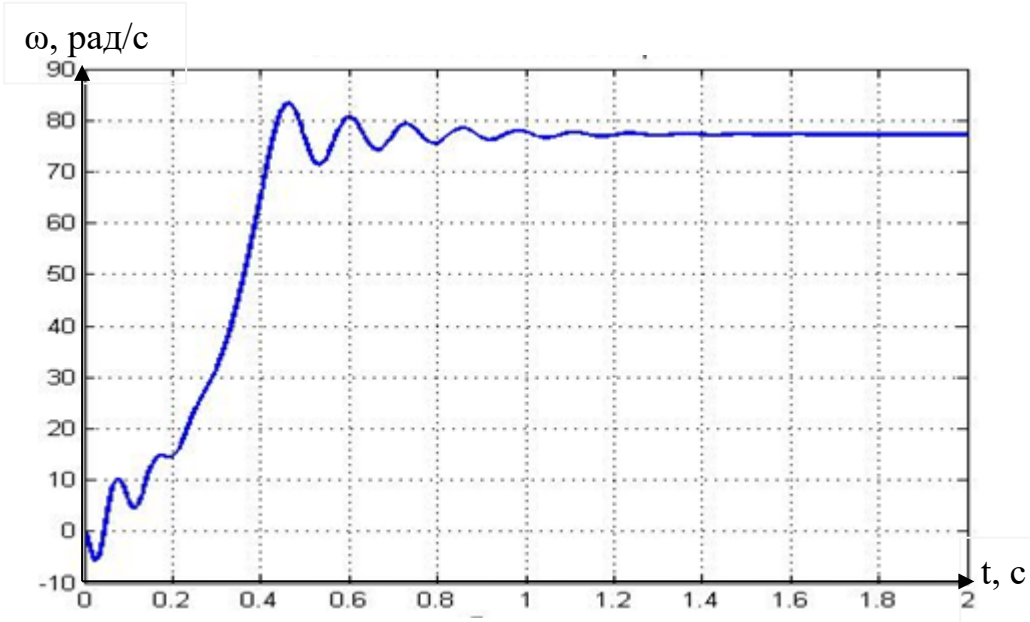


Рисунок 2.15 – Пуск двигуна під навантаженням, залежність швидкості від часу, при частоті 50 Гц та моменті навантаження 300 Н·м

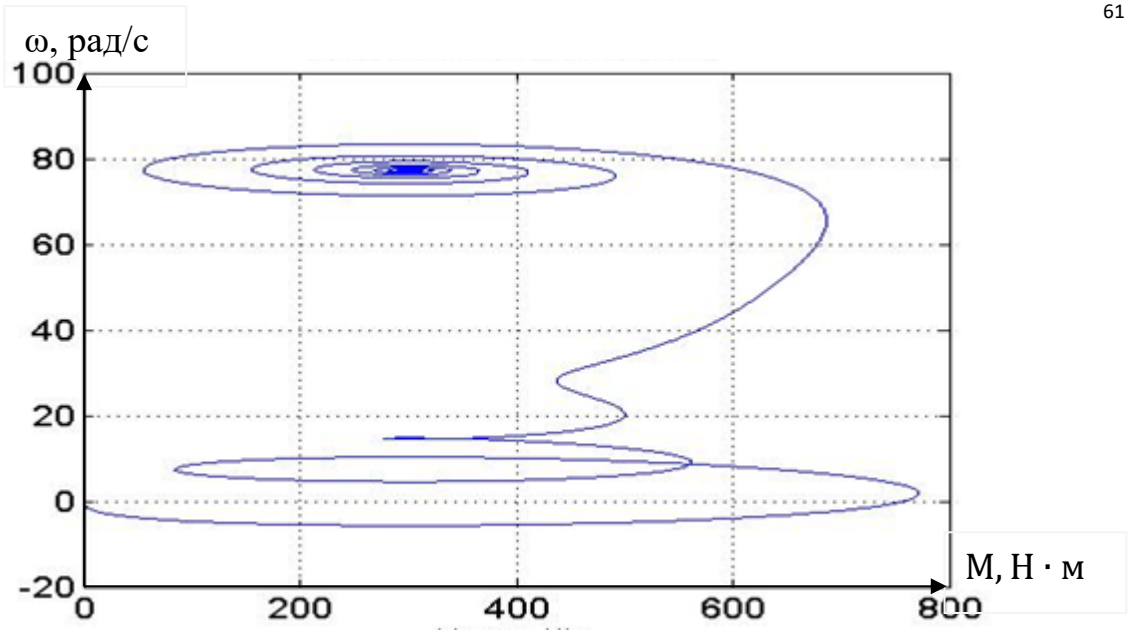


Рисунок 2.16– Пуск двигуна під навантаженням, залежність швидкості від момента, при частоті 50 Гц та моменті навантаження 300 Н·м

Таблиця 2.4 – Показники якості системи ПЧ-АД

Показники якості	Результат моделювання
Час перехідного процесу, с	1,8
Статизм регулювання швидкості	0,96
Перерегулювання за моментом, %	37,5
Перерегулювання за швидкістю, %	36,9
Коливальність за моментом	10
Коливальність за швидкістю	7
Час регулювання моменту, с	1,1
Час регулювання швидкості, с	0,7
Похибка (неузгодженість), %	0

Показники якості ПЧ-АД за результатами аналізу знаходяться в припустимих межах, згідно [17] і відповідають технологічним умовам та режимам обладнання. Таким чином у розділах 2.1 – 2.3 розроблено технічне рішення з модернізації електропривода нагнітаючого вентилятора печі. Застосування нової системи управління, перетворювача частоти Altivar 212

забезпечить виконання основних технологічних процесів зі значною економією енергоресурсів.

3.4 Побудова математичної моделі визначення температури АД

3.4.1 Визначення джерел тепла асинхронного двигуна

Джерелам тепла в електричних машинах відповідають зосередження втрат [18]. Втрати визначаються в ході електромагнітного розрахунку при проектуванні машини і при тепловому розрахунку передбачаються заданими. Зазвичай втрати розбивають на чотири групи.

–механічні втрати на тертя в підшипниках, вентиляційні (на переміщення охолоджувального середовища);

–електричні втрати в обмотках статора і ротора;

– магнітні втрати на гістерезис; вихрові в сталі, пов'язані з основним магнітними потоком;

– додаткові втрати в стали,в обмотках.

Втрати перших трьох груп прийнято називати основними. Додаткові втрати пов'язані з вищими гармоніками магнітного потоку, з витісненням його в пази і розсіюванням в області кінцевих частин. Ці втрати досить значні і розподілені нерівномірно. Оскільки велика частина додаткових втрат зосереджена в поверхневому шарі товщиною кілька міліметрів, то їх питоме значення може у багато разів перевищувати питоме значення основних втрат.

У загальному випадку втрати є функцією координат і часу. Однак в більшості практичних завдань досить знати сумарні розподілені втрати в окремих елементах електричної машини при сталому тепловому режимі.

Термічні дефекти є наслідком порушення нормального теплообміну всередині електричної машини. Нормальний стану системи охолодження

відповідає відображення температурної картини машини в цілому або її вузлів при заданих режимах тепловиділення і відведення тепла.

Термічні дефекти поділяють на:

– загальні (підвищення температури рівномірно по всьому об'ємі машини),

– вузлові (підвищення температури в межах окремого вузла)

– місцеві (локальне підвищення температури, наприклад ділянки обмотки або активної зони сталі).

При наявності місцевих температурних дефектів зростає температура пошкодженої області, також зростає температура суміжних областей (але в меншій мірі) і теплообмінника, внаслідок підвищення температури теплового прикордонного шару.

Причини появи термічних дефектів класифікують за двома групами:

–пов'язані зі збільшенням тепловиділення (режим роботи, пошкодження обмоток, сталі, живлення мережі);

–пов'язані з погіршенням відведення тепла (збільшена температура зовнішнього середовища, погіршення вентиляції, зміна швидкості обертання для двигунів з самовентиляцією).

Зміна характеристики електротехнічної сталі змінюються внаслідок часткового руйнування міжлистової лакової ізоляції у зубців, сталі. З цієї причини поверхневий шар сталі в деякому наближенні можна вважати феромагнітним екраном. Результатом цього є істотне зростання втрат від вихрових струмів, що, природньо, призводить до збільшення потоків розсіювання і зниження ефективного потоку в зазорі. При наявності локального замкненого контуру, за рахунок збільшення втрат на вихрові струми, буде виникати перегрів в ділянці обмотки прилеглому до ділянки пакету сталі із замкнутим контуром, при цьому загальна температура обмотки не перевищуватиме допустиму. Встановлено також факт зниження максимальної індукції в зазорі в залежності від числа і характеру впливів на

сталь при її передремонтній обробці. Характерно, що сталь електричних машин, які пройшли капітальний ремонт, при номінальному навантаженні працює в режимі насичення, в результаті чого в кривій струму мережі з'являються гармоніки вищого порядку, які відповідним чином впливають на загальні втрати в сталі.

Міжвиткове замикання (недостатнє для відбракування двигуна), яке веде до збільшення струму статора в одній або декількох фазах двигуна, додатковому нагріванню міді, що призводить до локальних перегрівів в вузлах двигуна.

3.4.2 Визначення зовнішніх факторів, що впливають на теплові процеси в асинхронному двигуні

Зовнішні фактори, які впливають на теплові втрати двигуна [18]:

- неякісне живлення мережі ─ в даний час пов'язане з живленням від перетворювача частоти, який вносить додаткові гармоніки напруги і струму, несиметричне живлення. Несиметрія напруги живлення призводить до зміни режиму енергоспоживання, виникнення змінної складової потужності АД, змінної складової моменту і коливань швидкості обертання двигуна. У режимах несиметрії напруги живлення, струм статора АД залишається синусоїдальним, але споживана потужність містить гармоніки подвійної частоти. Несиметрія міжфазних напруг викликається наявністю складових зворотній послідовності, а несиметрія фазних - ще і наявністю складових нульової послідовності. Опір АД струмів прямої послідовності в 5-7 разів менше опору струмів зворотньої послідовності. При наявності навіть невеликої за значенням складовою напруги зворотної послідовності виникає значний струм. Цей струм накладається на струм прямої послідовності і

викликає додатковий нагрів ротора і статора. Несинусоїдальність напруги мережі живлення - це спотворення форми кривої напруги, викликані струмами вищих гармонік елементів мережі з нелінійними вольт-амперними характеристиками. В АД вищі гармоніки викликають великі втрати активної потужності, пов'язані зі збільшенням активних опорів обмоток. При наявності вищих гармонік в кривій напруги процес старіння ізоляції протікає більш інтенсивно, ніж при синусоїдальній напрузі.

– живлення від не номінальної напруги. Вплив зміни напруги U_1 живлення при умові постійної живильної частоти f_1. Зазвичай АД розраховують так, щоб при номінальному режимі ККД і коефіцієнт потужності були близькі до максимальних. З іншого боку, максимум має місце, коли механічні втрати і втрати в сталі рівні електричним втрат в обмотках. Тому вплив зміни напруги є неоднозначним і залежить від навантаження на валу двигуна. При збільшенні напруги відбувається зростання магнітного потоку і, отже, збільшення струму холостого ходу і магнітних втрат в сталі.

– живлення від не номінальної частоти. Вплив зміни частоти f_1 живлення на роботу двигуна за умови сталості напруги живлення $U_1 = const$ і моменту навантаження $M_c = const$. Зміна частоти призводить до зміни магнітного потоку і відповідному йому струму ротора I_2 і активної складової струму $I_2^{'}$ статора. При зменшенні частоти f_1 відбувається збільшення магнітного потоку і струму намагнічування, а, отже, і струму холостого ходу I_0, який через насичення сталі магнітопровода зростає швидше, ніж магнітний потік. Зазвичай зменшення частоти f_1 на 10% викликають збільшення струму I_0 на 20-30%. Так як струм є практично реактивним, то це призводить до зниження коефіцієнта потужності двигуна.

При збільшенні частоти f_1 відбувається пропорційне зростання частоти обертання ω. Якщо навантаження має вентиляторний характер, то

навантажувальний момент зростає пропорційно квадрату або кубу частоти обертання, отже, частоти f_1. Крім того, магнітний потік зменшується обернено пропорційно до зміни частоти. Все це призводить до різкого збільшення струму ротора I_2. При зростанні частоти на 10% струм ротора двигуна, що обертає вентилятор, збільшиться приблизно в 1,5 рази, що може привести до перегріву двигуна. При незмінному моменті навантаження, збільшення частоти підвищує небезпеку порушення стійкості двигуна, так як максимальний момент двигуна знижується пропорційно f_1^2. Таким чином, відхилення частоти f_1 від номінального значення призводить до погіршення умов роботи двигунів в режимах, близьких до номінальних навантажень. У цьому випадку втрати в сталі можуть бути визначені за допомогою виразу [20]:

$$P_c = P_г + P_{вх} = a f U_1^2 + b f^2 U_1^2 \qquad (2.71)$$

де f – частота живильної мережі, Гц;

U_1 – напруга статора, Тл;

a = 1.4, b = 1,6 – коефіцієнти.

При зниженні частоти на 20% при номінальній напрузі, втрати в сталі зростають на 15%. Однак зростання втрат в сталі компенсується зниженням втрат в міді, так як знизиться струм, що протікає по обмотках статора і ротора. Таким чином, при вимушеному зниженні частоти живильної мережі до 80% АД може працювати в умовах більш легких, ніж в номінальному режимі, так як при такому зниженні частоти, струм статора знижується до 90%, зменшуючи нагрів машини. При одночасному відхиленні частоти і напруги АД може віддавати номінальну потужність, якщо сумарне відсоткове відхилення цих параметрів не перевищує 10%.

3.4.3 Створення математичної моделі визначення інтегральної температури асинхронного двигуна

Для запобігання передчасного виходу з ладу необхідно контролювати його тепловий стан або вміти розрахувати температуру найбільш нагрітих елементів двигуна при заданому характері навантаження. Контроль теплового стану реального двигуна ускладнений, тому основну увагу приділимо його розрахунку на базі еквівалентної теплової схеми заміщення (ЕТСЗ), яка зображена на рисунку 2.17. Даний метод заснований на заміні двигуна, що складається з n-елементів з властивими кожному елементу питомою теплоємністю і тепловіддачею, системою з кінцевим числом розрахункових тіл. Зазвичай в практичних розрахунках число розрахункових тіл приймається рівним двом, п'яти, семи, не перевищують цих чисел і теплові аналоги, що використовуються в схемах захисту двигунів. Тепловий стан n-го тіла може бути описано наступним рівнянням, згідно [20]:

$$C_n \frac{d\Theta_n}{dt} = \sum_{i=1}^{q(i\neq n)} \Lambda_{in}(\Theta_i - \Theta_n) + P_n \qquad (2.72)$$

де C_n – теплоємність n-го тіла; Θ_n – температура n-го тіла; Θ_i – температура одного із сусідніх тіл i; q – кількість тіл, пов'язаних в тепловому відношенні з даним тілом n; Λ_{in} –тепловіддача від одного із сусідніх тіл і к даному тілу n; P_n – втрати потужності в даному тілі n; t – даний час.

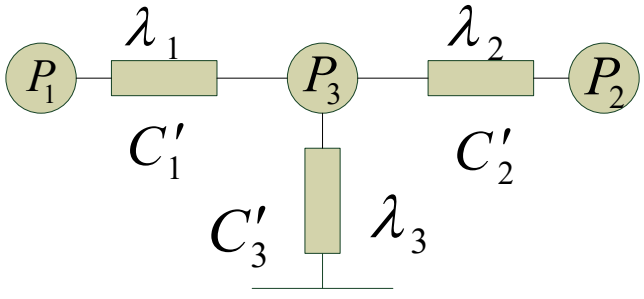


Рисунок 2.17 – Схема заміщення теплових процесів в асинхронному двигуні

Для системи з 3-х тіл, рівняння теплового балансу матимуть вид:

$$\left\{\begin{array}{c} C_1{}' \dfrac{d\Theta_1}{dt} = P_{M1}(t) - a_{11}\Theta_1 + a_{13}\Theta_3 \\ C_2{}' \dfrac{d\Theta_2}{dt} = P_{M2}(t) - a_{22}\Theta_2 + a_{23}\Theta_3 \\ C_3{}' \dfrac{d\Theta_3}{dt} = P_{M3}(t) - a_{33}\Theta_3 + a_{13}\Theta_1 + a_{23}\Theta_2 \end{array}\right\}, \quad (2.73)$$

де $C_1, C_2, C_3 -$ повні теплоємності обмоток статора, ротора і сталі статора;

$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ - поточне значення температур обмоток;

$P_{M1}(t), P_{M2}(t), P_{M3}(t)$ - поточне значення втрат в статорі і роторі і сталі статора.

Повна теплоємність сталі

$$C_3{}' = C_3 \cdot m_3 = 500 \cdot 52{,}7 = 26350 \text{ Дж/С}^o, \quad (2.74)$$

де $C_3 = 500$ Дж/кг $\cdot$ С^o - теплоємність сталі;

$m_3 = 52{,}7$ кг – маса сталі статора.

Повна теплоємність обмотки статора

$$C_1{}' = C_1 \cdot m_1 = 390 \cdot 6{,}26 = 2440 \text{ Дж/С}^o, \quad (2.75)$$

де $C_1 = 390$ Дж/кг $\cdot$ С^o – теплоємність меді,

$m_1 = 6{,}26$ кг - маса міді статора.

Повна теплоємність обмотки ротора

$$C_2{}' = C_2 \cdot m_2 = 910 \cdot 4{,}18 = 3803 \text{ Дж/С}^o, \quad (2.76)$$

де $C_2 = 910$ Дж/кг $\cdot$ С^o – теплоємність алюмінія,

$m_2 = 4{,}18$кг - маса алюмінія ротора.

Вираз для електричних втрат має вигляд, згідно [21]:

$$\begin{Bmatrix} P_{M1}(t) = 3{I_s}^2 R_s \\ P_{M2}(t) = 3{I_r}^2 R_r \\ P_{M3}(t) = P_{ст.н} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \end{Bmatrix} \quad (2.77)$$

де β =1,5 – коефіцієнт втрат;

I_s, I_r – діючі значення струмів ротора і статора;

$R_3 = 0{,}0093$ – тепловий опір поверхні двигуна;

$R_{13} = 0{,}0058$ – тепловий опір обмотки статора;

$R_{23} = 0{,}00981$ - тепловий опір обмотки ротора;

$B \approx 1{,}5$ Тл - індукція статора;

$P_{ст.ном} = 682$ – номінальні втрати в сталі двигуна.

Вираз для струмів статора і ротора

$$\begin{Bmatrix} I_s = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{{i_{sx}}^2 + {i_{sy}}^2} \\ I_r = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{{i_{rx}}^2 + {i_{ry}}^2} \end{Bmatrix} \quad (2.78)$$

Визначаємо коефіцієнти схеми заміщення, тоді рівняння матиме вид:

$$\begin{Bmatrix} 2440\frac{d\Theta_1}{dt} = \frac{3R_s}{2} \cdot \left(\sqrt{{i_{sx}}^2 + {i_{sy}}^2}\right)^2 - 172{,}4 \cdot \Theta_1 + 172{,}4 \cdot \Theta_3 \\ 3803\frac{d\Theta_2}{dt} = \frac{3R_r}{2} \cdot \left(\sqrt{{i_{rx}}^2 + {i_{ry}}^2}\right)^2 - 102 \cdot \Theta_2 + 102 \cdot \Theta_3 \\ 26350\frac{d\Theta_3}{dt} = 682 \cdot \left(\frac{f}{f`}\right)^{1.5} - 382{,}2 \cdot \Theta_3 + 172{,}4 \cdot \Theta_1 + 102 \cdot \Theta_2 \end{Bmatrix} \quad (2.79)$$

Підставивши значення отримаємо:

$$\begin{cases} \Theta_1 = \dfrac{1}{\left(p + \dfrac{172{,}4}{2440}\right)}\left(\dfrac{P_{M1}(t) + 172{,}4 \cdot \Theta_3}{2440}\right) \\ \Theta_2 = \dfrac{1}{\left(p + \dfrac{102}{3803}\right)}\left(\dfrac{P_{M2}(t) + 102 \cdot \Theta_3}{3803}\right) \\ \Theta_3 = \dfrac{1}{\left(p + \dfrac{382{,}2}{26350}\right)}\left(\dfrac{P_{M3}(t) + 102 \cdot \Theta_2 + 172{,}4 \cdot \Theta_1}{26350}\right) \end{cases} \quad (2.80)$$

Задамося двома умовами:

– двигун охолоджується незалежно і охолоджуючий потік не залежить від швидкості двигуна;

– охолодження двигуна залежить від швидкості;

Залежність провідності сталі статора від швидкості має вигляд:

$$\lambda_3 = \lambda_{3н}\frac{1 + 0{,}1\omega_3}{1 + 0{,}1\omega_{рот.н}} \quad (2.81)$$

Для визначення сталої температури, не враховуємо диференціальну складову рівняння (2.79), тоді система рівнянь прийме вигляд

$$\begin{cases} \Theta_1 = \dfrac{P_{M1}(t) + 172{,}4 \cdot \Theta_3}{172{,}4} \\ \Theta_2 = \dfrac{P_{M2}(t) + 102 \cdot \Theta_3}{102} \\ \Theta_3 = \dfrac{P_{M3}(t) + 172{,}4 \cdot \Theta_1 + 102 \cdot \Theta_2}{382{,}2} \end{cases} \quad (2.82)$$

Функціональна схема для визначення втрат потужності, яка розроблена в середовищі Mathlab зображена на рисунку 2.18.

Функціональна схема для визначення температури двигуна, яка розроблена в середовищі Mathlab зображена на рисунку 2.19.

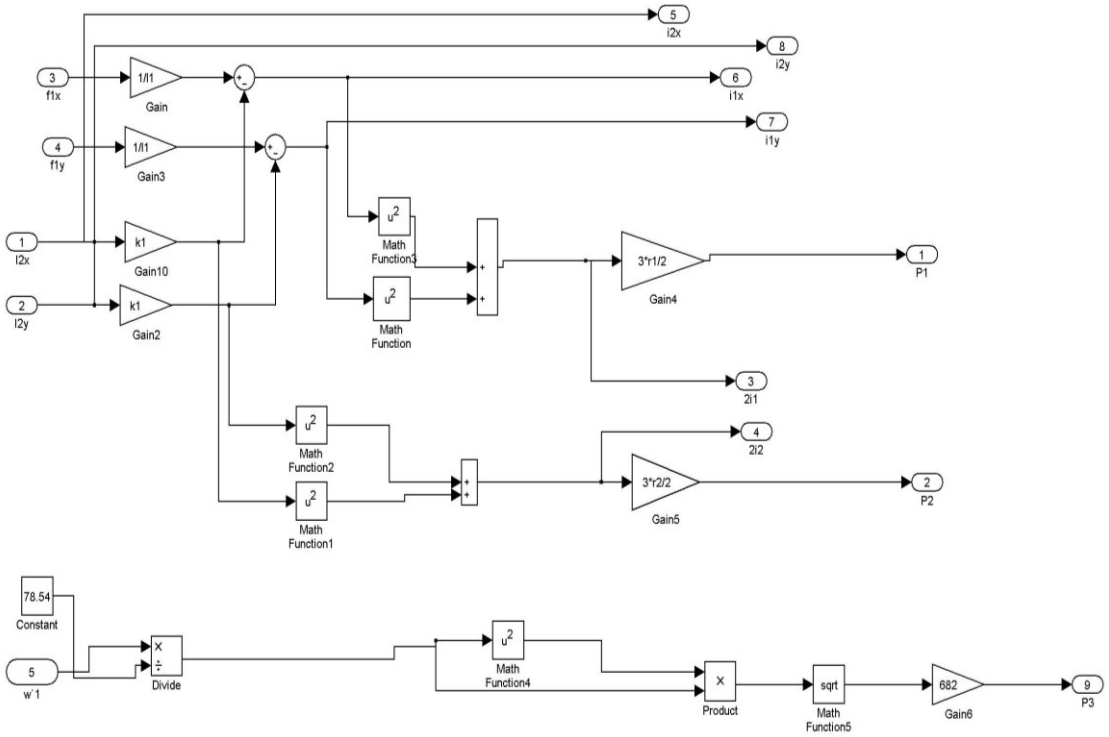


Рисунок 2.18 – Функціональна схема для визначення втрат потужності

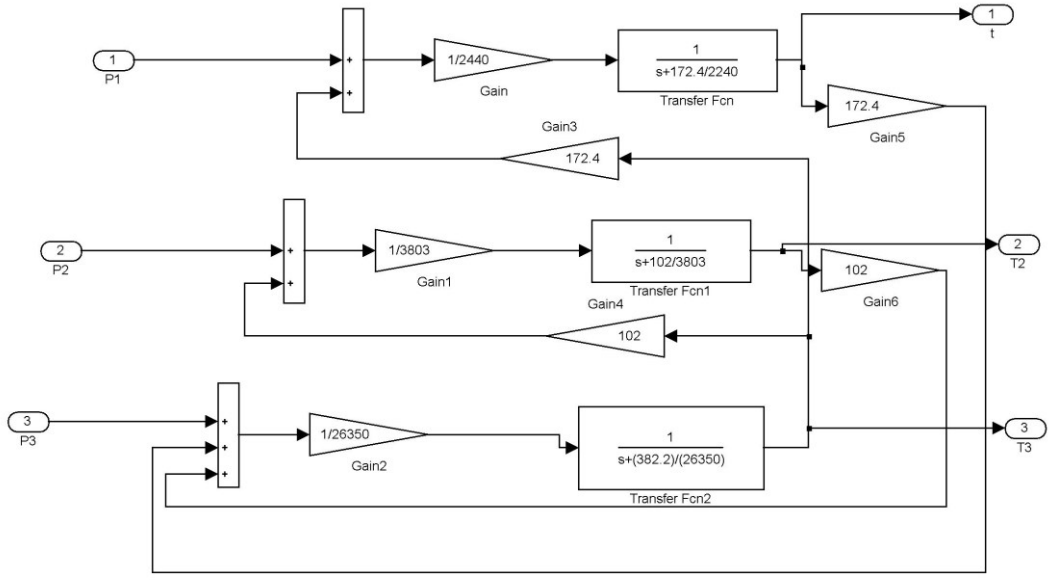


Рисунок 2.19 – Функціональна схема для визначення температури двигуна

3.4.4 Дослідження впливу зміни частоти на теплові процеси в АД при живленні від ПЧ

Проведемо моделювання для різних значень моменту навантаження, які були отримані графічним шляхом при побудові механічних характеристик електропривода та навантаження вентилятора. Визначимо залежність нагрівання двигуна від швидкості обертання та зміни частоти. Побудуємо графіки залежності перевищення температури частин машини (обмоток статора і ротора, сталі статора) від частоти напруги живлення: $T_1(f,t), T_2(f,t), T_3(f,t)$, які зображені на рисунках $2.22 - 2.23$.

При цьому двигун охолоджується незалежно, тобто тепловіддача з поверхні двигуна постійна і не залежить від швидкості обертання двигуна, момент навантаження на валу постійний. Результати моделювання наведені в таблиці 2.5 та на рисунках 2.20 і 2.21. Двигун з самовентиляцією, тепловіддача з поверхні двигуна пов'язана залежністю (2.81), коефіцієнти і дані наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.5 – Залежність усталеного перевищення температури двигуна від частоти напруги живлення і незалежному охолодженні навантаження над навколишнім середовищем

Частота	Стала температура обмотки статора,℃ / Постійна часу, с	Стала температура обмотки ротора, ℃ / Постійна часу, с	Стала температура сталі статора, ℃ / Постійна часу, с	Момент навантаження Н·м
50	14,9/247	13,27/307	12,05/298	350
40	10,03/256	9,06/313	8,22/303	220

30	6,8/202	6,25/253	5,56/249	135
20	4,9/210	4,59/256	3,89/267	68

Таблиця 2.6 – Залежність усталеного перевищення температури двигуна від частоти напруги живлення і самовентиляції над навколишнім середовищем

Частота	Стала температура обмотки статора,℃ / Постійна часу, с	Стала температура обмотки ротора, ℃ / Постійна часу, с	Стала температура сталі статора, ℃ / Постійна часу, с	Момент навантаження Н·м	коефіцієнт тепловід-дачі, %
50	14,9/247	13,27/307	12,05/298	350	1
40	14,98/436	14,7/494	13,7/485	220	0,8940
30	23,62/1119	23,07/1172	22,39/1171	135	0,7880
20	∞	∞	∞	68	0,5759

Таким чином у розділі 2.5 був досліджений вплив зміни частоти на тепловий стан двигуна при різній системі вентиляції. Усталена температура для двигуна з самовентиляцією і з незалежним охолодженням при зміні частоти відрізняються в значній мірі. Відхилення частоти f_1 від номінального значення призводить до погіршення умов роботи двигуна. Для двигуна з самовентиляцією, згідно отриманих результатів при моделюванні, зміна температури від частоти має нелінійний характер. Це пов'язано зі зменшенням тепловідведення з поверхні двигуна, тобто зменшується теплопровідність λ_3 сталі статора на коефіцієнт в %. При граничній частоті 30 Гц, яка залежить від навантаження, відбувається постійний нагрів двигуна, порушується баланс між тепловіддачею і нагріванням двигуна. Це, в поєднанні з перевантаженнями, зниженням якості електроенергії призводить до зростання втрат на перегріванні і, відповідно температури ізоляції. Що в свою чергу

призводить до істотного скорочення терміну служби електродвигуна. Внаслідок цього зменшуються техніко-економічні показники двигуна, такі як коефіцієнт потужності і коефіцієнт корисної дії і збільшується обсяг споживаної реактивної потужності. Тому буде доцільно замінити стандартний двигун АИР225М8 на новий АДЧР225М8, який призначений для роботи у складі регульованого електропривода. Тим самим ми забезпечимо ефективну роботу вентилятора .

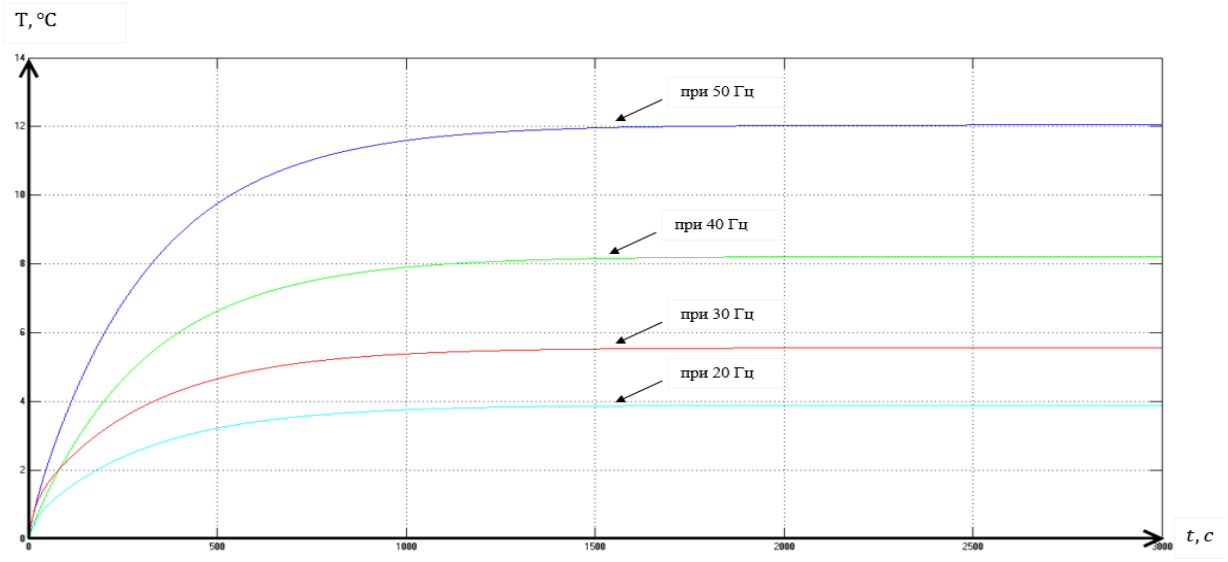


Рисунок 2.20 – Залежність перевищення температури сталі статора над навколишнім середовищем при різних частотах і незалежному охолодженні навантаження

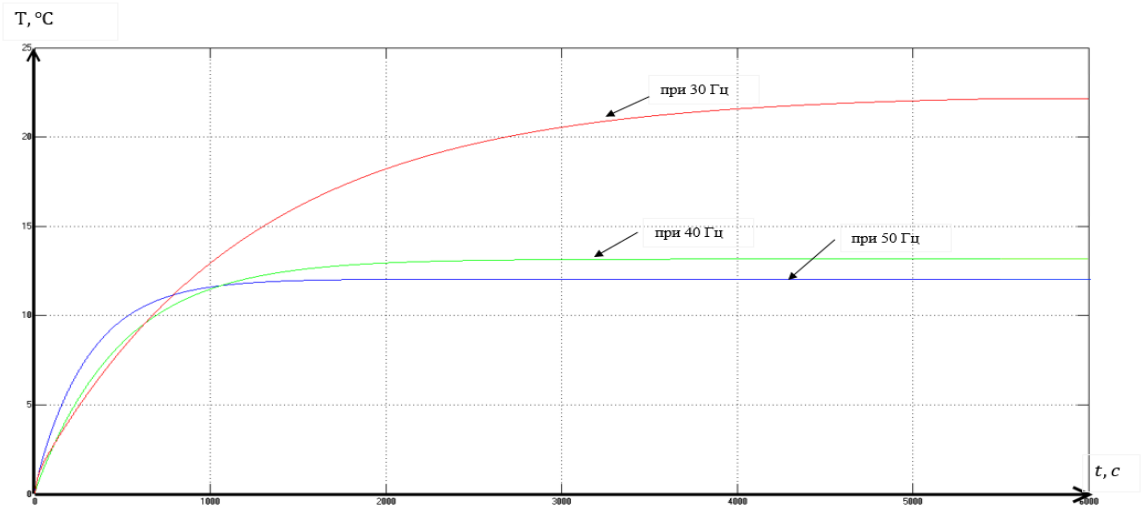


Рисунок 2.21 – Залежність перевищення температури сталі статора над навколишнім середовищем при різних частотах і самовентиляції

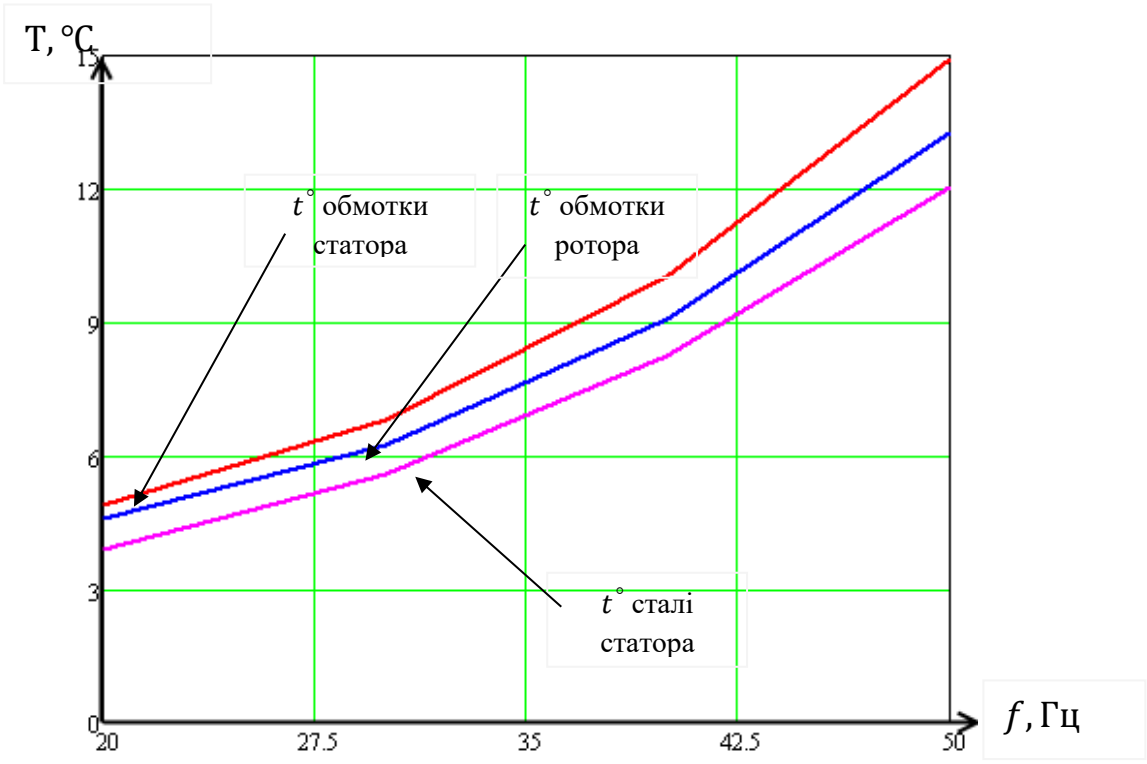


Рисунок 2.22 – Залежність усталеного перевищення температури обмоток статора і ротора, сталі статора від частоти напруги живлення для двигуна з незалежною вентиляцією

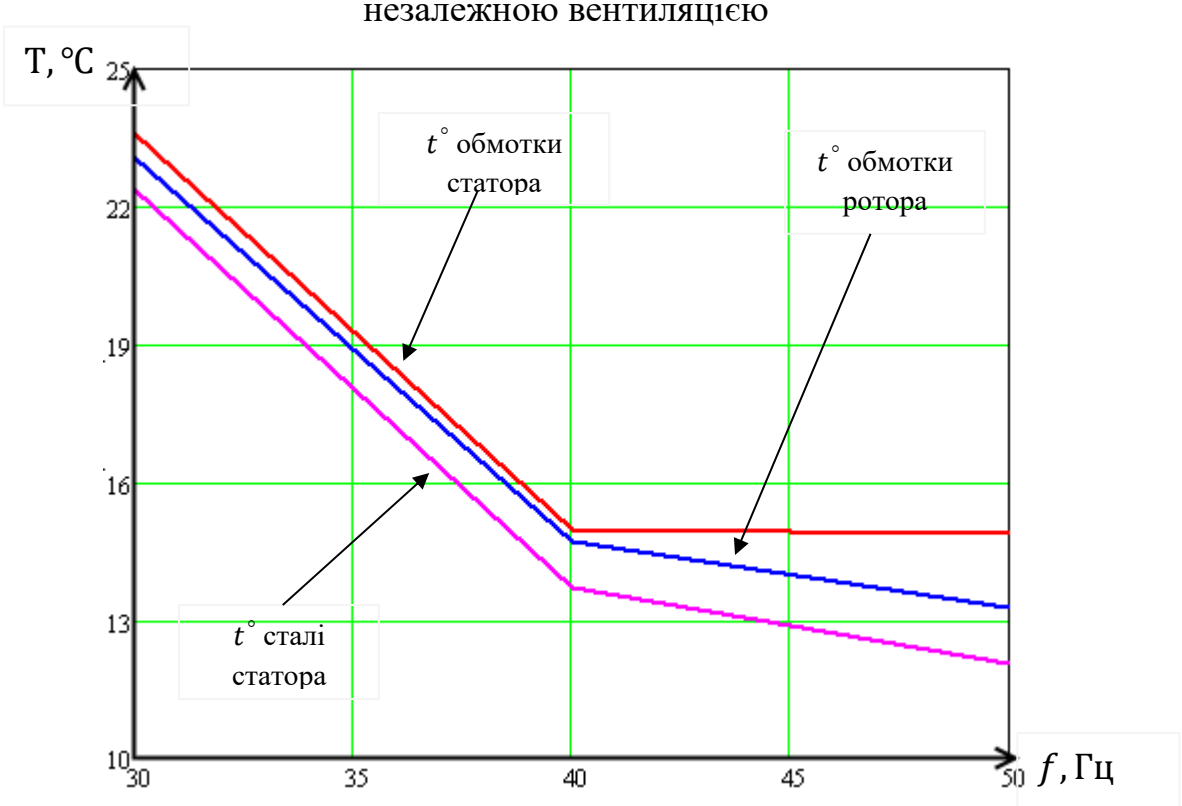


Рисунок 2.23 – Залежність усталеного перевищення температури обмоток статора і ротора, сталі статора від частоти для двигуна з само вентиляцією

3.4.5 Енергозбереження

В умовах енергетичної кризи та у зв'язку з ростом цін на електроенергію, а також обмеженими можливостями збільшення потужності енергогенеруючих установок, проблема енергозбереження здобуває особливу актуальність і має велике практичне значення. Оскільки електроприводи споживають більше 60% наявної електроенергії, то підвищення їх енергетичної ефективності є основним резервом енергозбереження[22].

Більшість нерегульованих електроприводів працюють зі значним недовантаженням, що призводить до великих втрат енергії та зниження коефіцієнта потужності. Широке застосування потужних силових керованих випрямлячів, перетворювачів напруги й частоти для регульованого електроприводу постійного та змінного струму значно загострили проблему збереження необхідної якості електроенергії, передовсім коефіцієнта потужності, нелінійних спотворювань напруги та струму, стабільності напруги та ін. Традиційне рішення цієї проблеми за допомогою дорогих пасивних фільтрів є недостатньо ефективним через труднощі настроювання на фіксовану частоту.

Тенденція розвитку силової перетворювальної техніки в побуті та промисловості така, що частка вищих гармонік буде безупинно збільшуватись. Тому розробка енергозберігаючих електромеханічних систем (ЕМС) і підвищення якості електроенергії засобами промислового електроприводу є актуальною і багатоплановою задачею, успішне вирішення якої можливе: вибором раціонального типу електроприводу; вибором раціональних режимів роботи технологічних установок; через використання енергозберігаючих технологій; впровадженням економічних систем плавно регульованого електроприводу; підвищенням енергетичної ефективності ЕМС, шляхом усунення двостороннього енергетичного зв'язку між мережею та двигуном за допомогою нагромаджувачів енергії; гнучким керуванням потоками електроенергії за допомогою перетворювачів напруги з ШІМ (активні фільтри) у будь якому напрямку за даним законом, реалізуючи обмін

реактивної потужності (включаючи і потужність вищих гармонік) між мережею та нагромаджувачем електроенергії. Це дозволяє коректувати коефіцієнт потужності, нелінійні спотворювання, симетричним навантаження, відстороняти короткочасні провали напруги при коротких замиканнях. Прогрес в галузі цілком керованої напівпровідникової техніки зробив реальним можливість ефективного вирішення проблеми економії та корекції традиційних показників якості електроенергії щодо головного її споживача, яким є електропривод [22].

Розглянемо детальніше доцільність вибору раціонального типу електроприводу.

У переважній більшості випадків перевагу слід віддавати системам електроприводу змінного струму, що обумовлене наступними причинами:

• електроенергія виробляється і передається до споживачів, як правило, на змінному струмі;

• електродвигуни постійного струму по габаритах, вазі і вартості в 1,5...2,5 разу перевищують асинхронні і синхронні двигуни тієї ж потужності і частоти обертання:

• надійність приводних двигунів постійного струму, зважаючи на наявність колекторно-щіткового вузла і, практично, повну відсутність (за винятком декількох типорозмірів) закритого виконання таких двигунів значно нижче, ніж асинхронних короткозамкнених;

• момент інерції двигунів постійного струму в 1,5... 1,7 раз вище, ніж у асинхронних з короткозамкненим ротором, це обумовлює швидкодію систем приводу змінного струму;

• енергетичні показники і регулювальні властивості приводу змінного струму за наявності статичних перетворювачів не гірше, ніж у приводів постійного струму.

З точки зору енерго- і ресурсозбереження раціональним є використання систем регульованого привода змінного струму, особливо у металургії і енергетиці. Застосування систем регульованого електроприводу може в окремих випадках заощадити до 25...50% електроенергії .

ВИСНОВКИ

В випускної роботі на тему: Підвищення енергоефективності електропривода витяжного вентилятора» була проведена модернізація електроприводу шляхом додання у існуючу систему електроприводу перетворювача частоти ATV212HD37N4 потужністю 37 кВт.

У аналітичній частині роботи проаналізовано стан питання за науково – технічними джерелами, розглянута технологічна характеристика роботи обладнання, схема електропривода роботи вентиляторної установки та система керування. Проведений аналіз сучасних способів регулювання швидкості подібних механізмів і виходячи з цього поставлена задача модернізації.

В результаті виконання інноваційно-дослідницької частини роботи було запропоновано ряд нових технічних рішень щодо модернізації електроприводу на підставі яких можна зробити такі висновки:

1. Обрана базова структурна схема для електроприводу.

2. Виконаний розрахунок потужності двигуна та виконана його перевірка на перевантажувальну здатність.

3. Обрано перетворювач частоти типу ATV212HD37N4 потужністю 37 кВт та робочим діапазоном регулювання швидкості (15÷200) Гц для приводу вентилятора.

4. Виконано обгрунтування щодо застосування скалярної системи керування перетворювачем частоти.

5. Складена математична модель скалярної системи керування ПЧ-АД для електроприводу.

З огляду на те, що більшість подібних установок експлуатується досить довго й існуюче устаткування на даний момент фізично і морально застаріло, то така заміна дуже перспективна.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. Про техніко-економічну доцільність роботи асинхронних двигунів у мережах з неякісною електроенергією. Гірнича електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – Вип.80. 2008, С 58-62. Издатель: Дніпропетровськ, 2008. http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/archive/80/11.pdf

2. Щербина О. Проблеми економії енергоресурсів в Україні. /Щербина О. // Ринок інсталяцій, травень, 2002, С. 7-8.

3. Озерянський А.А., Білик А.А. Підвищення точності визначення технологічних втрат електроенергії в електричних мережах // Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність-2002». – Київ: Навчальна книга, 2002. – С. 119–120.

4. Регульований електропривод. Теорія. Моделювання: Навчальний посібник / І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко, М. В. Синявський та ін. // За ред.. Голодного І. М. –К.: Аграр. Медіа Груп, 2012. – 513 с.

5. Буряк В.М., Козирський В.В. Насоси, вентилятори та компресори: навчальний посібник. – Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2013. – 312 с.

6. Бажан П.І., Соколовський Я.Б. Гідравлічні машини та компресори: підручник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 368 с.

7. Дмитрієв В.О., Кравченко О.М. Вентиляторні та насосні установки промислових підприємств: навчальний посібник. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2016. – 284 с.

8. Михайлюта С.Л. Методи та засоби вдосконалення обчислювального пристрою систем керування об'єктів з асинхронними машинами. Вісник ЧДТУ. – Черкаси: ЧДТУ. – 2005. – №4. – С.113-116.

9. Михайлюта С.Л., Биков В.І., Михайлюта Г.С.Регульований електропривід як засіб підвищення ефективності виробництва // Вісник інженерної академії України. – № 2, 2010. – С. 267-271.

10. Електронний ресурс: Том.2. Режим доступу: http://servomotors.ru/documentation/electromotor/ book2.

11. Бабакін В.І., Байбурін Е.Р., Башаров Р.А. Курсове проєктування з теорії електропривода: навчальний посібник. – Київ: Вища школа, 2004. – 168 с.

12 Автоматизований електропривод промислових установок / за ред. Г.Б. Онищенка. – Київ: Техніка, 2005. – 520 с.

13 Очков В.Ф. Mathcad для студентів, інженерів і конструкторів. – Київ: BHV, 2008. – 384 с.

14 Квашнін В.О. Автоматизована система контролю та обліку енергоресурсів на підприємстві // Збірник доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Обчислювальна техніка в інформаційних та керуючих системах». – Маріуполь: Інтелект, 2001. – С. 178–182.

15 Радімов С.М. Досвід впровадження частотно-регульованих електроприводів // Енергозберігаючі технології та автоматизація. – Київ: Данко, 2002. – №1–2. – С. 54–56.

16 Радімов С.М. Потенціал енергозбереження та його реалізація засобами електропривода // Світ техніки та технологій. – Харків: Промінь, 2004. – №1. – С. 59–63.

17. Радімов С.М., Фомічов Є.П., Суворов О.В. Ефективність застосування частотних перетворювачів у приводі димососів котелень // Збірник наукових праць міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність-2005». – Одеса: Рефпринтінфо, 2005. – С. 70–75.

18. Браславський І.Я., Ішматов З.Ш., Поляков В.М. Енергозберігаючий асинхронний електропривод / за ред. І.Я. Браславського. – Київ: Академія, 2006. – 256 с.

19. Герман-Галкін С.Г. Комп’ютерне моделювання напівпровідникових систем у MATLAB: навчальний посібник. – Львів: Новий Світ-2000, 2007. – 320 с.

20. Черний А.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й. Моделювання електромеханічних систем. – Кременчук: КДПУ, 2002. – 204 с.

21. Черний А.П., Гладир А.І., Осадчук Ю.Г., Курбанов І.Р., Вошун А.М. Пускові системи нерегульованих електроприводів: монографія. – Кременчук: КНУ, 2006. – 280 с.

22. Лєзнов Б.С. Енергозбереження та регульований електропривод у насосних і повітродувних установках. – Київ: Енергоатомвидав України, 2007. – 360 с.