

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Підгурський Олександр Миколайович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування та розрахунок механічних та електромеханічних
характеристик частотно-регульованого електроприводу
вентиляторів установок теплогенерації
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

Підгурський О. М.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Яковенко Віталій Адольфович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Підгурський О. М. Обґрунтування та розрахунок механічних та електромеханічних характеристик частотно- регульованого електроприводу вентиляторів установок теплогенерації. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження імітаційної моделі асинхронного двигуна в програмному середовищі та аналіз зворотніх зв'язків компенсації моменту та ковзання, точність підтримки швидкості, забезпечення заданого темпу розгону та гальмування.

Практична значимість роботи полягає в перевірці адекватності імітаційної моделі частотно- регульованого електроприводу при запуску та гальмуванні асинхронного двигуна із заданими темпом та параметрами пускового струму та моменту.

Ключові слова: перетворювач частоти, частотно -регульований привід.

ABSTRACT

Pidgurskyi O. M. Justification and calculation of mechanical and electromechanical characteristics of a frequency-controlled electric drive of fans of heat generation plants. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2025. The purpose of the qualification work is to study a simulation model of an asynchronous motor in a software environment and analyze feedback loops of torque and slip compensation, accuracy of speed maintenance, ensuring a given acceleration and braking rate. The practical significance of the work lies in checking the adequacy of the simulation model of a variable frequency drive when starting and braking an asynchronous motor with a given rate and parameters of starting current and torque.

Keywords: frequency converter, frequency-regulated drive.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС КОТЕЛЬНІ	7
1.1. Технічна характеристика систем автоматизації котельні	8
1.2. Допоміжне обладнання котельні	10
1.3. Опис котлоагрегату.	13
1.3.1. Влаштування котла. Характеристика палива	14
1.4. Димосос ДН 6,3 95-40. Опис конструкції. Димова труба	17
1.5. Функціональна схема котлоагрегату. Електропостачання	23
Висновки по розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	27
2.1 Структурна схема АД в програмному середовищі	27
2.1.1. Схема ЧРП скалярного керування АД	30
2.1.2. Розрахунки основних режимів роботи ЧРП скалярного керування АД	32
2.2. Схема ЧРП векторного керування АД	38
2.2.1. Розрахунок електромеханічних характеристик ЧРП при векторному управлінні ЧРП	40
Висновки по розділу 2	48
РОЗДІЛ 3 ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	49
3.1. Оцінка комерційного потенціалу та перспективності проведення досліджень	49
3.2. Оцінка комерційного потенціалу та перспективності проведення наукових досліджень	51

Висновки по розділу 3	52
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54

ВСТУП

У сучасних умовах одним із показників впровадження енергозбереження є модернізація обладнання, що зумовлює ефективне функціонування електрообладнання, приладів та апаратів. А саме термін служби застосовуваного обладнання складає близько 15-20 років, але використання застарілого обладнання може продовжуватися і після вичерпання його фізичного ресурсу. Це є гострою проблемою на багато років. А саме в рамках цієї тематики йтиметься про теплові станції та необхідність модернізації їх устаткування. Вирішення цієї проблеми лежить на поверхні і вимагає максимального використання нових технологічних рішень, які суттєво здатні покращити якість виробничого процесу. Впровадження нового обладнання систем управління, моніторингу тощо, має бути піддане ретельному контролю і не завдавати шкоди персоналу та довкіллю. Буде розглянуто застосування асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором та можливість керування частотою обертання, яка була доведена ще на етапі впровадження даного типу електродвигуна. Однак якийсь час дана можливість була важкореалізована і лише з появою силових напівпровідникових приладів цей процес став дуже простим для реалізації. Силові напівпровідникові прилади – тиристори, застосовувані як система регулювання (частоти обертання), а пізніше до тиристорів додалися IGBT транзистори та MOSFET. Сьогодні частотний спосіб керування асинхронною машиною застосовується по всьому світу. Однією з ключових переваг даного методу управління – це економія споживаної електроенергії, що у випадку великих виробничих об'єктів відіграє важливу роль у фінансовому забезпеченні підприємства та охоче застосовується у всіх сферах діяльності, де є необхідність регулювання частоти обертання електродвигунів. Частотно-регульовані електроприводи в промислово розвинених країнах застосовуються вже понад 40 років. Протягом цього часу формувалася дослідна наукова база знань про ключові особливості даної системи та основних недоліків, на основі яких надалі формувалися методичні довідники,

книги для підготовки кваліфікованих фахівців у цій галузі. А також на основі вже наявного досвіду вдосконалювалися та впроваджувалися нові технічні засоби управління та збору даних про стан системи. На сьогоднішній день накопичено значний досвід при створенні систем управління, які застосовують цей тип приводу. Ряд основних рішень під час розробки системи управління стандартизовано. Напрацьовано досвід застосування частотно-регульованих приводів для модернізації тягодуттьових агрегатів. Застосовуються частотне регулювання приводами мережевих та підживлювальних насосів, вентиляторів та димососів, що дає можливість енергозбереження та покращення якості технологічного процесу, причому вплив на механіко-рухливі механізми знижується, що призводить до збільшення межі міцності рухомих елементів системи (термін служби обладнання), тим самим надійність системи загалом зростає.

Тому **основним завданням** кваліфікаційної роботи: на підставі даних проведеного аналізу перехідних процесів для основних режимів роботи електроприводу оптимізувати вимоги до системи автоматичного управління (САУ) електроприводу, та реалізувати заходи підвищення ефективності роботи системи теплопостачання.

Відповідно **метою роботи** являється аналіз основних способів оцінки механічних та електромеханічних характеристик частотно-регульованого електроприводу вентиляторів установок теплової генерації.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених завдань застосовувалися аналітичні методи аналізу систем автоматизованих систем управління електропривода та їх відповідність технічним вимогам, теоретичної електротехніки, імітаційного моделювання електромеханічних перехідних процесів.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Підгурський О.М., Яковенко В.А. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ПРИ СКАЛЯРНОМУ

УПРАВЛІННІ ЧАСТОТНО- РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ УСТАНОВОК ТЕПЛОГЕНЕРАЦІЇ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 31 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 72-73.

Підгурський О.М. РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТА ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 23 квітня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 61-64.

Підгурський О.М., Яковенко В.А. ОБГРУНТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНО- РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ СКАЛЯРНОМУ УПРАВЛІННІ З КОМПЕНСАЦІЄЮ МОМЕНТУ ТА КОВЗАННЯ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 72-73.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ТЕПЛОГЕНЕРАЦІЇ КОТЕЛЬНІ

Технічний процес котельні на будь-якому підприємстві в основному схожий і не має якихось сильних відмінностей. Застосовується котлоагрегат, система водопідготовки, камери згоряння, системи керування, система відведення продуктів згоряння тощо. У цій роботі розглянемо роботу котла типу KB-1,86Г. До його складу входять мережеві насоси ТРО 80-520/2, насоси CR3- 5, які забезпечують подачу води із зворотного трубопроводу в котел та вже після вода надходить в систему опалення. У процесі роботи котла, графік подачі води підтримується. автоматично, температура води становить 40...90°C. Температура води залежить від температури зовнішнього повітря. Підживлення мереж теплопостачання може здійснюватися як від насосів, як було сказано раніше CR3-5 – це що стосується підживлення водою, а можливо ще такий вид підживлення коли для потреб використовується тепло, що утворилося після згоряння утилізованих відходів. Але все-таки якщо розглядати систему підживлення котла водою, то процес, наступний: вихідна вода проходить через автоматичну систему дозування. У цьому випадку – це може бути автоматична система дозування реагентів, призначена для хімічної водопідготовки в системах теплопостачання, гарячого (ГВП) і холодного водопостачання (ХВП). Вона використовується для зменшення утворення накипу і корозії на внутрішніх поверхнях трубопроводів і устаткування, а також може застосовуватися для хімічної деаерації і знезараження води і надходить в бак пом'якшеної води. Такий бак виступає у ролі регулятора тиску в мережі, наприклад, якщо в контурі знизиться тиск, то в систему управління з датчиків тиску прийде відповідна інформація, а потім з мікроконтролера надходить керуючий сигнал на закачування води за допомогою підживлювального насоса для вирівнювання тиску. Завдяки внутрішньому регулятору температура води автоматично підтримується на

заданому рівні. Цей потік води надходить з котлоагрегату в мережу. Після підмішування води, яка надходить на зворотному колі через спеціальний триходовий клапан-змішувач води, даний потік води охолоджується для потрібного температурного стану. Цей процес враховується, збираються дані і складається конкретний графік. Даний графік заноситься до електронний регулятор ТРМ 32, який надалі видаватиме імпульси на відкриття або закриття на кроковий двигун клапана – змішувача.

1.1. Технічна характеристика систем автоматизації котельні

Згідно з експлуатаційними вимогами, котел повинен бути заживлений від щита автоматизації, які також включені до схеми електропостачання котельні [1,2]. Також можна згадати і такий факт, що система передбачає автоматичне розпалювання, а отже, буде і можливість регулювати температуру горіння. Найчастіше на котлах типу KB-1,86Г можна побачити пальники фірми "Weishaupt". На рис. 1.1. представлений пальник цієї фірми



Рисунок 1.1. – Пальник фірми Weishaupt

«Управління режимом розпалювання, горіння та захисту здійснюється від топкового автомата горіння Weishaupt W-FM 100 котла та щита управління. Обробка сигналів та управління механізмами пальника (сервопривід

повітряної заслінки, сервопривід газового дроселя) відбувається у цифровій формі CAN-шині (рисунок 1.2.)».



Рисунок 1.2. – Шафа управління пальником фірми Weishaupt

Запуск електродвигуна пальника двоступеневий. Спочатку відбувається його пуск у системі "зірка", а через 2сек. перемикання на "трикутник". «Система безпеки котла КВ-1,86Г забезпечує виконання наступних функцій:

1. автоматичне вимкнення – пальник відключається автоматично у залежності від заданої температури;
2. потужність пальника – регулюється автоматично за температурою води на виході казана;
3. індикація температури та тиску води на виході котла;
4. аварійне відключення – при відхиленні будь-якого параметра за межі допустимого, відбувається аварійне відключення пальника (температура, тиск, розрядження);

5. сигналізація про відключення - в диспетчерську надходить сигнал з розшифровкою причин спрацьовування сигналізації;
6. захист котла під час запуску з холодного стану».

1.2. Допоміжне обладнання котельні

Наявність допоміжного обладнання суттєво спрощує обслуговування та збільшує безпеку обладнання за рахунок проміжних захистів. Система автоматизації передбачає різний запуск насоса. Насоси можуть запускатися як дистанційно з пульта керування, і вручну з допомогою місцевих вимикачів. Але слід пам'ятати також про резервне/аварійне живлення, для таких потреб існує автоматичний перемикач для запуску резервного насоса. При реалізації такого пуску на диспетчерський пульт надходить сигнальний звук оповіщення (сигналізація), який говорить про те, що був задіяний роботу режим «Резерв», основний ланцюг вимкнено. Система технологічної сигналізації має режим випробування та вимикання звукового сигналу. На зворотному трубопроводі є вимірювальний прилад тиску – це електроконтактний манометр ДМ2010, працює він за принципом електромагнітного пускача, а саме – при досягненні тиску в позначці нижче 1,5 кгс/см² відбувається віддача імпульсу управління і відбувається включення насоса, відключення ж відбудеться як тільки шкала підніметься вище за відмітку в 2,5 кгс/см². Зовнішній вигляд насоса (рис. 1.3).



Рисунок 1.3. – Насос для підживлення

Тиск контролюється за допомогою електромагнітного манометра та якщо тиск на працюючому насосі став нижче 1.0 кгс/см^2 , то з електромагнітного манометра надходить сигнал на включення резервного насос. Витримка часу складає 5 секунд.

До складу Газовий розподільний вузол (ГРВ) входить лічильник і електронний коректор, який слугує для контролю кількості поданого газу до мережі.



Рисунок 1.4. – Газовий розподільний вузол

Електромагнітний клапан – дуже важливий елемент системи, а також його називають відсікачем газу, з назви зрозуміло, що він необхідний припинення подачі палива. Робота проста, при підвищенні концентрації газу CH_4 або CO в навколишньому просторі (повітряному) відсікач спрацьовує і в котельню газ більше не надходить. Дифманометр ДСП-160 - контролює забруднення різного виду обладнання, у нашому випадку – це газовий фільтр. З'єднання виконується паралельно. ГДК становить 10кПа, після досягнення даної позначки необхідно провести ТО даного приладу. Електроконтактний манометр ДМ2010 визначає контроль тиску газу перед подачею його в котли. У разі відхилення показань приладу за виставлені уставки спрацьовує звукова та світлова сигналізація. Захист виконано в роботі звукової та світлової сигналізації так як робота відноситься до робіт підвищеної небезпеки, тим самим у разі відхилення заданих ГДК, прилад подає сигнал керування на спрацювання сигналізації.

Щит керування мережними насосами та димососом. (Рисунок 1.5.)



Рисунок 1.5. – Щит керування насосами та димососом

Електродвигуни мережевих насосів мають вбудовану температурну захист. Захист має виконання, де застосовуються датчики температур, які вбудовані в обмотку статора і з їх допомогою стає можливим контролювати температуру обмотки. Після досягнення критичного показника температури з датчика надходить інформація в систему управління і після спрацьовує аварійне відключення, та включається резервний двигун з відповідним звуковим оповіщенням.

1.3. Опис котлоагрегату

Котел типу КВ-1,86Г призначений для підготовки гарячої води, температура води складе 90°C , даний агрегат застосовується в системах опалення, гарячого водопостачання, вентиляції об'єктів як промислового, і побутового призначення [1,2]. Але слід пам'ятати, що в залежності від застосування даного котла, конфігурація може бути відмінною від того котла, що застосовується в промислових будівлях та спорудах. Також котли

встановлюються строго в приміщеннях спеціальних котелень, які зводяться згідно з вимогою безпеки та охорони праці. Також котельні як згадувалося раніше обладнані системою водопідготовки, а котли працюють із примусовою циркуляцією води при робочому тиску на вході до 0,6 МПа (6 кгс/см²). Вид палива для котлів типу KB-1,86Г: - I – легке рідке паливо; - II – природний газ.

1.3.1. Влаштування котла. Характеристика палива

Котел є горизонтальною циліндричною конструкцією. (рис. 1.6. і 1.7.), що включає корпус, дверцята топки, короб димових газів, опору, теплоізоляцію та декоративне облицювання. На верхній корпусі розташовані патрубки підведення і відведення води з фланцями, два патрубки для установки запобіжних клапанів і сережки для підйому котла. З нижньої частини корпусу відводиться дренажна труба із зовнішнім різьбленням на кінці G1-B. До патрубка, що відводить підігріту воду від котла, за допомогою фланцевого з'єднання кріпиться колектор з гніздами G1/2-B для датчиків термостата та термоманометра та запасними гніздами для встановлення вимірювача рівня води у котлі. «Корпус виконаний з якісної вуглецевої сталі, і складається з двох співвісних обечайок: внутрішньої (жарової труби) та зовнішньої, з'єднаних між собою у передній частині плоским кільцем з отворами для труб. З задньої сторони кожна обечайка закрита своїм приварним днищем просвітом між ними. Днища скріплені одна з одною анкерами. У кільцевому просторі між обечайками розташовані димарні труби конвективного пучка. Порожнина внутрішньої обечайки корпусу утворює камеру топки тупикового (кишенькового) типу. Рух димових газів у топці реверсний. Димові гази повертаються до дверцят, проходять усередині димогарних труб, в яких встановлені завихрювачі, і надходять в короб димових газів, звідти через патрубок виводяться в димар. З переднього боку корпусу на спеціальних петлях підвішується дверцята топки. Петлі забезпечують відкриття дверцят як наліво, так і праворуч, а також можливість

надійного затягування ущільнення. З боку топки дверцят захищена ізоляцією з мулітокремнеземистого волокна. На периферії дверцят утворена канавка, де вкладається ущільнювальний шнур. За допомогою шпильок дверцята підтягуються до переднього торця корпусної обичайки, так що торець обичайки вдавлюється в шнур ущільнювача. На дверцятах приварено опорний фланець для кріплення пальника. Дверцята обладнані вогнетривким склом, до якого може підводитися повітря від пальника для зменшення забруднення скла. До заднього торця зовнішньої обичайки корпусу на 4 шпильках кріпиться димовий короб, що має на периферії ущільнення, аналогічне ущільнення дверцят топки. Короб є коробчастою конструкцією з теплоізоляцією із мінеральної вати. У верхній частині короба розташований димовий патрубок із гніздом G1/2-B для встановлення термометра та штуцер для підключення тягонапороміра. У нижній частині короба розташований лючок для видалення забруднень під час чищення димових труб. З нижньої утворювальної коробки патрубком G1/2-B здійснюється дренаж конденсату, що утворюється при розігріві води опалювального контуру.

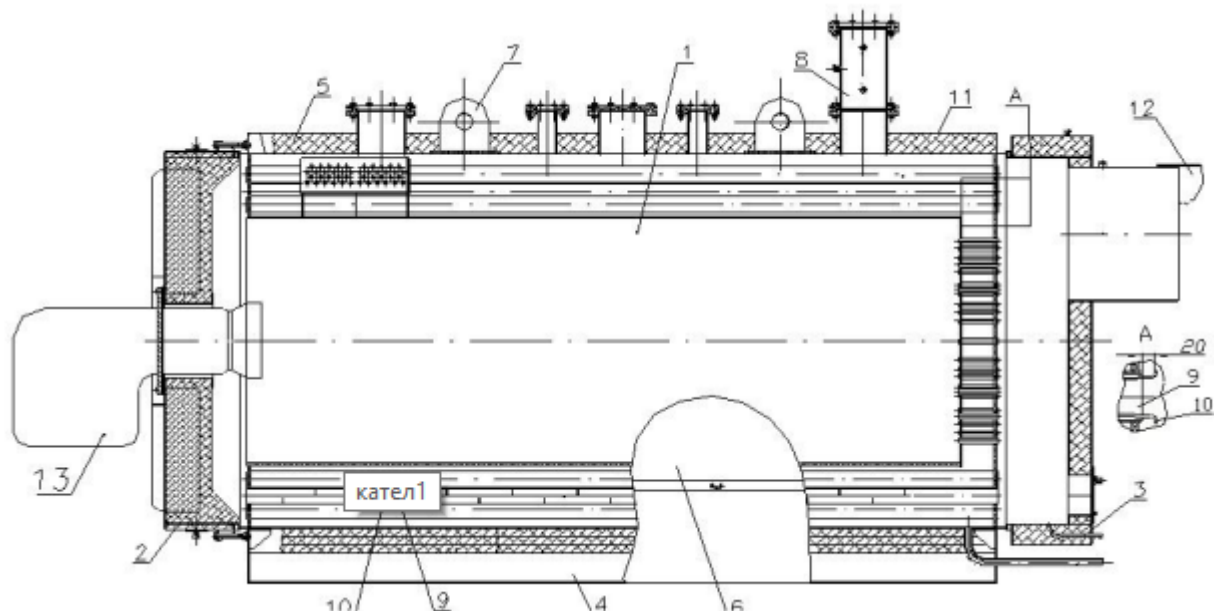


Рисунок 1.6. Пристрій котла КВ-1,86Г 1-корпус; 2-дверцята топки; 3-короб димових газів; 4-опора; 5-теплоізоляція; 6-облицювання; 7-стропова сережка;

8-колектор; 9-димогарні труби; 10-завихрювачі; 11-настил; 12-перехідник;
13-пальник

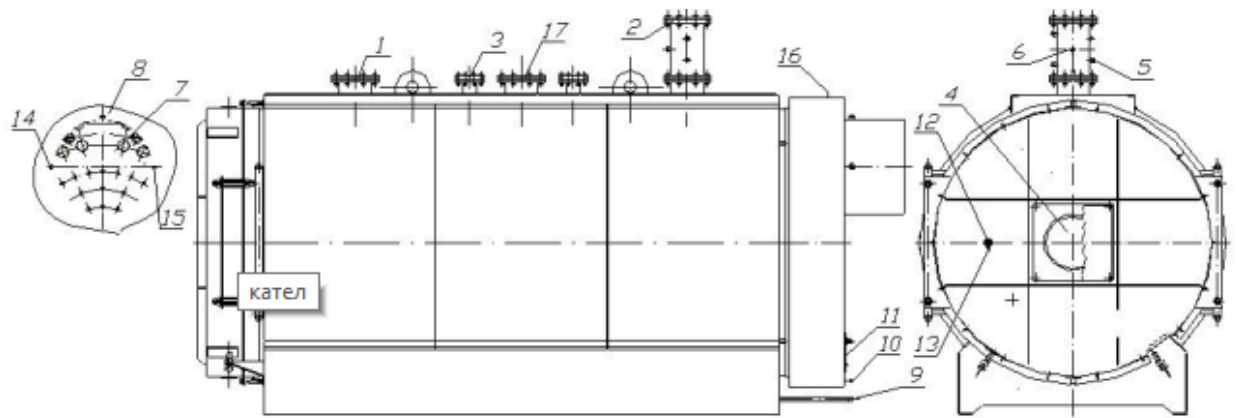


Рисунок 1.7. Штуцери та патрубки котла

1-вхід води Ду200; 2-вихід води Ду200; 3-установка запобіжного клапана Ду80; 4-гніздо під пальник Ду360; 5-установка термостата G1/2; 6-установка термоманометра G1/2; 7-вихід димових газів Ду650; 8-контроль температури димових газів G ¾; 9-дренаж води G1; 10-дренаж конденсату із короба димових газів G1/2; 11-лючок для видалення продуктів чищення від нагару; 12- G1 1/4; 13-підведення повітря в оглядове віконце від пальника М6; 14-контроль хімскладу димових газів G1/2; 15-відведення до пресостату; 16-установка рим-болтів М16 для транспортування

Характеристика палива

Оскільки в котельні встановлено газову інфраструктуру, то відповідно підживлення здійснюється блакитним паливом, згідно з ГОСТ 5542-87; QH = 8010 ккал/м³. Газ має особливий хімічний склад, все залежить від того чи іншого виду, в даному випадку це: метан CH₄ - 96,09%; з-тан C₂H₆ - 0,89%; пропан C₃H₈ - 0,22%; вуглекислий газ CO₂ – 0,01%; азот N₂ - 0,77%; бутан C₄H₁₀ - 0,01%. Щільність – 0,68 г/м³.

1.4. Димосос ДН- 6,3 95-40. Призначення. Опис конструкції. Димова труба

Димососи одностороннього всмоктування (ТОВ «Вентиляторний завод ГОРИЗОНТ» м. Гадяч, Полтавська область) [3]. призначені для відведення вибухобезпечних димових газів із топок парових і водогрійних котельних агрегатів (котлів, обладнаних ефективно діючою системою золовловлювання). Димососи застосовують в технологічних установках для переміщення неагресивних газів з кінцевою запиленістю димових газів не більше ніж 2 г/м^3 згідно з ГОСТ 15150. За умови захисту димососа від впливу атмосферних опадів дозволяється експлуатація в умовах «П» і «Т» 1-ї та 2-ї категорії.

Температура навколишнього середовища від -30°C до $+40^\circ\text{C}$. Температура переміщуваних димових газів до 200°C (короткочасно до 250°C).

Загальні відомості про димосос:

- димосос радіальний (відцентровий);
- одностороннього всмоктування;
- 16 загнутих назад лопаток;
- 3 конструктивне виконання;
- оснащений направляючим апаратом;
- температура газів, що переміщуються, – не більше 200°C ;
- корпус спіральний поворотний;
- напрямок обертання робочого колеса – праве або ліве (правим вважається рух колеса по часовій стрілці, якщо дивитися збоку електродвигуна);
- положення корпусу – $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ, 165^\circ, 180^\circ, 270^\circ$.

Призначення димососа:

- відвід димових газів від газомазутних, парових та водогрійних котельних агрегатів;

- газоочистка;
- пилевловлювання;
- аспірація;
- відвід газів від різних технологічних установок;
- інші санітарно-виробничі цілі.

Димосос встановлюється:

- на газомазутних котлах;
- на парових котлах;
- на водогрійних котлах;
- на теплоенергетичних підприємствах;
- у сфері металургії;
- на інших промислових підприємствах.

Конструкція та принцип роботи димососа ДН 6.3 95-40:

1. *робоче колесо вентилятора* – зварне, має 16 загнутих назад лопаток і ступицю. У ступиці колеса виконані отвори, які через проходження повітря зі сторони електродвигуна, частково його охолоджують. Завдяки використанню металу більшої товщини та міцності знижується ризик деформації від високої температури. Колесо динамічно балансується;
2. більш міцний *корпус* (порівняно з центробіжними вентиляторами) виконує функції відводу повітря, яке виходить із робочого колеса, у певному напрямку, а також часткового перетворення динамічного тиску потоку в статичний. Як і робоче колесо, фарбується теплостійкою фарбою;
3. *станина вентилятора* зварна, на неї кріпиться корпус і електродвигун. Основа станини має отвори для встановлення на фундамент;
4. *циліндричний вхідний патрубок* слугує для підводу повітря, що надходить до робочого колеса;

5. *направляючий апарат* призначений для створення організованого потоку повітря (стабілізованого), що створює менший супротив, тим самим значно підвищуючи ККД вентилятора;
6. асинхронний трифазний (380 В) *електродвигун*. Двигун додатково захищається металевим щитом (пластиною теплозахисту) від тепла, яке йде від корпусу вентилятора.

При виконанні вентилятора по третій конструктивній схемі (привід робочого колеса через муфту) можливе змащення підшипників привода спеціальним термостійким мастилом.

Принцип роботи димососа аналогічний принципу роботи центробіжних вентиляторів, а саме: електродвигун передає механічну енергію на робоче колесо. Робоче колесо димососа внаслідок обертання засмоктує повітря через вхідний отвір. Повітря рухається від центру до периферії та за рахунок центробіжної сили викидається лопатками у вихідний отвір спірального корпусу (перпендикулярно до вхідного отвору).

Положення корпусу димососів ДН правого та лівого обертання

Категорії розміщення вентиляторів згідно з кліматичними умовами (згідно ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування"):

- 1-а категорія – для експлуатації на відкритому повітрі (допускається вплив сукупності кліматичних факторів даного регіону);
- 2-а категорія – для експлуатації під навісом або у приміщеннях, де коливання температури та вологості несуттєво відрізняються від коливань на відкритому повітрі, а також є відносно вільний доступ до повітря зовні. Наприклад: у палатках, у кузовах, у прицепах, у металічних приміщеннях без теплоізоляції, у тому числі, в оболонці комплектного виробу категорії 1 (відсутність прямої дії сонячного випромінювання та атмосферних опадів);
- 3-а категорія – для експлуатації у закритих приміщеннях з природною вентиляцією без штучно регульованих кліматичних умов, де коливання температури та вологості повітря, а також вплив піску та пилу суттєво

менший, ніж на відкритому повітрі. Наприклад: у металічних приміщеннях з теплоізоляцією, бетонних, дерев'яних приміщеннях (відсутність впливу атмосферних опадів, прямого сонячного випромінювання, суттєве зменшення вітру; суттєве зменшення чи відсутність впливу розсіяного сонячного випромінювання та конденсації вологи);

- 4-а категорія – для експлуатації у закритих приміщеннях з штучно регульованими кліматичними умовами. Наприклад: у закритих виробничих приміщеннях з опаленням (охолодженням) та вентиляцією, у тому числі в підземних приміщеннях з гарною вентиляцією (відсутність впливу прямого сонячного випромінювання, атмосферних опадів, вітру, піску та пилу повітря зовні; суттєве зменшення чи відсутність впливу розсіяного сонячного випромінювання та конденсації вологи);
- 5-а категорія – для експлуатації у приміщеннях з підвищеною вологістю. Наприклад: у підземних приміщеннях без опалення та вентиляції, у тому числі, шахтах, підвальних приміщеннях, у ґрунті, у таких суднових, корабельних та інших приміщеннях, у яких можлива довготривала присутність води чи часта конденсація вологи на стінах і стелі, зокрема, у деяких трюмах, у цехах деяких текстильних та гідрометалургічних виробництв.

Димососи (відцентрові) мають два основних виконання, лівого та правого обертання. Якщо дивитися на димосос з боку електродвигуна, то можна оцінити обертання робочих коліс за годинниковою та проти годинникової стрілки. Так ось, при обертанні робочих коліс проти вартовий – ліве виконання, а за вартовим – праве обертання. Основними вузлами димососа є робоче колесо, равлик, всмоктувальна лійка, осьовий напрямний апарат та постамент. Робочі колеса димососів складаються з крильчатки та маточини. Крильчатка є зварною конструкцією, складається з 16 листових загнутих назад лопаток, розташованих між основними і конічними дисками, що покривають. Лопатки та покриваючий диск - штамповані. Димосос не йде як

самостійний пристрій, для його ефективного застосування необхідний електродвигун, тобто ходової частини немає, димосос садять на вал електродвигуна - привід. Також може виникнути думка про те, що станеться з підшипниками двигуна, так як вони розташовані в безпосередній близькості до місця високих температур при відведенні газів з боку робочих коліс. Рішення дуже просте - посадкова поверхня маточок робочих коліс виконується шліцевими пазами. Тим самим температурна дія на підшипники допустима. Коротко про конструкцію равлика димососа - виконання зварене, метал - сталь. Також для хорошої жорсткості, торцеві стінки равликів посилюються за допомогою ребра і з смуг. Виймання ротора димососів (електродвигун-привід з насадженим робочим колесом) здійснюється через отвір у торцевій стінці равликів, розташованої між робочим колесом та електродвигуном. Димососи можуть мати різний кут повороту равлика. Так, наприклад, найчастіше вони мають класичне виконання повороту з кутом 180° . Існують ще різновиди – 90° ; 180° і 270° , даний кут популярний за кордоном і поставляється здебільшого на експорт. Також виробники передбачили регулювання деяких моделей, необхідності поворот можливий з інтервалом 15° , з діапазоном – від 0° до 270° . «Всмоктувальні воронки димососів є звареною. конструкцію, що складається з циліндричного корпусу, конфузора, виконаного у вигляді усіченого конуса, і кільця ущільнювача. Регулювання продуктивності та повного тиску, що розвивається димососами, здійснюється осьовими направляючими апаратами або всмоктувальною кишенею з шибєрним пристроєм». Осьові напрямні апарати димососів складаються із зварного корпусу чотирма опорними роликами, якими переміщається поворотне кільце; восьми листових лопаток, з'єднаних з поворотним кільцем важільною системою, та обтічника, укріпленого по осі корпусу чотирма спицями. Лопатки направляючих апаратів можуть синхронно повертатися у напрямку обертання робочих коліс від 0° до -90° . Привід лопаток направляючих апаратів здійснюється вручну або від електровиконавчого механізму. Постаменти

димососів відливаються з чавуну і служать загальним несучим елементом. На постаментах за допомогою болтових з'єднань у єдиний поставлений блок монтуються равлик у зборі з осьовим напрямним апаратом та електродвигун з насадженим на його вал робочим колесом. Постаменти притягуються до загального фундаменту фундаментними болтами.

Технічні параметри димососу:

- продуктивність 5,102м³ год;
- Тиск 880 Па;
- Привідний двигун 5A112M4 (номінальна потужність 5,5 кВт);
- маса 370 кг, габарити (Д× Ш× В) 1150×1240×1175мм.

Димова труба

У технологічному процесі будь-якого об'єкта, в якому передбачено процес спалювання палива, з подальшим утворенням продуктів горіння, газів, що утворилися, присутні шкідливі речовини NO₂, CO. Існують різні способи боротьби з газами, в яких міститься Підвищена концентрація шкідливих речовин. Один із способів - це побудова димових труб, Особливість яких полягає в розмірах такої труби, труби висотою 40м і більше сприяють зниженню концентрації різних домішок у приземному шарі. Величини викидів визначено за “Методичними вказівками з розрахунку викидів забруднюючих речовин під час спалювання палива в котлах продуктивністю до 30 т/год”, Гідрометіздат-1985р. Викиди становлять: NO_x г/с 0,3948; т/рік 3,4481; CO г/с 4,3655; т/рік 9,5312.

1.5. Функціональна схема котлоагрегату. Електропостачання

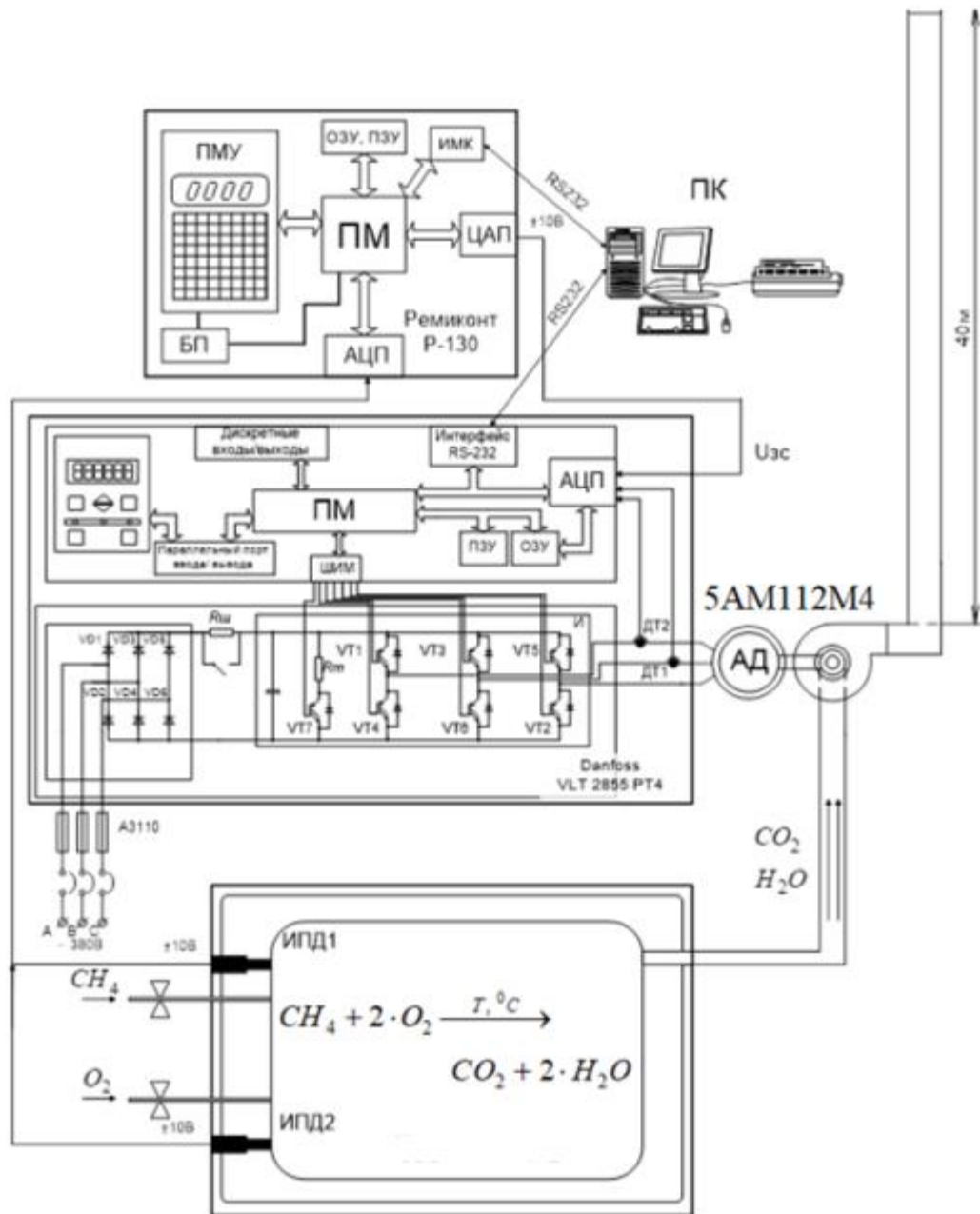


Рисунок 1.8. Функціональна схема котлоагрегату KB-1,86Г

На рис.1 представлені: • Реміконт Р-130 – контролер, що складається з програмованого мікропроцесора (ПМ), аналого-цифрового та цифро-аналогового перетворювачів, блоку живлення (БП), перетворювача інтерфейсу (ІМК) та пульта місцевого управління (ПМУ); • Danfoss VLT 2855 PT4 – Перетворювач частоти, до складу якого входять: інвертор (І), випрямляч, програмований мікропроцесор (ПМ) з аналоговими та

дискретними входами, рідкокристалічний дисплей з клавіатурою, датчики струму (ДТ1, ДТ2); • ПК – персональний комп'ютер із принтером; • Асинхронний двигун серії 5AM112M4 у складі димососа; • Водогрійний котлоагрегат KB-1,86Г, до складу якого входять: вимірювальні перетворювачі тиску (ІПД1, ІПД2), вентилі для подачі палива.

У таблиці 1 наведено каталожні дані асинхронного двигуна марки 5AM112M4.

Таблиця 1.1. Каталожні параметри електродвигуна

Типорозмер	P_n , кВт	U_{IH} , В	$U_{фH}$, В	n_0 , об/м	При номінальній навантаженні		
					s_n	$\cos \varphi_n$	η_n
5AM112M4	5,5	220	380	1440	0,05	0,83	0,86
$k_{min} = \frac{M_{min}}{M_n}$	$k_n = \frac{M_{пуск}}{M_n}$	$k_{max} = \frac{M_{max}}{M_n}$		$k_{дв} = \frac{I_{пуск}}{I_n}$	$p_k = \frac{P}{P_n}$	p	
1,6	2,6	2,9		6,7	0,75	2	

Перетворювач частоти Danfoss VLT 2855 — це компактний багатофункціональний перетворювач частоти, призначений для управління електродвигунами, який відрізняється ефективним відведенням тепла, що дозволяє щільний монтаж, і є частиною відомої серії Danfoss, хоча зараз частіше зустрічаються новіші моделі типу VLT Midi Drive (FC-280) для аналогічних завдань. Це пристрій з потужністю зазвичай 5.5 кВт (7.5 к.с.), що працює від мережі 380-480 В, з можливістю інтеграції Profibus DP та іншими функціями для промислового застосування.

Основні характеристики та особливості:

- **Тип:** Малогабаритний, багатоцільовий перетворювач частоти.
- **Потужність:** Типово 5.5 кВт / 7.5 к.с.
- **Напруга:** Розрахований на 380-480 В.
- **Охолодження:** Удосконалена система відведення тепла, що дозволяє монтаж впритул.

- **Можливі функції:** Вбудований гальмівний переривач, плати з покриттям, підтримка мережевих опцій, як-от Profibus DP (залежно від конфігурації).
- **Застосування:** Використовується для керування швидкістю насосів, вентиляторів, конвеєрів та іншого промислового обладнання

Типові застосування для перетворювача частоти

Danfoss VLT 2855 (та загалом для всієї серії VLT 2800) охоплюють широкий спектр завдань загальнопромислового призначення, де потрібне точне регулювання швидкості та моменту малопотужних електродвигунів.

Основні сфери застосування включають:

- **Конвеєрні системи:** Використовуються для плавного пуску та зупинки, а також точного підтримання швидкості руху стрічок на виробничих лініях, пакувальних станціях та у логістиці.
- **Насоси та вентилятори:** Застосовуються для керування продуктивністю насосів систем опалення, водопостачання, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC), що дозволяє економити енергію за рахунок роботи на оптимальних обертах.
- **Харчова промисловість:** Використовуються для керування міксерами, дозуючими насосами, тістомісами та іншим обладнанням, де важливий контроль процесу.
- **Текстильна промисловість:** Застосовуються у машинах для намотування ниток, фарбувальному обладнанні та інших процесах, що вимагають зміни швидкості.
- **Прості підйомні механізми:** Використовуються для керування швидкістю руху невеликих лебідок або ліфтів.
- **Деревообробка:** Застосовуються у верстатах, таких як пилорами або фрезерні верстати, для регулювання швидкості обертання шпинделя або подачі матеріалу.

Ключові переваги для цих застосувань:

- **Компактність:** Дозволяє інтегрувати привід у невеликі шафи керування.
- **Простота налаштування:** Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс спрощує введення в експлуатацію.
- **Надійність:** Міцна конструкція забезпечує тривалу роботу в промислових умовах.
- **Вбудований фільтр RFI:** Мінімізує електромагнітні перешкоди для іншого обладнання.

Електропостачання

Щодо забезпечення надійності електропостачання електроприймачі відносяться до II-ї категорії згідно з ПУЕ [4] та підключені до 2-х джерел живлення. Живлення електроприймачів котельні на напругу 380/220В передбачається від існуючих силових розподільчих шаф ШР2-ШР7, укомплектованих запобіжниками типу ПН2-250 ($P_p = 117,13$ кВт; $Q_p = 30,94$ кВАр; $S_p = 142$ кВА).

Висновки по розділу 1

Проведені аналітичні дослідження роботи котельні є основою для аналізу та оцінки механічних та електромеханічних характеристик частотно-регульованого електроприводу вентиляторів установок теплової генерації та їх відповідність технічним вимогам з метою енергозбереження та покращення якості технологічного процесу [5]. Також будуть підстави для аналізу впливу модернізації на механіко рухливі механізми апаратів котельні.

Вхідні сигнали: Вектори напруги статора у нерухомій системі координат

$$U_{s\alpha}, U_{s\beta}.$$

Вимірювання: Вимірюються компоненти струму статора $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$

Моделювання двигуна: Блоки, що містять передавальні функції з параметрами $(Ls/Rs) \cdot p+1$ та $(1/Ar) \cdot p+1$, представляють математичну модель асинхронного двигуна.

Перетворення координат: Схема містить елементи для перетворення сигналів між нерухомою (α, β) та обертовою (d, q) системами координат, що дозволяє незалежно керувати потоком ротора $(\psi_r \alpha, \psi_r \beta)$ та моментом.

Обчислення моменту: Обчислюється електромагнітний момент M_c , який впливає на інерцію J_{dw} .

Керування швидкістю: Вихідний сигнал ω_r (кутова швидкість ротора) є результатом інтегрування моменту та впливу зовнішнього навантаження.

Зворотний зв'язок: Присутні численні петлі зворотного зв'язку (через K_r, A_r, L_r та ін.) для забезпечення стабільності та точності керування.

Ця схема дозволяє досягти високої динамічної продуктивності, точного керування моментом та швидкістю двигуна

Розрахунок перехідних процесів АД в програмному середовищі

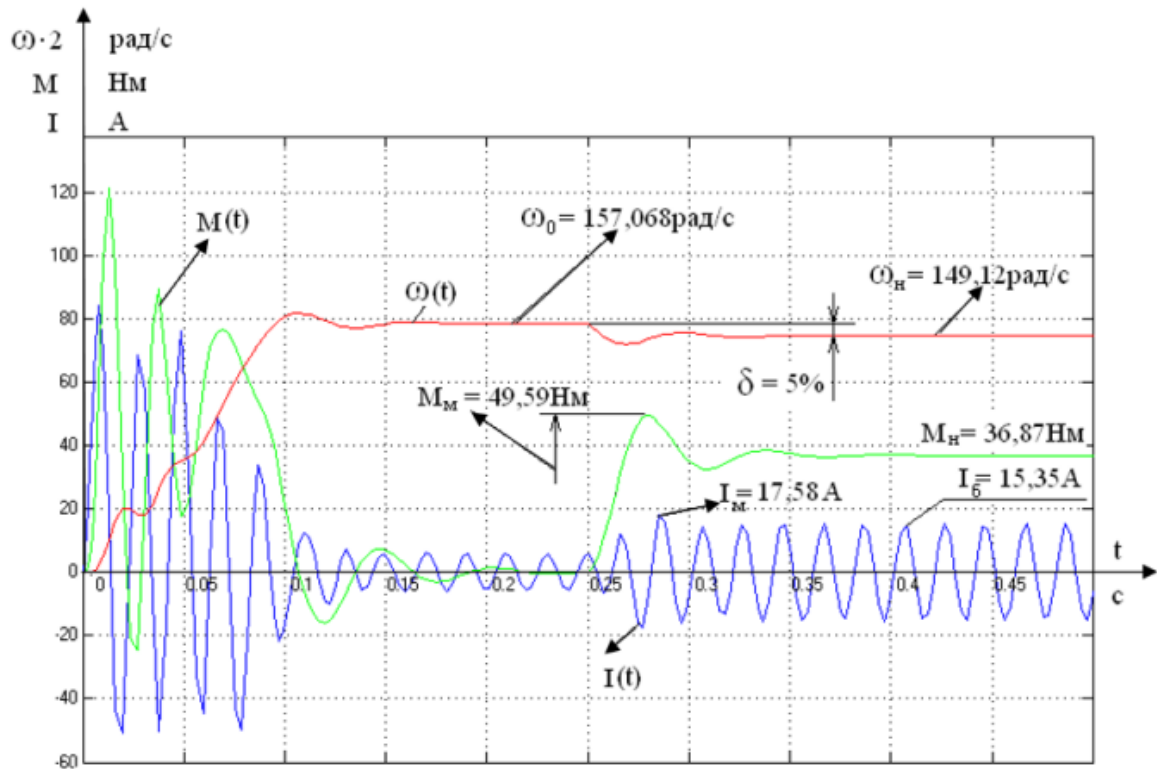


Рисунок 2.2. Пуск АД та включення навантаження

Таблиця 2.1. Чисельні характеристики перехідних процесів

Наданий графік ілюструє перехідні процеси під час пуску асинхронного електродвигуна з частотно-регульованим приводом (ЧРП). На графіку відображено залежності кутової швидкості обертання $\omega(t)$, електромагнітного моменту $M(t)$, та струму статора $I(t)$ від часу. Аналіз графічних характеристик відображено в табл.2.1..

Таблиця 2.1. Чисельні характеристики перехідних процесів

Швидкість АД $\omega(t)$ (рад/с)	Похибка $\omega(t)$ (%)	Крутний момент $M(t)$ Нм		Струм статора $I(t)$ А	
		Включення M_m	Сталий режим M_n	Максимальний I_m	Сталий режим I_n
0-149,2	<5	49.59	36.87	17.58	15.35

Крива швидкості $\omega(t)$: Швидкість двигуна плавно зростає від нуля до усталеного значення. Присутні невеликі відхилення, що є типовим для систем автоматичного керування.

Крива моменту $M(t)$: На початковому етапі пуску момент має високі коливання, досягаючи максимального значення (пусковий момент). У міру наближення швидкості до усталеного стану, момент зменшується і стабілізується на номінальному значенні.

Ці значення моменту (пусковий та номінальний) підтверджують, що двигун успішно долає інерцію та навантаження [8].

Крива струму $I(t)$: під час пуску спостерігається значний кидок струму, що є характерним для асинхронних двигунів, але завдяки ЧРП він контролюється. Струм коливається, а потім стабілізується на усталеному значенні. Максимальний струм значно нижчий, ніж пусковий струм при прямому включенні в мережу, що є однією з ключових переваг ЧРП — зменшення механічних навантажень та захист двигуна. Графіки демонструють успішний, контрольований пуск електродвигуна із застосуванням ЧРП, що забезпечує плавне наростання швидкості та обмеження пускових струмів і моментів.

2.1.1. Схема ЧРП скалярного керування АД

- Прямий пуск асинхронного двигуна не застосовується через великі пускові струми (при прямому пуску асинхронний двигун споживає струм, який у 4-9 разів перевищує його номінальний робочий струм що призводить до значних коливань (просідань) напруги в електричній мережі, що може негативно впливати на роботу іншого підключеного обладнання. Також це створює велике навантаження на мережу живлення та вимагає використання потужніших кабелів і захисних пристроїв. Механічні удари та знос: Різкий старт двигуна створює сильний механічний удар та високий пусковий момент, який може пошкодити вал двигуна, ремінні передачі або робочий механізм (наприклад, конвеєр, насос). Недостатній пусковий момент: Хоча пусковий струм великий, пусковий момент не завжди достатній для запуску

робочої машини, особливо якщо навантаження велике, що може призвести до тривалого пуску або його зриву.

На рис.2.3. представлено блок схему скалярного керування асинхронним двигуном (АД) .

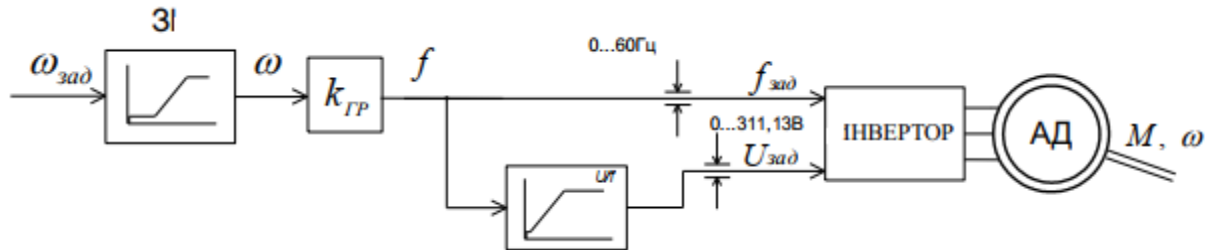


Рисунок 2.3. Блок схема скалярного керування АД

- Керуючий сигнал: кутова швидкість $\omega_{\text{зад}}$ надходить на вхід системи.
- Формування частоти: Після обробки (фільтрації або обмеження) сигнал перетворюється на частоту f за допомогою блоку з коефіцієнтом передачі $k_{\text{ГР}}$ (коефіцієнт пропорційності), який встановлює бажану частоту обертання. Діапазон частот вказано як 0...60 Гц.
- Блок формування напруги: Частота f також подається на блок формування напруги (з позначкою "UГ" або подібною, що вказує на залежність), який генерує задану напругу $U_{\text{зад}}$. Цей блок забезпечує підтримку сталого співвідношення U/f , що є ключовим для підтримки постійного магнітного потоку в двигуні та номінального моменту.

Інвертор: Обидва сигнали, $f_{\text{зад}}$ та $U_{\text{зад}}$, надходять на ІНВЕРТОР (частотний перетворювач). Інвертор перетворює вхідну постійну або змінну напругу на трифазну змінну напругу необхідної частоти та амплітуди.

Асинхронний двигун: Інвертор живить АД (асинхронний двигун), який перетворює електричну енергію на механічну енергію обертання, створюючи крутний момент M та досягаючи кутової швидкості ω .

Ця система забезпечує плавне та ефективне регулювання швидкості асинхронного двигуна шляхом одночасного контролю частоти та напруги живлення.

2.1.2. Розрахунки основних режимів роботи ЧРП скалярного керування АД

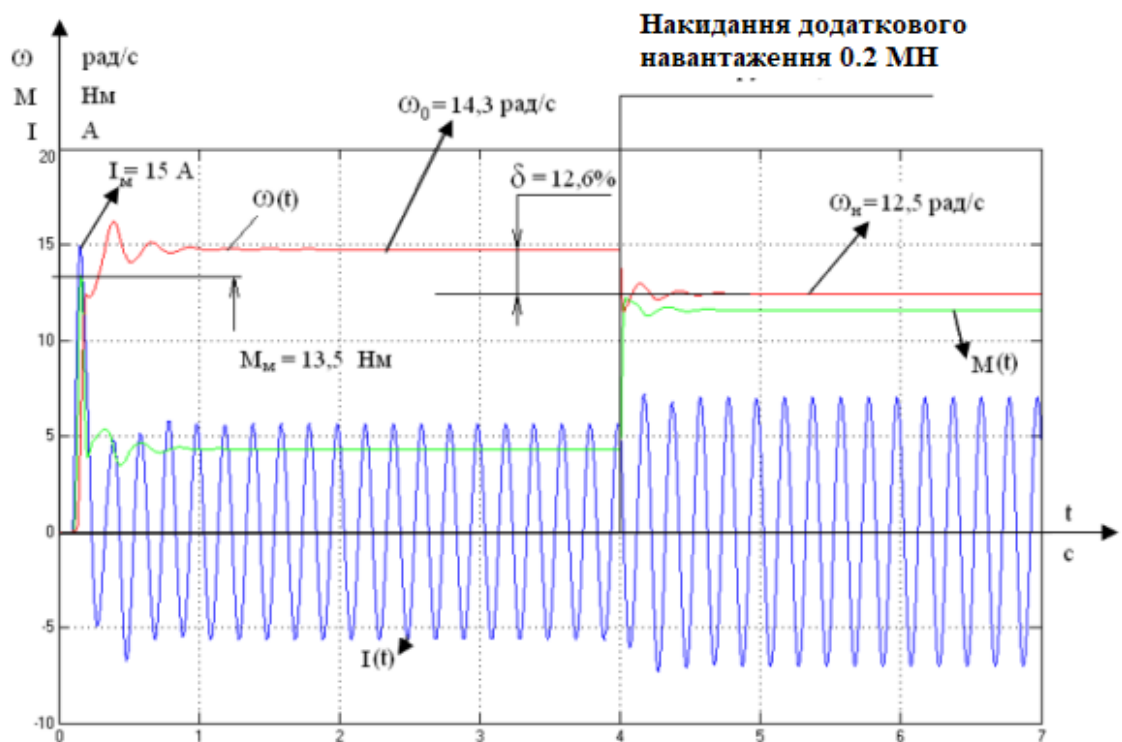


Рисунок 2.4. Навантаження на низьких обертах АД

Графік ілюструє перехідні процеси в системі керування асинхронним двигуном при прикладанні додаткового навантаження (механічного навантаження або моменту на валу) на низьких обертах АД.

Аналіз графічних характеристик відображено в табл.2.2.

Таблиця 2.2. Чисельні характеристики перехідних процесів

Швидкість $\omega(t)$ АД (рад/с)	Похибка $\omega(t)$ ($\delta\%$)	Крутний момент $M(t)$ Нм		Струм статора $I(t)$ А	
		Включення M_M	Сталий режим M_H	Максимальний I_M	Сталий режим I_H
14.3-12.5	12,6	13.5	11.8	15	7

Аналіз графіків $\omega(t)$ (Кутова швидкість, рад/с): До 4 с: Швидкість стабілізована. Система підтримує постійну швидкість до зміни навантаження. Після 4 с: Після прикладання додаткового навантаження швидкість двигуна тимчасово знижується, а потім система керування відновлює її до нового стабільного значення. Спостерігається невелике коливання перед стабілізацією.

- $I(t)$ (Струм статора, А): До 4 с: Струм коливається навколо певного середнього значення, що є нормальним для роботи асинхронного двигуна з частотним перетворювачем. Після 4 с: Після збільшення навантаження струм різко зростає, що свідчить про зростання споживаної потужності для компенсації нового навантаження. Після перехідного процесу струм стабілізується на новому, вищому середньому рівні.

- $M(t)$ До 4 с: Момент стабілізований, що відповідає початковому навантаженню. Після 4 с: Момент різко зростає, щоб протидіяти новому, більшому навантаженню. Після короткого перехідного процесу він стабілізується на новому, вищому значенні, пропорційному ω_H та новому навантаженню.

Основні параметри та характеристики : Максимальний пусковий або перехідний струм, який виникає під час зміни режимів роботи. пікове відхилення від кінцевого сталого значення). Пікове відхилення кутової швидкості від кінцевого сталого значення має суттєву похибку, тобто робота системи скалярного керування за принципом $U/f=\text{const}$ (підтримка

постійного магнітного потоку), яка автоматично реагує на зміну механічного навантаження, підтримуючи задану швидкість на низьких швидкостях **потребує корекції по моменту.**

Навантаження АД на високих обертах рис.2.5.

Таблиця 2.3. Чисельні характеристики перехідних процесів

<u>Швидкість</u> $\omega(t)$ АД (рад/с)	<u>Похибка</u> $\omega(t)$ ($\delta\%$)	<u>Крутний момент $M(t)$ Нм</u>		<u>Струм статора $I(t)$ А</u>	
		<u>Включення</u> M_m	<u>Сталий режим</u> M_n	<u>Максимальний</u> I_m	<u>Сталий режим</u> I_n
14.3-12.5	5.2	13.5	42	17	5

Графік ілюструє перехідні процеси в системі керування асинхронним двигуном при накиданні додаткового навантаження.

Аналіз графіків $\omega(t)$ (Кутова швидкість, рад/с): До 4 с: Швидкість стабілізована на початковому рівні. Після 4 с: Після прикладання додаткового навантаження швидкість двигуна тимчасово знижується. Система керування (частотний перетворювач) збільшує потужність, щоб відновити швидкість до нового стабільного значення, яке відповідає новій точці рівноваги з більшим моментом навантаження.

$I(t)$ (Струм статора, А): До 4 с: Струм коливається навколо певного середнього значення. Після 4 с: Струм різко зростає (до максимального значення), що є очікуваною реакцією на зростання механічного навантаження та необхідності забезпечення більшого моменту. Після перехідного процесу струм стабілізується на новому, вищому середньому рівні.

$M(t)$ (Крутний момент, Нм): До 4 с: Момент стабілізований на рівні. Після 4 с: Момент різко зростає до нового сталого значення, щоб протидіяти більшому навантаженню.

Основні параметри та характеристики: Прикладання навантаження та похибка відхилення від кінцевого сталого значення.

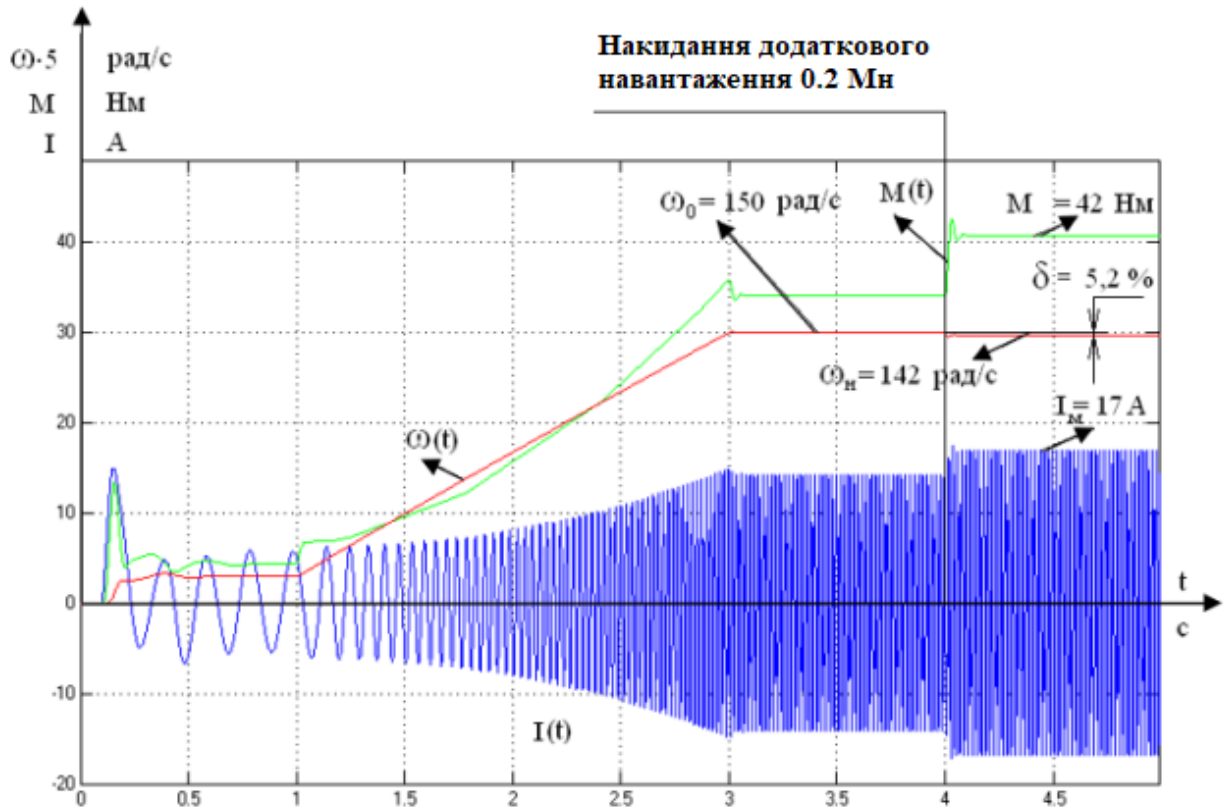


Рисунок 2.5. Навантаження АД при зростанні оборотів

Графік навантаження АД з набором обертів показано на рис.2.6.

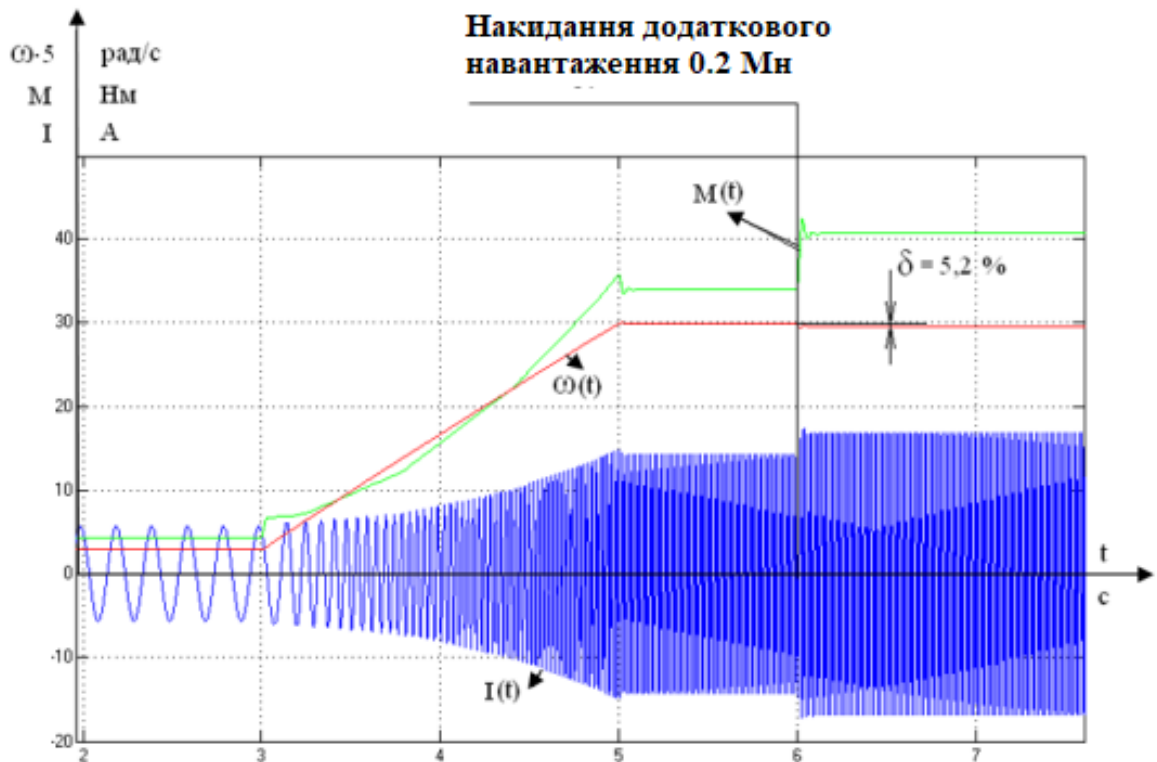


Рисунок 2.6. Графік навантаження АД з набором обертів

Графік ілюструє перехідні процеси в системі керування асинхронним двигуном при прикладанні додаткового навантаження.

Таблиця 2.4. Чисельні характеристики перехідних процесів

<u>Швидкість</u> $\omega(t)$ АД (рад/с)	<u>Похибка</u> $\omega(t)$ (δ%)	<u>Крутний момент</u> $M(t)$ Нм		<u>Струм статора</u> $I(t)$ А	
		<u>Включення</u> M_M	<u>Сталий режим</u> M_H	<u>Максимальний</u> I_M	<u>Сталий режим</u> I_H
14.3-12.5	5.2	7.9	42	15.3	17

$\omega(t)$ (Кутова швидкість, рад/с): До 4 с: Швидкість стабілізована на початковому рівні. Після 4 с: Після прикладання додаткового навантаження швидкість двигуна тимчасово знижується. Система керування (частотний перетворювач) збільшує потужність, щоб відновити швидкість до нового

стабільного значення, яке відповідає новій точці рівноваги з більшим моментом навантаження.

I(t) (Струм статора, A): До 4 с: Струм коливається навколо певного середнього значення (близько 5 A). Після 4 с: Струм різко зростає, що є очікуваною реакцією на зростання механічного навантаження та необхідності забезпечення більшого моменту. Після перехідного процесу струм стабілізується на новому, вищому середньому рівні.

M(t) (Крутний момент): До 4 с: Момент стабілізований. Після 4 с: Момент різко зростає до нового сталого значення, щоб протидіяти більшому навантаженню.

Основні параметри та характеристики: прикладання навантаження та похибка відхилення швидкості.

Робота АД при зниженні обертів

Графік навантаження АД із зниженням обертів представлений на рис.2.7.

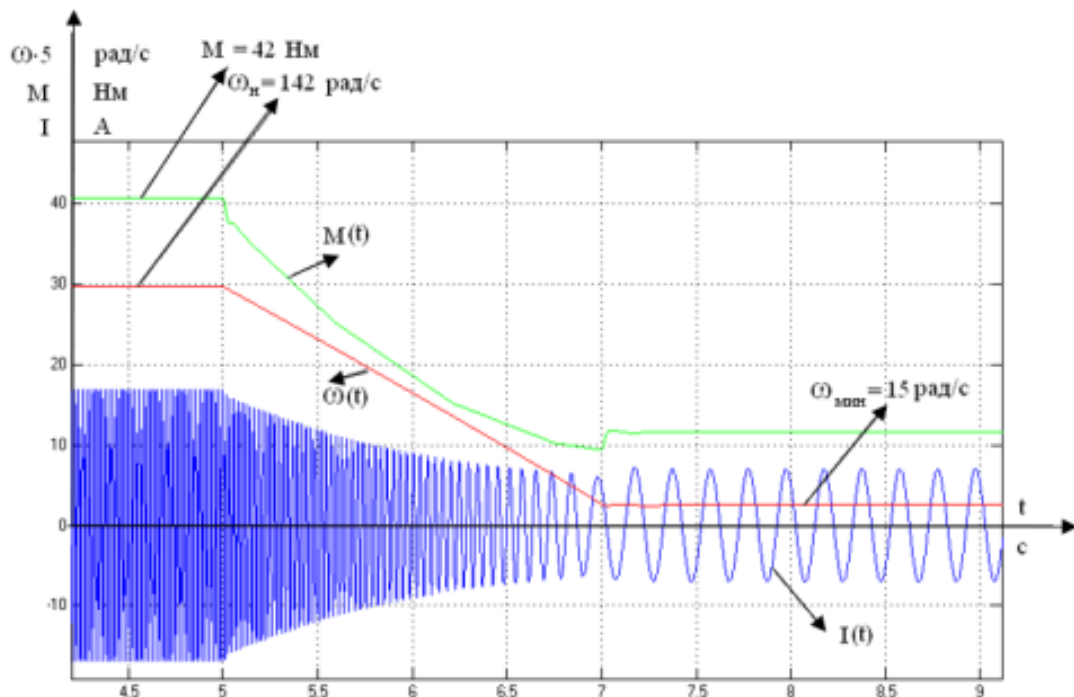


Рисунок 2.7. Графік навантаження АД із зменшенням обертів

Графік ілюструє перехідні процеси в системі керування асинхронним двигуном при навантаженні.

Таблиця 2.5. Чисельні характеристики перехідних процесів

<u>Швидкість</u> $\omega(t)$ АД (рад/с)	<u>Похибка</u> $\omega(t)$ (%)	<u>Крутний момент $M(t)$ Нм</u>		<u>Струм статора $I(t)$ А</u>	
		<u>Включення</u> M_M	<u>Сталий</u> режим M_H	<u>Максимальний</u> I_M	<u>Сталий</u> режим I_H
30-12	10	42	12	17	8

• Аналіз графіків різних режимів роботи АД (рис. 2.2., 2.4. -2.7.) та аналіз перехідних характеристик (таблиці 2.1., 2.3. - 2.5.) підтверджують можливість моделювати достатню кількість режимів роботи асинхронного двигуна, що надає можливість суттєво економити кошти на етапі розробки системи автоматичного управління частотно- регульованого приводу. В той же час максимальний пусковий або перехідний струм, який виникає під час зміни режимів роботи є більшим від заданого. Похибка відхилення кутової швидкості від кінцевого сталого значення має суттєву похибку, тобто робота системи скалярного керування за принципом **$U/f=\text{const}$** (підтримка постійного магнітного потоку), яка автоматично реагує на зміну механічного навантаження, підтримуючи задану швидкість на низьких швидкостях потребує корекції по моменту.

2.2. Схема ЧРП векторного керування АД

На рис.2.8. представлена структурна схема САУ ЧРП при векторному управлінні ЧРП.

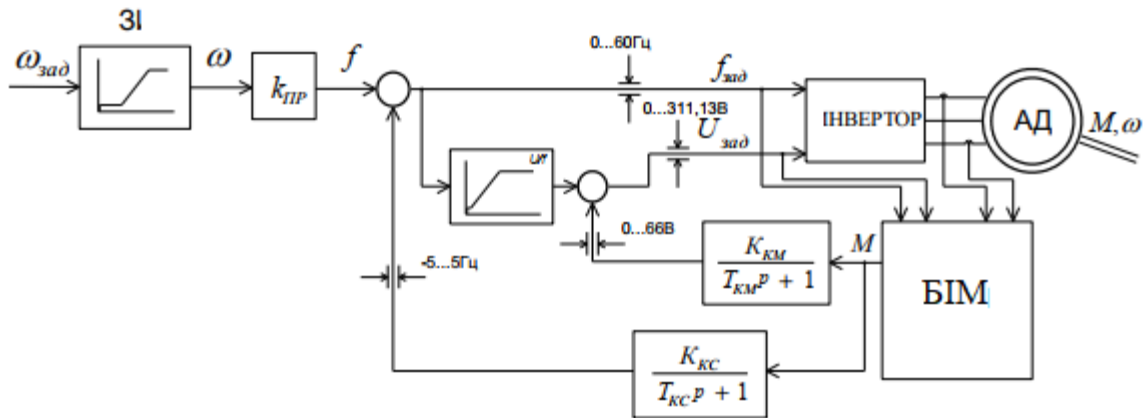


Рисунок 2.8. Структурна схема САУ ЧРП при векторному управлінні

Схема складається з зовнішнього контуру регулювання швидкості та внутрішніх контурів керування струмом або моментом, що характерно для систем векторного керування.

Ключові елементи та процеси:

Блок ідентифікації моменту (БІМ). Принцип роботи БІМ

- Функція: БІМ виконує роль вимірювального та обчислювального блоку, що використовує математичну модель двигуна.
- Вхідні параметри: Для розрахунків використовуються вхідні електричні параметри двигуна, які легко виміряти: струми статора, прикладена напруга та частота живлення.
- Обчислення: За допомогою математичних перетворень цих вимірних параметрів БІМ обчислює (ідентифікує) поточний електромагнітний момент двигуна (**M**) та його швидкість (**ω**).
 - Вихідні сигнали: Сигнал моменту (**M**) використовується для формування зворотного зв'язку компенсації моменту.
 - Сигнал швидкості (**ω**) використовується для формування зворотного зв'язку компенсації швидкості (або ковзання).

Ці сигнали зворотного зв'язку дозволяють системі керування точно підтримувати задану швидкість та забезпечувати стабільну роботу двигуна

при зміні навантаження, що було продемонстровано на попередніх графіках перехідних процесів.

- Завдання швидкості $\omega_{\text{зад}}$ бажана швидкість двигуна задається оператором або системою вищого рівня.

Регулятор швидкості (ліворуч): Формує сигнал завдання частоти $f_{\text{зад}}$ для інвертора.

Інвертор: Перетворює напругу постійного струму в змінну напругу змінної частоти, необхідну для живлення асинхронного двигуна (АД).

Асинхронний двигун (АД): Виконавчий механізм, швидкість ω та момент M якого регулюються.

Зворотні зв'язки (ЗЗ) по швидкості ω через коефіцієнт $k_{\text{ПР}}$ повертається до регулятора швидкості для порівняння із заданим значенням $\omega_{\text{зад}}$

ЗЗ по моменту M : Сигнал моменту від БІМ через передавальну функцію $K_{\text{КМ}}/T_{\text{КМ}}p+1$ (фільтр або регулятор моменту) бере участь у формуванні завдання напруги інвертора $U_{\text{зад}}$.

ЗЗ по частоті ковзання: Через передавальну функцію $K_{\text{КС}}/T_{\text{КС}}p+1$ (регулятор ковзання) сигнал подається на суматор завдання частоти, забезпечуючи векторний принцип керування.

Регулювання U/f : Схема також містить блок залежності напруги від частоти (U/f), що є базовим законом частотного керування.

Векторне керування дозволяє незалежно керувати магнітним потоком і моментом двигуна, що забезпечує точність і динаміку, порівнянну з двигунами постійного струму.

2.2.1. Розрахунок електромеханічних характеристик ЧРП при векторному управлінні ЧРП

Розраховані та побудовані графіки перехідних процесів ЧРП при роботі АД зі змінним навантаженням.

Графік перехідного процесу при регульованому пуску представлений на рис.2.9.

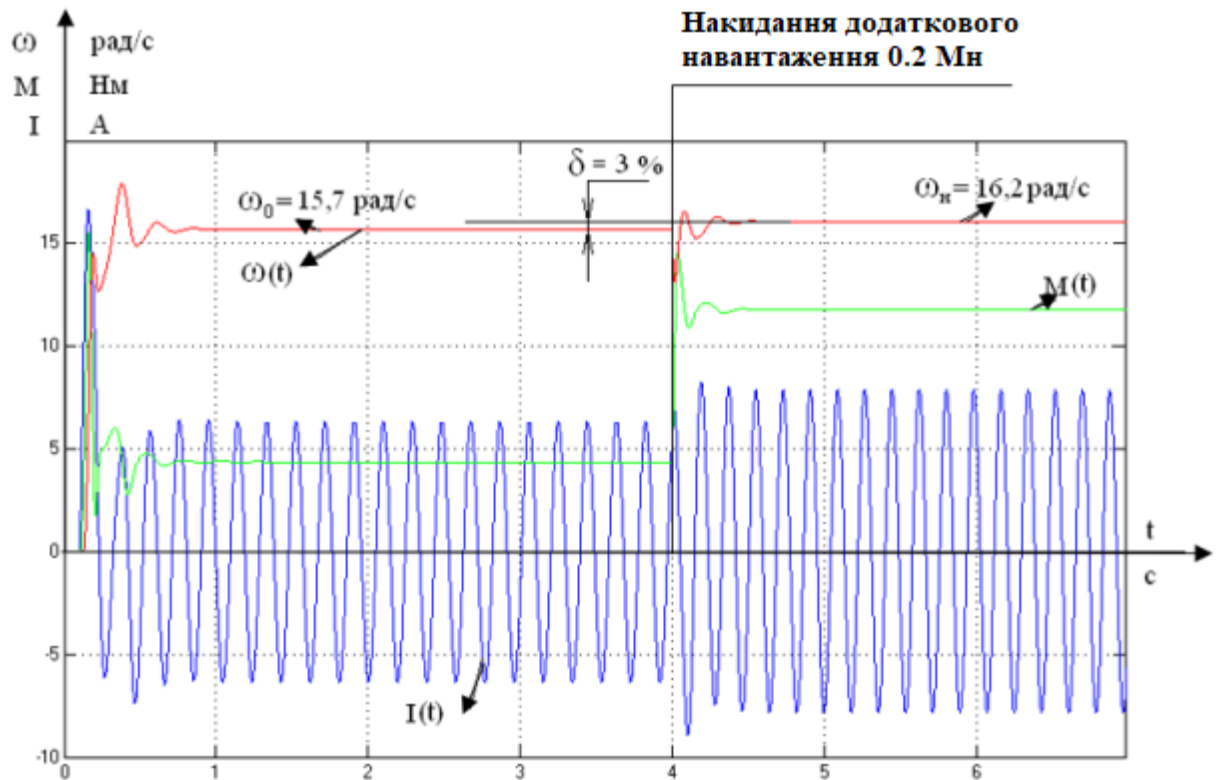


Рисунок 2.9. Регульований пуск під навантаженням

Графік ілюструє перехідні процеси в частотно-регульованому приводі (ЧРП) асинхронного двигуна під час накидання додаткового навантаження. Після досягнення усталеного режиму роботи, в системі відбувається зміна зовнішнього навантаження (моменту опору), що викликає відповідну реакцію системи автоматичного керування.

Таблиця 2.5. Чисельні характеристики перехідних процесів

Швидкість $\omega(t)$ АД (рад/с)	Похибка $\omega(t)$ ($\delta\%$)	Крутний момент $M(t)$ Нм		Струм статора $I(t)$ А	
		Включення M_M	Сталий режим M_n	Максимальний I_M	Сталий режим I_n
15.7-16.2	3	14.2	12.8	17.4	8.2

аналіз зміни режимів:

Початковий усталений режим (до моменту близько 4 с): Швидкість $\omega(t)$ стабілізована. Момент $M(t)$ та струм $I(t)$ також мають усталені значення (хоча струм пульсує). Перехідний процес прикладання навантаження (близько 4 с): у момент часу $t \approx 4$ с система керування отримує сигнал про накидання додаткового навантаження.

Швидкість $\omega(t)$ тимчасово просідає, а потім завдяки системі регулювання відновлюється до нового усталеного значення. Присутня невелика похибка швидкості - в допустимих межах.

Момент $M(t)$ різко зростає, щоб компенсувати збільшене навантаження, і стабілізується на вищому рівні.

Струм також збільшується (амплітуда коливань зростає) відповідно до зростання моменту.

Висновки: Графік наочно демонструє ефективну роботу системи ЧРП, яка динамічно реагує на зміну навантаження, підтримуючи задану швидкість двигуна на новому рівні з мінімальними похибками.

Графік накидання додаткового навантаження представлений на рис.2.10.

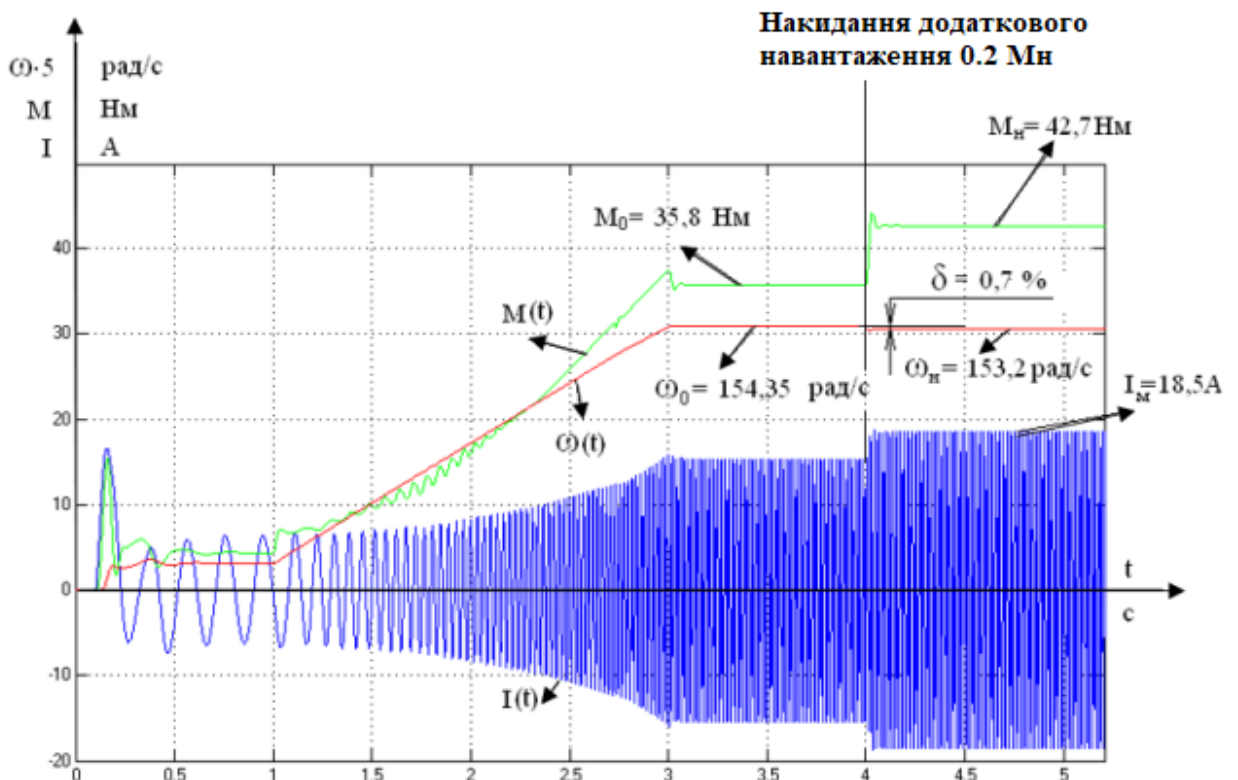


Рисунок 2.10. Накидання додаткового навантаження

Графік ілюструє перехідні процеси в частотно-регульованому приводі (ЧРП) асинхронного двигуна під час зміни додаткового навантаження, після досягнення усталеного режиму роботи.

Таблиця 2.6. Чисельні характеристики перехідних процесів

<u>Швидкість</u> $\omega(t)$ АД (рад/с)	<u>Похибка</u> $\omega(t)$ (%)	<u>Крутний момент</u> $M(t)$ Нм		<u>Струм статора</u> $I(t)$ А	
		<u>Включення</u> M_m	<u>Сталий режим</u> M_n	<u>Максимальний</u> I_m	<u>Сталий режим</u> I_n
154-153	0.7	35.8	42.7	16.5	18.5

Графік відображає три ключові параметри роботи двигуна залежно від часу (**Кутова швидкість**): Швидкість зростає від нуля до початкового усталеного значення. Приблизно в момент $t=4$ с відбувається просідання швидкості через накидання навантаження.

Система керування відновлює швидкість до нового усталеного значення. Похибка регулювання швидкості в межах допуску.

$M(t)$ (Електромагнітний момент): Момент зростає під час пуску. Після накидання додаткового навантаження, момент різко збільшується і стабілізується на новому, вищому номінальному значенні, щоб компенсувати навантаження.

$I(t)$ (Струм статора): Під час пуску спостерігаються значні коливання струму.

Після накидання навантаження амплітуда коливань струму збільшується, досягаючи максимального значення для забезпечення необхідного моменту.

Приблизно на 4-й секунді відбувається прикладання додаткового навантаження (момент навантаження), що спричиняє перехід системи в новий робочий режим.

Висновки: Графік демонструє високу ефективність та точність системи ЧРП, яка швидко та з мінімальними похибками реагує на зміну зовнішнього навантаження, підтримуючи стабільну роботу двигуна.

Графік прикладання додаткового навантаження при зміні швидкості переходу представлений на рис.2.11.

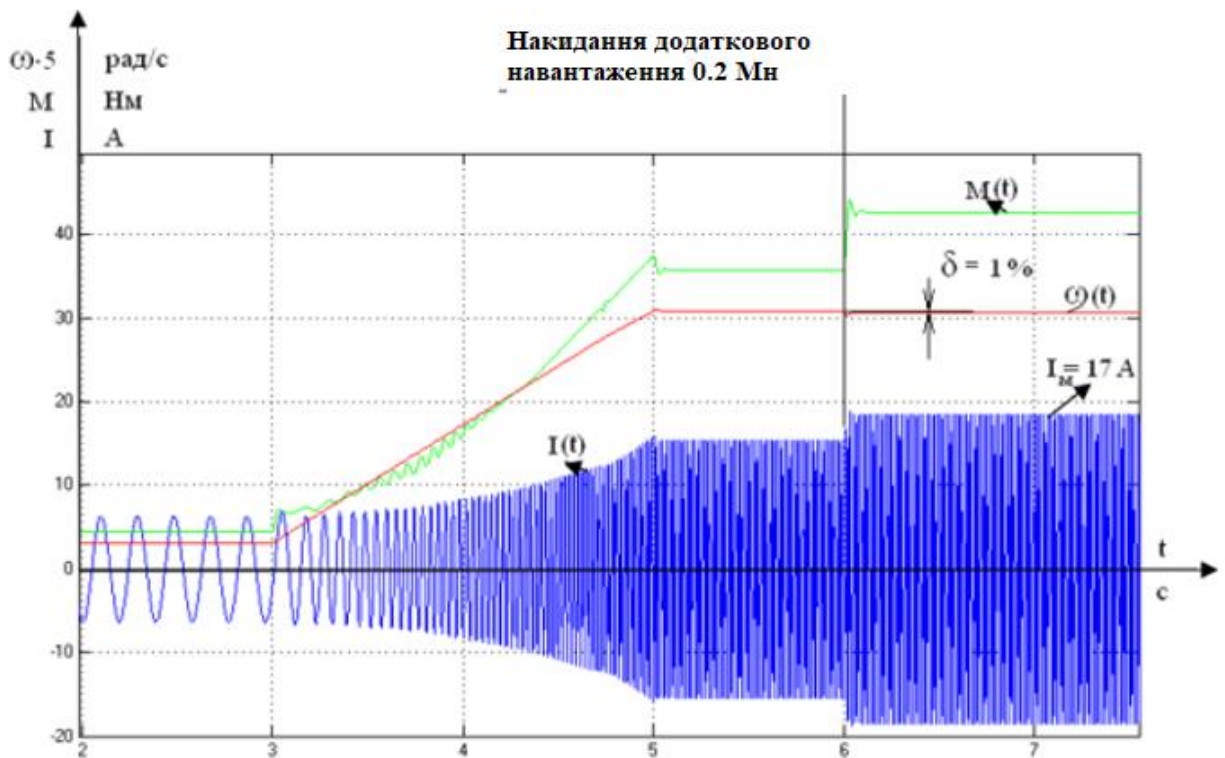


Рисунок 2.11. Прикладання додаткового навантаження при зміні швидкості

Графік ілюструє перехідні процеси в частотно-регульованому приводі (ЧРП) асинхронного двигуна під час накидання додаткового навантаження при зміні швидкості. Після досягнення усталеного режиму роботи, в системі відбувається зміна зовнішнього навантаження (моменту опору), що викликає відповідну реакцію системи автоматичного керування.

Таблиця 2.7. Чисельні характеристики перехідних процесів

<u>Швидкість</u> $\omega(t)$ АД (рад/с)	<u>Похибка</u> $\omega(t)$ (%)	<u>Крутний момент $M(t)$ Нм</u>		<u>Струм статора $I(t)$ А</u>	
		<u>Включення</u> M_m	<u>Сталий</u> режим M_n	<u>Максимальний</u> I_m	<u>Сталий</u> режим I_n
4-32	1	40	45	14	17

Графік відображає залежності кутової швидкості обертання $\omega(t)$, електромагнітного моменту $M(t)$ та струму статора $I(t)$:

Початковий усталений режим (до моменту близько 6 с):

Швидкість $\omega(t)$ стабілізована на певному значенні. Момент $M(t)$ та струм $I(t)$ мають усталені значення.

Перехідний процес накидання навантаження (близько 6 с): У момент часу $t \approx 6$ с відбувається накидання додаткового навантаження (момент навантаження). Швидкість тимчасово просідає, а потім завдяки системі регулювання відновлюється до нового усталеного значення. Похибка регулювання швидкості в межах допуску.

Момент $M(t)$ різко зростає, щоб компенсувати збільшене навантаження, і стабілізується на вищому рівні.

Струм $I(t)$ також збільшується (амплітуда коливань зростає) відповідно до зростання моменту, досягаючи максимального значення.

Висновки: Графік наочно демонструє ефективну роботу системи ЧРП, яка динамічно реагує на зміну навантаження, підтримуючи задану швидкість двигуна на новому рівні з мінімальними похибками.

Графік зменшення швидкості АД незмінному навантаженні представлений на рис.2.12..

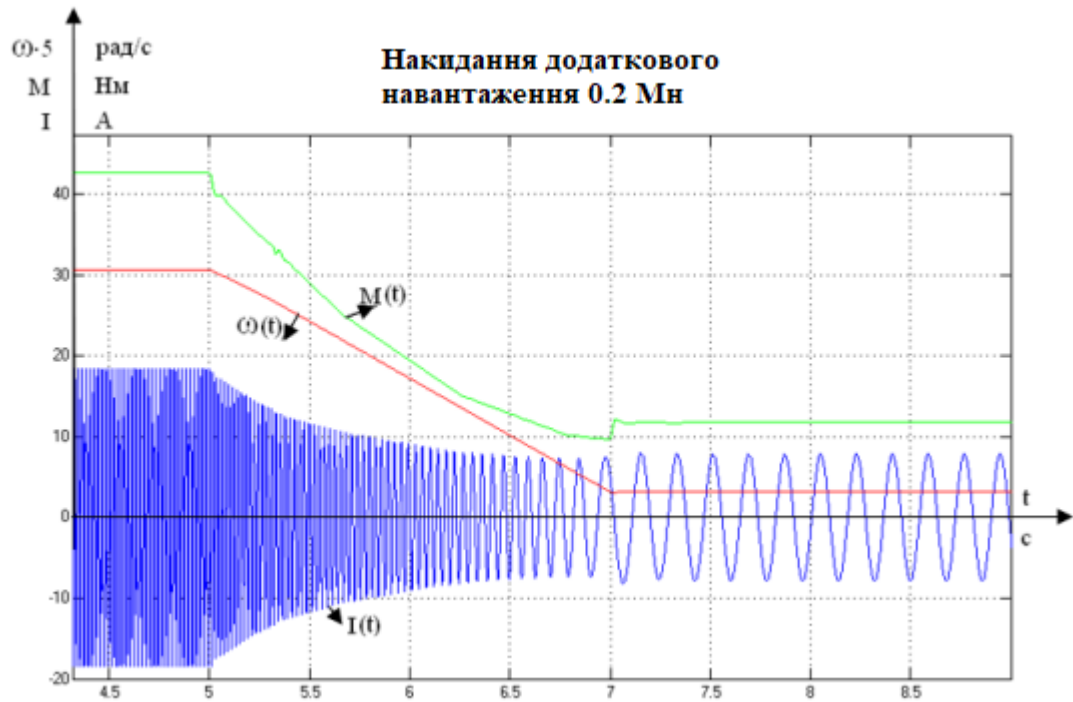


Рисунок 2.12. Графік зменшення швидкості АД при незмінному навантаженні

Таблиця 2.8. Чисельні характеристики перехідних процесів

<u>Швидкість</u> $\omega(t)$ АД (рад/с)	<u>Похибка</u> $\omega(t)$ (%)	<u>Крутний момент</u> $M(t)$ Нм		<u>Струм статора</u> $I(t)$ А	
		<u>Включення</u> M_M	<u>Сталий режим</u> M_H	<u>Максимальний</u> I_M	<u>Сталий режим</u> I_H
32-4.5	2	42	11	30	12

Аналіз перехідного процесу

На графіку відображено залежності кутової швидкості обертання $\omega(t)$, електромагнітного моменту $M(t)$ (зелена лінія) та струму статора $I(t)$ (синя лінія) від часу.

- Початковий режим (до $t \approx 5$ с): Двигун працює на високій швидкості. Момент стабільний і відповідає робочому навантаженню. Струм пульсує, що характерно для роботи інвертора.
- Перехідний процес зниження швидкості (від $t \approx 5$ с до $t \approx 7$ с):

- Швидкість $\omega(t)$ починає плавно та монотонно знижуватися з максимальної до мінімальної заданої швидкості.
- Момент $M(t)$ зменшується синхронно зі швидкістю, що забезпечує контрольоване гальмування та точність переходу.
- Струм $I(t)$ також зменшує свою амплітуду коливань, відображаючи зниження потужності, необхідної для роботи на меншій швидкості та моменті.
- Кінцевий усталений режим (після $t \approx 7c$):
 - Швидкість $\omega(t)$ стабілізується на новому, мінімальному усталеному значенні.
 - Момент $M(t)$ виходить на нове, низьке усталене значення, що відповідає новому режиму роботи.
 - Струм $I(t)$ стабілізується з меншою амплітудою коливань.

Компенсація моменту та ковзання Система керування використовує принципи векторного керування (FOC), що дозволяє незалежно керувати потоком і моментом двигуна, подібно до двигунів постійного струму. Це забезпечує:

- Компенсацію моменту: Швидка зміна моменту відбувається плавно та контрольовано, що запобігає ривкам та перевантаженням (наприклад, "накидання додаткового навантаження" відбувається в момент стабілізації, а не під час переходу, як на інших графіках).
- Контроль ковзання: Система постійно обчислює необхідну частоту ковзання для підтримки заданого магнітного потоку та моменту при зміні швидкості. Це гарантує жорстку механічну характеристику та стійкість роботи у всьому діапазоні регулювання.

Висновки: Графік демонструє високоякісний, керований перехідний процес зміни швидкості в системі ЧРП, що підтверджує ефективність застосованого методу векторного керування [9,10].

Висновки по другому розділу

Проведений аналіз перехідних процесів роботи електродвигуна з включенням навантаження. Оцінка основних режимів роботи АД при скалярному керуванні ЧРП надає можливість оптимізувати вимоги до САУ електроприводу. Проведений аналіз обґрунтовує необхідність введення в схему управління компенсації моменту та ковзання. Введення в систему управління функцій компенсації моменту та ковзання демонструє високоякісний, керований перехідний процес зміни швидкості в системі ЧРП, що підтверджує ефективність застосованого методу векторного керування.

Практичне значення проведеного аналізу полягає в тому, що застосування імітаційного моделювання надає можливість суттєво економити кошти на етапі розробки системи автоматичного управління частотно-регульованого електроприводу. Застосування частотно-регульованого електроприводу забезпечує плавний запуск, зупинку та регулювання швидкості, а також обмежуючи високі пускові струми. Це призводить до зниження витрат енергії для дутьової вентиляції до 70 відсотків. Поряд з економією електроенергії при застосуванні регульованих електроприводів зростає термін служби електричного та механічного обладнання. Також відбувається зменшення шуму, та вібрацій, збільшення показників міцності котельних пристосувань, повітряної та газової арматури.

РОЗДІЛ 3. ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Визначення ефективності застосування та енергозбереження проекту

Кількісні та якісні методи оцінювання конкурентоспроможності пов'язані здебільшого з розрахунком відносних величин (індексів,

коефіцієнтів), що визначають рівень ключових показників за окремими аспектами конкурентоспроможності (сферами діяльності), і їхнім подальшим об'єднанням у групові та інтегральний показники. Вони допомагають оцінити реальні шанси організації у конкурентній боротьбі за стратегічні зони господарювання та ухвалити зважене управлінське рішення. [11]. Також в кількісних методах використовують вагові (експертні) коефіцієнти. В нашому випадку система ЧРП АД з векторним управлінням має переваги перед нерегульованими приводами та тиристорними вентильними регуляторами напруги (ТРН-АД) в плані зручності в експлуатації, завадостійкості, енергозбереженні та надійності.

Визначення **ефективності застосування та енергозбереження** проекту можна оцінити за допомогою його інтегрального критерію

за формулою суми добутоків експертних оцінок обраних характеристик та їх вагових коефіцієнтів (експертних оцінок відповідних вимог до системи електропостачання промислових підприємств):

- 1) Безпека персоналу;
- 2) Автоматизація в експлуатації;
- 3) Завадостійкість;
- 4) Енергоефективність;
- 5) Надійність;
- 6) Компактність.

Результати інтегрального показника ефективності застосування та енергозбереження зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1. Порівняльна оцінка варіантів виконання проекту

Критерії	Ваговий коефіцієнт	Система ЧРП-АД	Нерегульований електропривід	Система ТРН-АД
1.Безпека персоналу	0.2	5	5	5
2. Автоматизація в експлуатації	0.18	5	4,5	4.2
3. Завадостійкість	0.14	4.2	5	3.8
4 Енергоефективність	0.14	5	4	5
5. Надійність	0.2	5	4	5
6. Компактність	0.14	4	4	4
Всього:	1,00	4,948	4,43	4,548

Показник ефективності застосування та енергозбереження виконання обраної системи має високе значення, отже, науково-дослідний проект з розробки асинхронного електроприводу витяжного насоса за системою ЧРП-АД ефективний. Також, виходячи із зручності в експлуатації, розглянута система управління АД перевершує конкурентів. З яскраво виражених плюсів даної системи у плані зручності можна виділити плавність регулювання електроприводу, що забезпечує високу надійність робочого органу та знижує його зношування. Також характерним плюсом є підвищення потужності у години максимальних навантажень, підвищений рівень автоматизації, керування моментом. Спираючись на вищесказані характеристики, була підтверджена пропонована у роботі система. На додаток усі системи мають достатню кількість переваг, але коли йдеться про недоліки, то система ЧРП-АД має всього 3 характерних недоліки - це додаткове обладнання у вигляді датчика, висока ціна, складність налаштування. Коли, наприклад, система ТРН-АД має 6 мінусів - це просадка по моменту при зниженій швидкості, мінімальний діапазон регулювання, мінімальна швидкодія, мінімальний коефіцієнт корисної дії при зниженій

напрузі, величезні втрати в момент пуску, що призводить до нагрівання. Таким чином, система ЧРП-АД є більш прийнятною.

3.2. Оцінка комерційного потенціалу та перспективності проведення наукових досліджень

В умовах сучасної економіки знань успіх комерціалізації інновацій стає ключовим фактором конкурентоспроможності підприємств та організацій. Для України проблема набуває особливої актуальності, оскільки за даними Глобального індексу інновацій в 2024 році Україна посідає лише 60-те місце серед 133 країн світу та 4-те серед економік з доходом нижче середнього. В умовах високої правової невизначеності процесів трансферу технологій, фрагментарності інноваційної інфраструктури та низької результативності існуючих підходів до оцінювання комерційного потенціалу знань значна частина їхньої ринкової вартості залишається нереалізованою.

Необхідно розуміти, що комерційна привабливість наукового дослідження визначається не тільки перевищенням технічних параметрів над попередніми розробками, а й тим, наскільки швидко розробник зуміє знайти відповіді на такі питання – чи буде затребуваний продукт ринком, яка буде його ціна, який бюджет наукового проекту, який термін знадобиться для виходу на ринок, тощо. і т.д. Таким чином, метою розділу «Економічна доцільність проведених досліджень» є обґрунтування створення конкурентоспроможних розробок, технологій, що відповідають сучасним вимогам у сфері ефективності експлуатації та використання енергоресурсів та енергозбереження.

В результаті виконаної роботи визначені сильні сторони проекту:

- Висока надійність димососа, означає те, що із застосуванням технології ЧРП-АД з'являється можливість регулювати швидкість обертання, тим самим з'являється можливість плавного пуску, що сприятливо позначиться на роботі двигуна а механічні апарати та рухливі частини прослужать

суттєво довше, знижується ризик стрибків напруги та різкого підвищення тиску в трубопроводі;

- Зростає безпека персоналу- дана розробка не дозволяє продуктам згоряння потрапляти в приміщення, також конденсату стане значно менше, що позитивно позначиться на мікрокліматі у котельні;

- Появляється можливість використати потужніші електродвигуни, та підвищена продуктивність котлоагрегату;

- Підвищується компактність усієї системи, з'являється можливість зробити димарі менші за розміром.

Слабкі сторони

- Підвищена вартість усієї системи, але все одно дешевше за конкурентну ТРН-АД;

- Потенційні загрози автоматизації, де з'являється додаткове обладнання у вигляді датчиків, перетворювачів, мікроконтролерів, тощо.

- Підвищені вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Висновки по розділу 3

З впровадженням нових технологій та обладнання в процесі модернізації з'являються нові можливості при експлуатації вентиляторних апаратів котелень. Якщо звузити охоплення тематики даного проекту, то основною метою буде впровадження регульованого електроприводу для підвищення їх ефективності, подовженню ресурсу, а отже, і продуктивності, а також забезпечити повну автоматизацію всіх систем зі застосуванням даної розробки, персоналу не доведеться постійно бути присутнім в котельні, так як підвищений ступінь автоматизації дозволить стежити та керувати за всім процесом дистанційно.

ВИСНОВКИ

Практичне значення проведених досліджень полягає в тому, що застосування імітаційного моделювання надає можливість суттєво економити кошти на етапі розробки системи автоматичного управління частотно- частотно- регульованого приводу асинхронними двигунами. Застосування частотно- регульованого приводу забезпечує плавний запуск, зупинку та регулювання швидкості, зменшувати високі пускові струми . Це призводить до зниження витрат енергії для дутьової вентиляції та суттєвого зниження ударних навантажень на електричні та механічні складові апаратів. Поряд з економією електроенергії при застосуванні регульованих електроприводів зростає термін служби електричного та механічного обладнання. Також відбувається зменшення шуму, та вібрацій, збільшення показників міцності котельних пристосувань, повітряної та газової арматури.

Впровадження технології частотно- регульованого приводу управління асинхронними двигунами при модернізації вентиляторного, насосного обладнання котельні економічно обґрунтоване та сприяє підвищенню енергоефективності та максимальній автоматизації процесів теплогенерації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технічна політика. Теплотехнічне обладнання. Технічні вимог КП «КИЇВТЕПЛОЕНЕРГО» до обладнання та матеріалів при будівництві, реконструкції та ремонті енергооб'єктів. ТП-4/01/1-87-21. М.Київ, 2021, -86 с.
2. Системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря будівель [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» / М.Ф.Боженко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 36,087 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 380 с.
3. Димососи одностороннього всмоктування (ТОВ «Вентиляторний завод ГОРИЗОНТ» вул. Гадяцького договору, 15, м Гадяч, Полтавська обл. 37300, zat.horizont@gmail.com, Україна
4. ПУЕ Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання) Наказ від 21.07.2017 № 476 Про затвердження Правил улаштування електроустановок. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України.
5. Вахванов Г.Г. Энергосбережение и надежность вентиляторных установок.-М.: Стройиздат, 1989.-176 с.
6. Лазарєв.Ю.Ф.Л17 Довідник з MATLAB / Електронний навчальний посібник з курсового і дипломного проектування. – К.: НТУУ "КПІ", 2013. – 132 с.
7. Гурко О.Г., Єрмоєнко І.Ф. Аналіз та синтез систем автоматичного керування в MATLAB. Навчальний посібник/ – Харків: ХНАДУ, 2011. - 286 с.
8. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016.

9. Півняк Г. Г. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтноїмпульсною модуляцією: монографія / Г.Г. Півняк, О.В. Волков. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2006. – 470 с.
10. Плахтина О.Г. та ін. Частотно-керовані асинхронні та синхронні електроприводи: Навч. посібник / О.Г. Плахтина, С.С. Мазепа, А.С. Куцик. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2002. – 228 с.
11. Аналіз методів оцінки конкурентоспроможності підприємства. А.В.Кваско , Київ, Національний технічний університет України «КПІ», УДК658:338.24 .
12. Гребенник Наталя Григорівна. Методи та інструменти ранньої діагностики комерційного потенціалу знань. Сталий розвиток економіки. № 4 (55), 2025. DOI: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2025-55-89>