

Міністерство освіти і науки України  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра електромеханіки та мехатроніки



«

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА**

**на тему «Дослідження та вдосконалення автоматизованого  
електроприводу дутьового вентилятора котельного агрегату»**

Здобувача Перлея В.В.

2 курсу АЕМм-20 групи

Керівник: к.т.н., доцент Бабіч В.Ф.

**Кваліфікаційна робота допускається до захисту**

Рішення кафедри від 19 грудня 2023 р., протокол № 5.

Завідувач кафедри Е та М \_\_\_\_\_ Петро Осадчук

Одеса – 2023 рік

# ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут: *Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова*

Факультет: *Автоматизації та робототехніки*

Кафедра: *Електромеханіки та мехатроніки*

Освітньо-кваліфікаційний рівень: *магістр*

Галузь знань: *14 – Електрична інженерія*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Завідувач кафедри ЕтаМ

д.т.н., доц. Осадчук П.І.

« \_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

## **ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА** здобувачу вищої освіти

**Перлею Валентину Володимировичу**

1 Тема роботи: «Дослідження та вдосконалення автоматизованого електроприводу дутьового вентилятора котельного агрегату»

Керівник роботи: Бабіч Владислав Федорович, к.т.н., доцент.

2 Затверджено наказом ОНАХТ № 841-03 від 15.11.2022 р.

Строк подання студентом роботи: 18.12.2023 р.

3 Вихідні дані до роботи: Дутьовий вентилятор водогрійного котла продуктивністю  $Q_n = 16$  т/год, тиск 1,4 МПа. Режим роботи – безперервний.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ. 1. Загальна характеристика роботи. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.

2 Опис технологічної схеми котла. Загальна характеристика електропривода дутьового вентилятора, як об'єкта управління. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми дутьового вентилятора. Методи регулювання швидкості обертання електроприводу вентилятора. Формулювання вимог до електроприводу вентилятора, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок статичних характеристик двигуна.

3 Дослідження роботи електропривода дутьового вентилятора на моделі. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу вентилятора. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи вентилятора до і після модернізації.

4 Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.

5. Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.

Список використаних джерел.

5 Перелік демонстраційного матеріалу: слайди презентації (15 шт.):

1 Титульний. 2 Мета, задачі, методи. 3 Технологічна схема водогрійного котла.

4 Розрахунок потужності двигуна, технічні характеристики. 5 Статичні характеристики електроприводу.

6 Структурна схема перетворювача частоти. 7 Принципова електрична схема силової частини. 8 Модель електроприводу насосу з прямим пуском. 9 Результати моделювання приводу з прямим пуском. 10. Модель модернізованого електроприводу дуттьового вентилятора. 11-14 Результати моделювання приводу після модернізації. 12 Висновки.

#### 6 Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний			

7 Дата видачі завдання: 17.08.2023 р.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів	Прим.
1	Вступ. Загальна характеристика роботи. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.	05.09.2023	
2	Опис технологічної схеми котла. Загальна характеристика електропривода дуттьового вентилятора, як об'єкта управління. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми дуттьового вентилятора. Методи регулювання швидкості обертання електроприводу вентилятора. Формулювання вимог до електроприводу вентилятора, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок статичних характеристик двигуна.	18.10.2023	
3	Дослідження роботи електропривода дуттьового вентилятора на моделі. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу вентилятора. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи вентилятора до і після модернізації з скалярним і векторним керуванням електроприводу.	22.11.2023	
4	Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.	05.12.2023	
5	Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.		
6	Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра	18.12.2023	
7	Перевірка роботи на добросовісність. Рецензування роботи	19.12.2023	
8	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	26.12.2023	

Здобувач \_\_\_\_\_ Перлей В.В.

Керівник \_\_\_\_\_ Бабіч В.Ф.

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого тексту кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення академічної добросовісності.

Здобувач \_\_\_\_\_ Перлей В.В.

## РЕФЕРАТ

Перлей В.В. «Дослідження та вдосконалення автоматизованого електроприводу дутьового вентилятора котельного агрегату». Кваліфікаційна робота магістра. Одеса: ОНТУ, 2023. – 86 с. Іл.: 25. Табл.: 18.

У кваліфікаційній роботі описаний автоматичний електропривод дутьового вентилятора водогрійного котла і його конструктивні особливості. Сформульовані вимоги до електроприводу, розраховане навантаження і обраний приводний двигун дутьового вентилятора.

У даній роботі був обгрунтований вибір системи електроприводу «перетворювач частоти-асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором», розглянуті існуючі закони управління двигунами з використанням перетворювача частоти і обраний закон регулювання.

Проведено розрахунок електричних параметрів схеми перемикання двигуна. Побудовані механічні та статичні характеристики асинхронного електроприводу та виконані дослідження перехідних процесів при прямому пуску та частотно-керованому в комплекті з перетворювачем частоти.

Розраховані прирости чистого прибутку, чистого грошового потоку і термін окупності.

**Ключові слова:** водогрійний котел, автоматизований електропривод, перетворювач частоти, математична модель, система частотного регулювання, механічні характеристики.

## ABSTRACT

Perley V.V. "Research and improvement of the automated electric drive of the blast fan of the boiler unit." Master's qualification work. – Odesa: ONTU, 2023. – 86 p. Illustration: 25. Table: 18.

The qualification work describes the automatic electric drive of the duct fan of the water heating boiler and its design features. Formulated requirements for the electric drive, calculated load and selected drive motor of the blower fan.

In this work, the choice of the electric drive system "frequency converter-asynchronous motor with a short-circuited rotor" was justified, the existing laws of motor control using a frequency converter and the selected regulation law were considered.

The electrical parameters of the engine switching circuit were calculated. The mechanical and static characteristics of the asynchronous electric drive were built and the transient processes were studied at direct start and frequency-controlled complete with a frequency converter.

Calculated increases in net profit, net cash flow and payback period.

**Key words:** water heating boiler, automated electric drive, frequency converter, mathematical model, frequency regulation system, mechanical characteristics.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ .....	8
ВСТУП.....	9
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНОГО НАПРЯМУ РОБОТИ .....	11
1.1 Науково-технічне обґрунтування підвищення ефективності електроприводу дутьового вентилятора парового котла.....	11
1.2 Технічні характеристики і принцип роботи котла ДКВР-20-13 .....	13
1.3 Особливості переведення парових котлів ДКВР у водогрійний режим .....	17
1.4 Барабанний паровий котел як об'єкт управління .....	23
1.6 Основні способи управління продуктивністю вентилятора.....	30
1.7 Розрахунок потужності привода дутьового вентилятора .....	34
2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	40
2.1 Вибір двигуна електропривода.....	40
2.2 Розрахункове визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна .....	41
2.3 Вибір перетворювача частоти.....	47
2.4 Опис роботи перетворювача частоти.....	49
2.5 Підключення ПЧ до електроприводу .....	50
2.6 Вибір закону управління електроприводом на базі ПЧ .....	52
3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРА.....	57
3.1 Побудова механічної характеристики вентилятора .....	57
3.2 Побудова сімейства механічних характеристик двигуна .....	58
3.3 Дослідження на моделі динамічних характеристик асинхронного двигуна при прямому пуску.....	61

					<b><i>KPM.EmM.1.841-03.1.10</i></b>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Дослідження та вдосконалення автоматизованого електроприводу дутьового вентилятора котельного агрегату</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розробив</i>		<i>Перлей В.В.</i>					6	
<i>Керівник</i>		<i>Бабіч В.Ф.</i>				<b>ОНТУ, АЕМм-20а</b>		
<i>Зав.кафедри</i>		<i>Осадчук П.І.</i>						

3.4 Дослідження на моделі динамічних характеристик асинхронного електропривода з широтно-імпульсним перетворювачем частоти (АД-ПЧ) .....	64
3.5 Дослідження на моделі динамічних характеристик асинхронного електропривода з векторним управлінням [4].....	67
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	77
4.1 Розрахунок витрат при існуючому електроприводі вентилятора .....	77
4.2 Розрахунок витрат в проектному варіанті (з ПЧ-АД) .....	79
5 РЕЗУЛЬТАТИВНА ЧАСТИНА .....	83
5.1 Висновки і рекомендації за прийнятими в проекті рішеннями.....	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	85

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ

- ТОУ – Технологічний об'єкт управління
- АД – Асинхронний двигун;
- ЕП – Електропривод;
- ГПЗ – Головна парова засувка;
- АСР – Автоматична система регулювання
- РЖК – Регулюючий живильний клапан,
- ДВ – Дутьовий вентилятор,
- ДС – Димосос
- НА – Направляючий апарат;
- ДШ – Датчик швидкості;
- ПЧ – Перетворювач частоти;
- АН – Автономний інвертор напруги;
- ШІМ – Широтно-імпульсна модуляція;
- ККД,  $\eta$  – Коефіцієнт корисної дії;
- $\omega$  – Кутова швидкість (частота обертання), рад/с;
- М – Момент сили, Н·м;
- Н, h – Тиск, Па;
- Q – Продуктивність, м<sup>3</sup>/с;
- Р, N – Потужність, Вт;
- I, i – Струм (Сила електричного струму), А;
- $\Psi$ ,  $\psi$  – Потокозчеплення, Вб;
- f – Частота, Гц;
- R, r – Електричний опір, Ом;
- T, t – Час, с;
- L, l – Індуктивність, Гн;
- S, s – Ковзання, %;
- J, j – Момент інерції, кг·м<sup>2</sup>.
- $\alpha$  – Коефіцієнт надлишку повітря

## ВСТУП

Для вироблення теплової енергії для виробничих потреб використовує до 60...70% споживаного енергетичного палива, що ставить актуальне завдання роботи парового котла в оптимальному режимі при змінних навантаженнях. Велика частина вироблюваної електроенергії споживається системами електроприводу, електротехнічними і освітлювальними установками. Резерви енергозбереження передбачені для вдосконалення електроприводу, на частку якого припадає більше половини всієї споживаної електроенергії.

Автоматизація технологічних процесів є одним з вирішальних факторів підвищення продуктивності праці та якості продукції. Це може забезпечити безпечні умови експлуатації обладнання, знизити викид шкідливих речовин в атмосферу, звільнити людей від монотонної і копіткої роботи, надати можливість удосконалювати і розвивати наукову і матеріальну основу існування людини.

Завдяки впровадженню сучасних технологій, використанню мікропроцесорних систем управління технологічним процесом можливо здійснювати більш гнучкий і оперативно адаптований вплив на роботу керованого об'єкта.

Задача оптимізації процесу спалювання палива при зміні навантаження котла зі зміною витрати палива або його складу може бути вирішена шляхом підтримки оптимального співвідношення паливо-повітря шляхом зміни витрати повітря в камеру згоряння пропорційно витраті палива з використанням корекції за складом димових газів  $q_3$  по концентрації CO або  $H_2$ . Концентрацію токсичних оксидів азоту  $NO_x$  важко виміряти, і її знижують за рахунок рециркуляції димових газів в камеру згоряння.

Таким чином, підвищення ефективності процесу спалювання палива в котлі може бути досягнуто за рахунок автоматизації електроприводу вентилятора, що дозволяє підтримувати точне співвідношення палива і повітря.

**Актуальність теми.** У сучасній ситуації, коли ціни на енергоносії, матеріальні ресурси і робочу силу постійно зростають, вдосконалення

автоматизованих електроприводів дутьових вентиляторів призведе до великих економічних ефектів, безаварійної роботи і зниження вартості теплової енергії.

**Мета дослідження:** автоматизований електропривод дутьового вентилятора парового котла.

**Предмет дослідження:** АСР електроприводу дутьового вентилятора.

Метою даної роботи є підвищення ефективності виробництва теплової енергії в паровому котлі, використовуючи розроблену систему управління автоматичним електроприводом дутьового вентилятора.

**Цілі дослідження:**

- Огляд проблем управління процесами спалювання палива в парових котлах і порівняння вітчизняних і передових зарубіжних технологій і рішень.
- Переведення парового котла в водогрійний режим роботи.
- Технологічна схема газоповітряного тракту парового котла ДКВР-20-13 і спосіб оптимізації процесу спалювання палива.
- Аналіз режиму роботи, конструкція і технічні характеристики вентиляторних установок парових котлів.
- Розрахунок та вибір електродвигуна, ПЧ для електропривода вентиляторної установки та закону управління двигуном.
- Розрахунок механічних характеристик двигуна та параметрів схеми заміщення електропривода вентиляторної установки.
- Розробка імітаційних моделей частотно-регульованого асинхронного електроприводу зі скалярним і векторним керуванням та дослідження динамічних властивостей електропривода вентиляторної установки на моделі у середовищі MATLAB-Simulink.

# 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНОГО НАПРЯМУ РОБОТИ

## 1.1 Науково-технічне обґрунтування підвищення ефективності електроприводу дутьового вентилятора парового котла

Значне зростання цін на енергоносії і загострення екологічних проблем висувають все більш жорсткі вимоги до систем автоматичної оптимізації спалювання органічного палива в парових і водогрійних котлах, що використовуються в харчовій промисловості і комунальному господарстві.

Більшість автоматичних систем контролю співвідношення палива і повітря побудовані з використанням стаціонарного киснеміра, який як і раніше використовує сигнал корекції кількості кисню  $O_2$  в димових газах. Такі системи, як правило, непридатні для роботи в режимі автоматичного управління через спотворення концентрації кисню в димових газах через неконтрольованого всмоктування повітря в газовому тракті, де підтримується вакуум, неоднакових характеристик пальників в котлах з декількома конфорками, коливань вологості повітря, змін теплотворної здатності і типу палива і т. д.

Оптимізація процесу горіння заснована на вимірюванні мікроконцентрації компонентів хімічного недопалювання  $q_3$  в димових газах - монооксиду вуглецю  $CO$  і/або водню  $H_2$ , ці параметри дуже чутливі до змін характеристик процесу горіння і мають незначний вплив від всмоктування повітря, уникаючи при цьому значної перевитрати палива.

В останні роки для вимірювання мікроконцентрації  $CO$  в димових газах котлів стали використовуватися прості в обслуговуванні, довговічні і недорогі твердотільні датчики  $CO$ , які не вимагають систем відбору проб димових газів і підготовки їх до аналізу, не вимагають частого калібрування [2, 3]. Вони монтуються безпосередньо на хвостовій частині димоходу парового котла і працюють при температурі димових газів до  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . Чутливість таких датчиків дозволяє вимірювати мінімальну концентрацію монооксиду вуглецю на рівні

сотих долей об'ємного проценту, а вихідний сигнал являє собою уніфікований струм 0... 20 або 4... 20 мА.

Процес спалювання палива в камері згоряння парового котла повинен протікати при оптимальному співвідношенні палива і повітря, тобто оптимальному коефіцієнті надлишку повітря, що визначається як відношення теоретичної витрати повітря до фактичної при зміні навантаження котла  $\alpha_{opt} = 1,02...1,04$ .

Режим недопалювання палива при нестачі окислювача палива, з економічної сторони – неповне використання палива, а з екологічної сторони при температурах вище 800 °С природний газ, що складається з метану  $CH_4$ , розкладається на токсичний монооксид вуглецю  $CO$ , який викидається в атмосферу димоходи і токсичний для навколишнього середовища і виділяється також водень  $H_2$ .

Режим подачі надлишкового повітря з коефіцієнтом надлишку повітря, що перевищує оптимальний, тобто з надлишковим окислювачем палива, є також неефективним режимом використання палива з економічної точки зору, оскільки надлишкова частина повітря нагрівається до температури в топці, приблизно до 1200 °С, а потім викидається в навколишнє середовище через димохід (опалення навколишнього середовища). У цьому режимі теплові витрати  $q_2$  збільшуються.

Задача оптимізації процесу спалювання палива при зміні навантаження котла зі зміною витрати палива або його складу може бути вирішена шляхом підтримки оптимального співвідношення паливо-повітря шляхом зміни витрати повітря в камеру згоряння пропорційно витраті палива з використанням корекції за складом димових газів  $q_3$  по концентрації  $CO$  або  $H_2$ . Концентрацію токсичних оксидів азоту  $NO_x$  важко виміряти, і її знижують за рахунок рециркуляції димових газів в камеру згоряння.

Таким чином, підвищення ефективності процесу спалювання палива в котлі може бути досягнуто за рахунок автоматизації електроприводу вентилятора, що дозволяє підтримувати точне співвідношення палива і повітря.

## 1.2 Технічні характеристики і принцип роботи котла ДКВР-20-13

Сучасні котельні установки являють собою складну технічну конструкцію. Вона складається з котлоагрегату і допоміжного обладнання. Продукція котельного цеху – це пара і підігріта вода необхідних параметрів, які використовуються для технічних потреб і опалення.

Паровий котел ДКВР-20-13 з газомазутними пальниками – двобарабанный, вертикально-водотрубний котел, в основному призначений для виробництва насиченої або злегка перегрітої пари. Перша цифра після назви типу котла відноситься до паропродуктивності, т/год, друга цифра – це тиск пари в барабані котла, кгс/см<sup>2</sup>. Технологічна схема котла типу ДКВР показана на рисунку 1.1, а технічні характеристики парового котла типу ДКВР на газі і мазуті наведені в таблиці 1.1.

Котел ДКВР складається з наступних основних компонентів: двох барабанів (верхнього і нижнього), екранних труб, екранних колекторів (камер).

Барабани котла мають однакові внутрішні діаметри – 1000 мм при товщині стінок 13 мм. Для контролю рівня води до верхнього барабану прикріплені водовимірювальні скляки, що показують рівень води, і індикатор рівня. Для котлів з довгим барабаном водовимірювальне скло кріпиться до циліндричної частини барабана, а для котлів з коротким барабаном – до передньої нижньої частини. Імпульсні трубки підключаються до регулятора рівня з передньої нижньої частини верхнього барабана.

У водяному просторі верхнього барабана є підвідний патрубок, труба для безперервного очищення води в котлі ДКВР-20-13 з довгим барабаном і перфорована труба для поділу обсягу періодичної продувки паром, пристрій для нагріву барабана при розпалюванні і насадки для зливних пристроїв для води, встановлені в нижньому барабані.

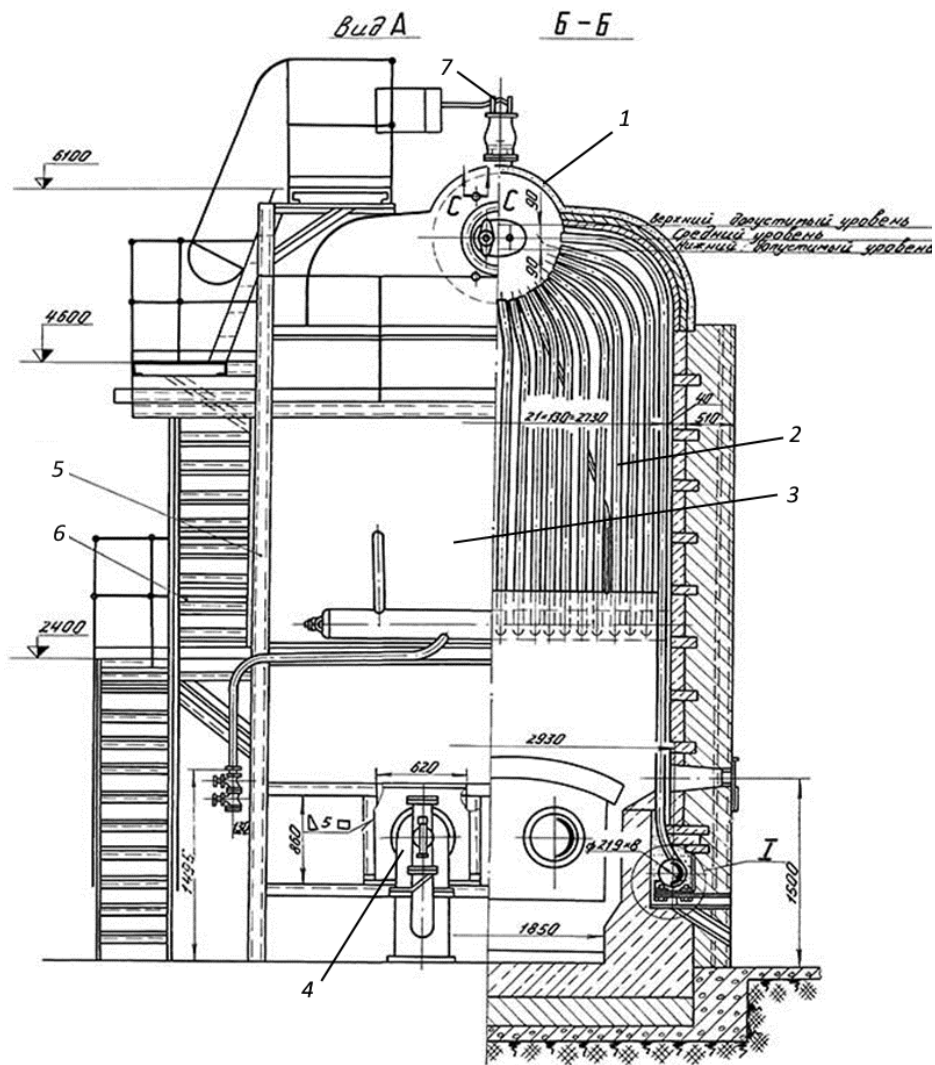


Рисунок 1.1 – Конструкція парового котла серії ДКВР-20-13

- 1 – барабан; 2 – екранні труби; 3 – топкова камера; 4 – паликовий пристрій;  
 5 – корпус; 6 – трап для обслуговування; 7 – запобіжний паровий клапан

Бокові екранні колектори розташовані під виступаючою частиною верхнього барабана, поруч з бічними стінками корпусу котла. Для створення циркуляційного контуру в екрані передній кінець кожного колектора екрану з'єднаний з верхнім барабаном неопалюваною низхідною трубою, а задній кінець з'єднаний з нижнім барабаном проточною трубою.

Вода надходить у бокові екрани одночасно з верхнього барабана через передню зливну трубу і з нижнього барабана через прохід.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики котлів серії ДКВР

Показник	ДКВР- 2,5-13ГМ	ДКВР- 4,0-13ГМ	ДКВР- 6,5-13ГМ	ДКВР- 10-13ГМ	ДКВР-20- 13ГМ
Паропродуктивність, т/г	2,5	4,0	6,5	10	20
Тиск пари, МПа, кгс/см <sup>2</sup>	1,3(13)	1,3(13)	1,3(13)	1,3(13)	1,3(13)
Температура пари, °С	194	194	194	194	194
Поверхня нагріву котла, м <sup>3</sup> :					
– радіаційна	17,7	21,4	27,9	47,9	51,3
– конвективна	73,6	116,9	197,4	229,1	357,4
– загальна	91,3	138,3	225,8	227,0	408,7
Об'єм котла, м <sup>3</sup> :					
– паровий	1,57	2,05	2,55	2,63	1,80
– водяний	4,00	5,55	7,80	9,11	10,5
Витрата палива, кг/г:					
– газу	210	310	550	840	2060
– мазуту	200	320	700	1060	1960
Розрахунковий ККД, %:					
– газ	90	90	91	91	92
– мазут	88,8	88,8	89,5	89,5	90
Габаритні розміри, мм:					
– довжина	4120	5410	6520	6860	9775
– ширина	3200	3430	3830	3830	3215
– висота	4343	4345	4345	6315	7660
Маса, кг	7068	7800	12200	16000	43700

Така схема живлення бокових екранів підвищує надійність роботи при низькому рівні води у верхньому барабані і збільшує частоту циркуляції. Екранні труби парового котла ДКВР виготовлена зі сталі 51/2,5 мм. Циркуляція по екранним трубам відбувається тому, що вода в передньому ряду труб швидко випаровується, оскільки вона розташована поруч з топкою і омивається газом, який більш гарячий, ніж задній ряд. В результаті в задній трубі на виході газу з котла вода не піднімається, а опускається.

Камера згоряння розділена на дві частини – топку і камеру згоряння для того, щоб запобігти потраплянню полум'я в конвекційний пучок і зменшити втрати через винесення (через механічної неповноти згоряння палива). Перегородка котла сконструйована таким чином, що димові гази омивають трубу поперечним потоком, що сприяє теплопередачі конвекційної секції.

Надходження газу з топки в камеру згорання і вихід газу з котла асиметричні. Якщо є пароперегрівач, то частина кип'ятильних труб не встановлена. Пароперегрівач котла типу ДКВР, розміщений в першому газоході, уніфікований за профілем котла однакового тиску, а в котлах різної потужності один і той же пароперегрівач являє собою однопрохідний пароперегрівач, який забезпечує подачу перегрітої пари без використання пароохолоджувачів. Камера перегрітої пари прикріплена до верхнього барабана, одна опора цієї камери нерухома, а інша рухлива.

Для видалення відкладень в котлі в нижній камері сита є торцевий люк, а для періодичної продувки камери є фітинг діаметром 32х3 мм.

Допоміжне обладнання котла включає в себе дутьовий вентилятор, димосос, обладнання для очищення води, подачі палива, видалення шлаку і золи і систему збору золувловлювання. Також контрольно-вимірювальне обладнання та засоби автоматизації. До них відносяться вимірювальний датчик АДР-0.25.3 і необхідні приналежності: запобіжний клапан; манометр; скляна рамка індикатора рівня і запірний пристрій індикатора рівня; запірний клапан котла і зворотний клапан; запірний клапан для продувального барабана, камери сита, регулятора і пароперегрівача; клапан для зливу води з нижнього барабана.

Датчик вимірювання тиску-розрідження повітря АДР-0.25.3 призначений для:

- Безперервного вимірювання розрідження та надлишкового тиску газу з формуванням струмового вихідного сигналу 4...20 мА;
- Формування дискретного вихідного сигналу, при досягненні тиску граничного рівня;
- Стабілізації заданого значення тиску природного газу перед пальником за III-законом.—

Процес горіння палива, розрідження та склад димових газів регулюється дутьовими вентиляторами і димососами у газоповітряному тракті котла. Автоматична подача повітря регулюється за непрямыми показниками: кількістю палива; споживанням пари; кількістю тепла тощо. Для підтримки стабільного процесу горіння необхідно подавати повітря в пальник за допомогою вентилятора і видаляти продукти горіння за допомогою димососа. Непрямим показником

відповідності між подачею палива і повітря в топку і видаленням продуктів згоряння є розрідження в камері згоряння. Збільшення розрідження призводить до збільшення всмоктування повітря в топку і димохід через щілини в корпусі котла. У той же час збільшується енергоспоживання електроприводу димососа і знижується ефективність котельної установки. Також не слід допускати в топці надлишковий тиск, так як димові гази будуть надходити з котла в приміщення котельні. Витрата повітря і розрідження в печі регулюються шляхом зміни продуктивностей дутьового вентилятора і димососа. Більшість вентиляторів і димососів оснащені електродвигунами з асинхронними електродвигунами з короткозамкненими роторами.

### **1.3 Особливості переведення парових котлів ДКВР у водоگрійний режим**

У багатьох промислових опалювальних котлах через зміни в структурі виробництва в даний час відсутнє парове навантаження і вони використовуються для тепlopостачання та гарячого водopостачання. Як правило, в таких випадках розглядається можливість переведення парового котла в режим підігрівання води. У той же час експлуатація котельні значно спрощується за рахунок скасування всього парового контуру (пароводяного нагрівача, атмосферна деаерації, охолоджувача конденсата, живильного насоса, пароконденсатної арматури). В котлі, зокрема, відпадає необхідність контролювати рівень води в барабані і якість води з котла.

Часто, якщо у котла вже закінчився розрахунковий термін служби і споживачеві не потрібна висока температура теплоносія, паровий котел переводиться в водогрійний режим роботи з максимальною температурою нагріву води 115 °С. Це дозволяє зробити експлуатацію котла більш безпечною, значно підвищити його ККД, значно збільшити теплову потужність і зняти його з обліку у відділі технічного та екологічного нагляду. Після переведення парових котлів в режим гарячого водopостачання за сучасними схемами (як правило, з частковим використанням природної циркуляції) вони можуть ефективно працювати

тривалий час. Різні автори неодноразово згадували в статтях про існування парку котелень з паровими котлами, введеними в експлуатацію протягом 60-80-х років.

Наявність тільки опалювальних навантажень, відсутність достатніх коштів на реконструкцію, а також сприятливі умови експлуатації котла включають в себе: використання газового палива, стаціонарну роботу за основними параметрами, відповідність стандартам якості мережевої і підживлювальної води, низькі температури мережевої води (до 115 °С), переведення котлів ДКВР-10-13 і ДКВР-20-13 у водогрійний режим (всього 10 котлів) [4].

Запропонована схема (рисунки 1.2, 1.3) є вигідною порівняно зі схемою спеціальних водогрійних котлів за деякими показниками [4]:

- Універсальність конструкції, тобто можливість роботи в паровому і водогрійному режимах (в цьому випадку виключається робота котла в паровому режимі);
- Внутрішній огляд, контроль, ремонт, поставка механічного очищення внутрішньої поверхні нагріву;
- Уловлювання і видалення осаду шляхом періодичної продувки з нижнього барабана;
- Більш гнучке регулювання теплової потужності (якісне – по температурі прямої води і кількісне – шляхом зміни витрати мережної води в певних допустимих межах);
- Низька вартість процесу переведення котла в режим гарячої води.

Будь-який промисловий паровий котел може бути переведений в режим водогрійного. Є приклади такої роботи з котлами типу ШБ (включаючи екрановані), Е-1/9 (двобарабанні і вертикальні), ДКВР і ДЕ всіх стандартних розмірів. Схема реконструкції котла може відрізнитися. Як приклад на рисунку 1.2 показана одна з можливих схем переведення парового котла ДКВР-10-13 в режим водогрійного. При переведенні за цією схемою котел має мінімальний гідравлічний опір в порівнянні зі схемою перегородок в барабані.

Існуючі дві основні схеми переведення парового котла в режим гарячого водопостачання з рухом води в котлі (примусовий потік і природна циркуляція) були відхилені через недосконалість і наявності негативних відгуків від

наглядних установ. Негативність рейтингу пов'язана з швидким виходом з ладу котла ДКВР-20-13 після перемикання в режим гарячого водопостачання.

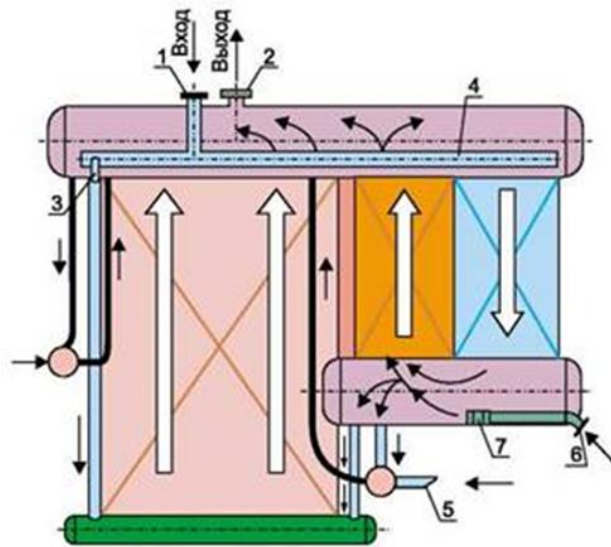


Рисунок 1.2 – Принципова схема переведення парового котла ДКВР-20-13 до водогрійного режиму: 1 – вхід мережевої води до верхнього барабану; 2 – вихід мережевої води з котла, 3 – опускні труби бічних колекторів; 4 – розподільчий колектор мережевої води у верхньому барабані; 5 – подача води до заднього екрану

Таким чином, для посилення процесу циркуляції вся мережева вода даної схеми вводиться в котел тільки через форсунки спеціальних спонукачів – струменевих насосів, розташованих для введення в усі неопалювані низхідні труби і частково піднятих (перші 3 ряди конвекційних променевих труб). Це дозволяє отримати максимальну за рахунок:

- Багаторазової примусової циркуляції з витратою, що в 3...4 рази перевищує витрату мережевої води, і збільшена швидкість подачі води на більшості поверхонь нагріву з високим тепловим навантаженням;
- Інтенсивної природної циркуляції води в інших конвекційних трубах з відносно низьким тепловим навантаженням;
- Збереження схеми із примусово-прямоточним рухом води в економайзері;
- Зниження гідравлічного опору котла ДКВР-20-13 до 1,0...1,1 кгс/см<sup>2</sup>, збільшення запасу надійності першого топкового блоку з найбільшим тепловим навантаженням за рахунок реконструкції верхньої частини виносного циклону.

Переведення парових котлів ДКВР-20-13, ДКВР-10-13 на режим гарячого водопостачання здійснюється за тим же принципом. На рисунку 1.2 показана схема циркуляції води в котлі ДКВР-20-13.

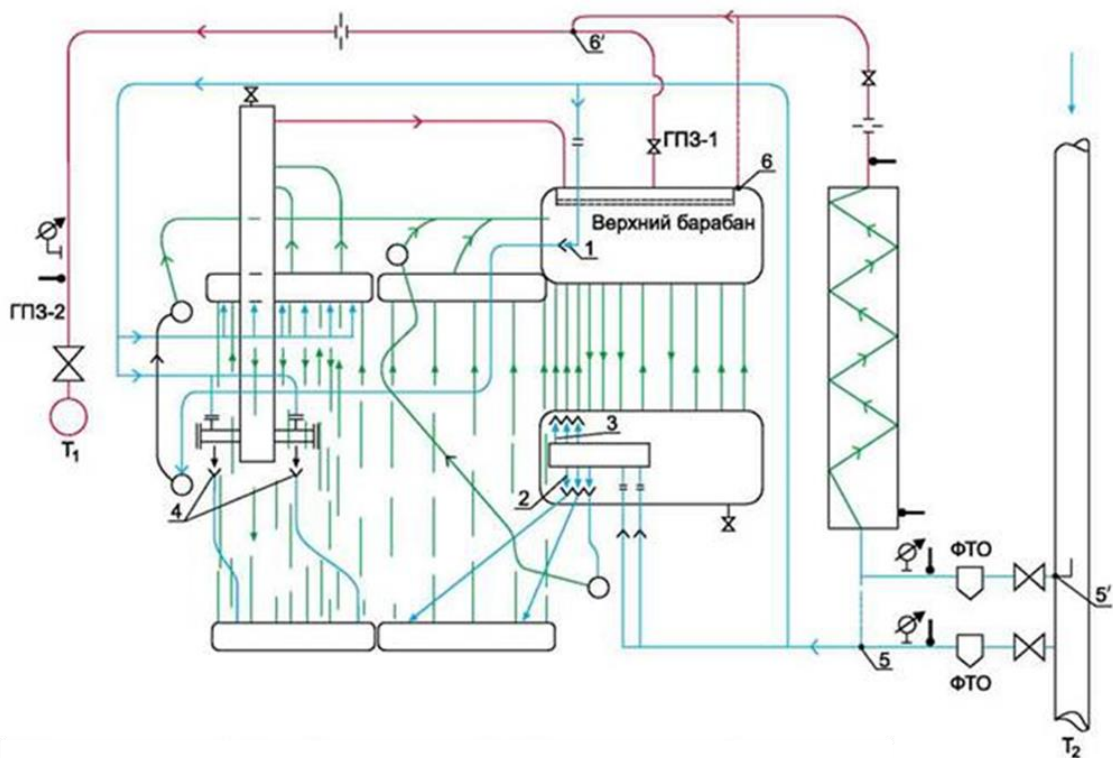
Значення швидкості подачі води в усі форсунки струменевого насоса вибираються відповідно до необхідної витрати мережевої води через котел 235 т/год і 15 т/год через економайзер, а загальна витрата може збільшитися і регулюється до 115 т/год при підтримці температурного режиму котла 70/310 °С.

В таблиці 1.1 показаний розподіл витрати мережевої води по контуру, перевірений портативним витратоміром і скоригований під час стендових випробувань котла шляхом регулювання діаметрів сопела.

Таблиця 1.1 – Розподіл витрати мережевої води за контурами циркуляції (за даними переносного витратоміра): К – котел, ЕК – економайзер.

Контур циркуляції	Витрата мережевої води					
	310 т/год (К+ЕК)		250 т/год (К+ЕК)		235 т/год (К)*	
	Витрата, т/год	Швидкість, м/с	Витрата, т/год	Швидкість, м/с	Витрата, т/год	Швидкість, м/с
Фронтний екран	14,4	0,25	11,2	0,2	10,41	0,15-0,2
Бічний екран першого блоку	102,3	0,68	93,6	0,5	96,14	0,5-0,65
Бічний екран другого блоку	74,2	0,52	63,7	0,41	64,95	0,4-0,45
Задній екран	52,1	0,8	41,1	0,71	40,31	0,45-0,9
Конвективний пучок	44	0,44	26,4	0,22	24,39	0,15-0,2
Економайзер	23	–	15	–	15	–

\* витрату мережевої води через економайзер змінюють, щоб регулювати температуру димових газів (витрата води через котел постійна).

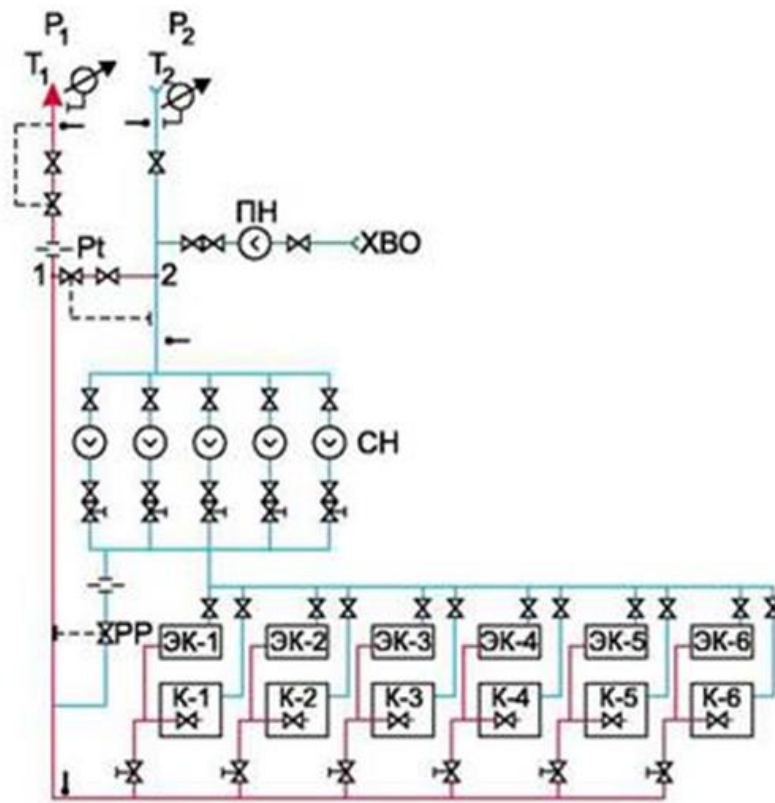


— – пряма мережева вода    — – зворотна мережева вода  
— – циркуляційна вода всередині котла

Рисунок 1.3 – Схема циркуляції та руху води у котлах ДКВР-20-13: ↓ – точки вимірювання температури;  $\phi$  – точки вимірювання тиску;  $\psi$  – звужуючі пристрої для вимірювання витрат; 1...4 – струменеві насоси; ГПЗ-1, ГПЗ-2 – головні парові засувки; ФТО – фільтри тонкого очищення; 5, 5', 6, 6' – точки підключення водопроводів

В результаті витрата води через економайзер збільшилася до 26 т/год, що дозволило регулювати температуру димових газів за економайзером. Був прокладений з'єднувальний трубопровід від точки 1 до точки 2 і встановлений регулятор температури (рисунок 1.4). Це дозволило регулювати: температуру  $T_2$ , витрату і тиск мережевої води в тепловій мережі, рециркуляцію мережевої води в котельні.

Переведення парового котла у водогрійний режим і досвід експлуатації протягом трьох опалювальних сезонів (літнє використання гарячої води) дали можливість зробити наступні висновки [4]:



— — прямой водопровід    — — зворотний водопровід

Рисунок 1.4 – Технологічна схема котельні: РД – регулятор тиску; Pt – регулятор температури T2; PP – регулятор витрати мережевої води (в обхід котлів); К1...К6 – котли ДКВР-10-13; ЕК1...ЕК6 – економайзери; СН – мережеві насоси; ПН – аварійний живильний насос; 1, 2 – точки підключення трубопроводу-перемички; ↓ – точки вимірювання температур; ⊕ – вузли обліку витрат мережевої води та теплової енергії

1. Залежно від технічних параметрів запропонованої схеми котли ДКВР-10-13 і ДКВР-20-13 невибагливі в експлуатації і не бояться повторних запусків і зупинок. Через короткий час (протягом 20 хвилин) після розпалювання котел отримає 100% завантаження з холодного стану;

2. В котельному залі було встановлено додаткові прилади опалення у зв'язку з різким зниженням теплових втрат через обмуровку (максимальна температура поверхні обшивки котлів стала 20...35 °С)

3. Незважаючи на безпеку стандартних пальників і витяжних машин, було доведено, що ККД котлів в режимі подачі пари становить в середньому від 89,3% до 94,4% в режимі подачі гарячої води;

4. Кількість операторів котельні скоротилася вдвічі;
5. Демонтовані основні частини не потрібного допоміжного технічного обладнання корпусу парового котла;
6. У зв'язку з конфігурацією підживлення опалювальної мережі через існуючі перемички від інших джерел тепла залишається один працюючий фільтр Na-катионату для аварійного підживлення;
7. Споживання паливно-енергетичних ресурсів в опалювальний сезон було знижено на 4,6% за рахунок підвищення ККД і теплопродуктивності котла. Коефіцієнт споживання електроенергії для вироблення тепла знизився з 25 кВт/гкал до 19 кВт/Гкал. Екологічна обстановка в міських мікрорайонах покращилася за рахунок скорочення викидів в навколишнє середовище.
8. За рахунок підвищення ефективності джерела тепла вартість 1 Гкал теплової енергії для кожної котельні була знижена на 18%;
9. Економія капітальних витрат на реконструкцію джерел тепlopостачання склала 12,3 млн.грн.

Дана схема переведення парових котлів ДКВР-20-13 і ДКВР-10-13 в режим гарячої води рекомендована нами для впровадження на котельнях в Україні як один з успішних проектів, реалізованих протягом трьох опалювальних сезонів і перевірених часом.

#### **1.4 Барабанний паровий котел як об'єкт управління**

На рисунку 1.5 показана принципова схема технологічного процесу, що виконується в барабанному паровому котлі. Паливо надходить в топку 1 через пальниковий пристрій, де воно спалюється в факелах. При спалюванні твердого палива топка оснащується пристроями для спалювання на спеціальних решітках, в киплячому шарі або після тонкого розмелювання в факельним способом.

Для підтримки процесу горіння палива повітря подається в піч в кількості  $Q_{в.}$ , за допомогою вентилятора ДВ і попередньо нагрівається повітрянагрівачем 8. Димові гази  $Q_{г.}$ , що утворюються при горінні, видаляються з печі димососом ДС. Далі вони проходять через поверхню нагріву пароперегрівача 5, водяного

економайзера 7, повітрянагрівача 8 і видаляються в атмосферу через димохід. Процес випаровування здійснюється в підйомній трубі циркуляційного контуру 3, яка екранує камерну топку і забезпечується водою з низхідної труби 2.

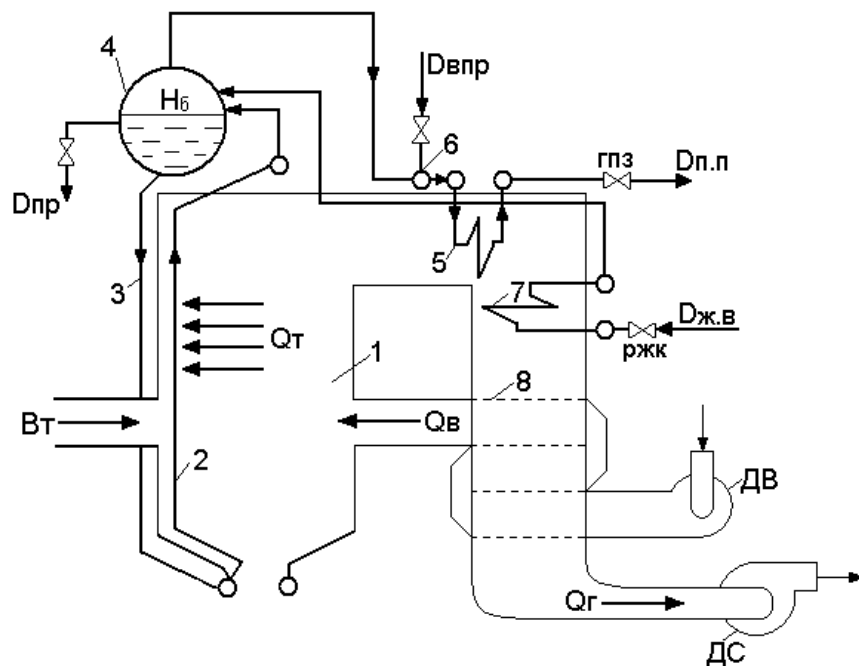


Рисунок 1.5– Принципова технологічна схема барабанного котла: ГПЗ – головна парова засувка; РЖК – регулюючий живильний клапан, ДВ – дуттьовий вентилятор, ДС – димосос

Насичена пара  $D_6$  з барабана 4 надходить в пароперегрівач, де вона нагрівається до заданої температури конвекційним нагрівом за рахунок факельного випромінювання і димових газів. У цьому випадку температура перегрітої пари регулюється в парохолоджувачі 6 шляхом впорскування води  $D_{впр}$ .

Основним параметром котла, який необхідно регулювати, є витрата перегрітої пари  $D_{п.п}$ , її тиск  $P_{п.п}$  і температура  $t_{п.п}$ . Витрата пари є змінною, її тиск і температура підтримуються в межах допустимих відхилень, які визначаються вимогами режиму роботи турбіни або іншого споживача теплової енергії.

Крім того, значення наступних величин повинні підтримуватися в межах допустимих відхилень:

- Рівень води в барабані  $H_6$  регулюється зміною подачі води  $D_{ж.в}$ ;

- Розрідження в топці  $S_T$  регулюється шляхом зміни продуктивності димососа в димоході, що видаляє димові гази з топки;
- Оптимальний процес спалювання палива в печі визначається надлишком повітря за пароперегрівачем  $\alpha(O_2)$ , регулюється зміною продуктивності дутьового вентилятора для нагнітання повітря в топку;
- Солоність котлової води (в перерахунку на  $NaCl$ ) регулюється зміною витрати води  $D_{п.р}$ , що подається з барабана в розширювач безперервної продукції.

Котел як технологічний об'єкт управління (ТОУ) являє собою складну динамічну систему з декількома взаємопов'язаними вхідними і вихідними значеннями (рисунок 1.6). Як видно з параметричної схеми котла, основними каналами регулюючих впливів на регульовані вихідні змінні є: витрата палива  $B_T$  – тиск пари  $P_{п.п}$ ; витрата води для уприскування  $D_{впр}$  – температура перегріву пари  $t_{п.п}$ ; витрата повітря  $Q_v$  – склад димових газів тощо. Це дозволяє використовувати незалежні одноконтурні системи автоматичного регулювання основних технологічних параметрів.

У той же час регулюючий параметр конкретного каналу передачі (суцільна лінія на рисунку 1.6) виступає в якості основного засобу стабілізації заданого значення регульованого параметру, в той час як інші параметри (пунктирна лінія) є внутрішніми або зовнішніми збуреннями, пов'язаними з цим параметром.

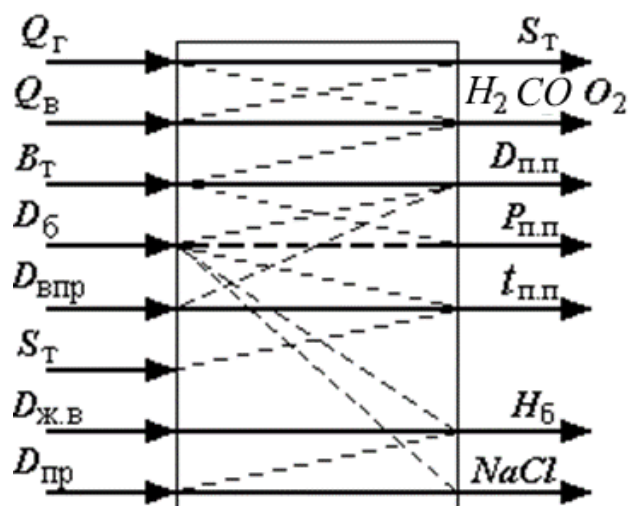


Рисунок 1.6 – Параметрична схема барабанного парового котла

Таким чином, система управління барабанним котлом включає в себе автономну систему управління процесами горіння і пароутворення, температури перегрітої пари, режимом живлення і подачі води.

Надійна і економічна робота електроприводу повітряних вентиляторів, димососів і живильних насосів залежить не тільки від якості підтримки регульованих параметрів, але і від ефективності роботи всього котлоагрегату.

## **1.5 Вибір структури системи для автоматичної оптимізації процесу спалювання газоподібного палива в топковій камері котла**

### **1.5.1 Вибір допустимих концентрацій компонентів продуктів згорання палива, що характеризують ефективність процесу горіння**

Вибір вектора «ідеальних» значень концентрації компонентів хімічного недопалювання палива в димових газах для нормалізації концентрації  $C^E$  проводиться шляхом вирішення задачі мінімізації втрат палива:

$$q = q_2 + q_3, \quad q(\alpha) \rightarrow \min, \quad (1.1)$$

за умови, що  $q_3 \leq q^{\text{доп}}$ .

Тут  $q_2$  і  $q_3$  – відносні втрати тепла, відповідно, з газами, що викидаються, і з хімічним недопалом;  $q^{\text{доп}}$  – припустиме значення втрат тепла з хімічним недопалом.

Залежність  $q_2(\alpha)$  – лінійна за надлишком повітря в топці  $\alpha$ ,

Втрати тепла через хімічну недосконалість процесу спалювання газу  $q_3$  викликані нестачею в топці кисню, поганим змішуванням палива з повітрям, різким падінням рівня температури в зоні горіння і, якщо є інші причини, в результаті цих факторів горіння газу відбувається неповністю і разом з продуктами згорання в атмосферу викидаються незгорілі горючі компоненти

(водень, монооксид вуглецю, метан тощо). Це призводить до неповного використання хімічної енергії палива і зниження ККД газового обладнання.

Втрати тепла через хімічну неповноту згорання палива

$$q_3 = \frac{Q_{\text{пргор}} \cdot h \cdot 100}{P}, \% \quad (1.2)$$

де  $Q_{\text{пргор}}$  – теплота згорання 1 м<sup>3</sup> сухих продуктів горіння.

$$Q_{\text{пргор}} = 30,2 \cdot \text{CO}' + 25,8 \cdot \text{H}_2' + 85,5 \cdot \text{CH}_4', \quad (1.3)$$

де  $\text{CO}'$ ,  $\text{H}_2'$ ,  $\text{CH}_4'$  – вміст горючих компонентів в продуктах спалювання палива.

$$q_3 = \frac{3020 \cdot \text{CO}' + 2580 \cdot \text{H}_2' + 8550 \cdot \text{CH}_4'}{P} \cdot h, \quad (1.4)$$

Розрахунки залежності відносних втрат  $q_2$  і  $q_3$ , а також їхньої суми  $q$  від коефіцієнта витрати повітря  $\alpha$  (рисунок 1.7) виконані для заданого значення  $t_{\text{уг}} = 150$  °С.

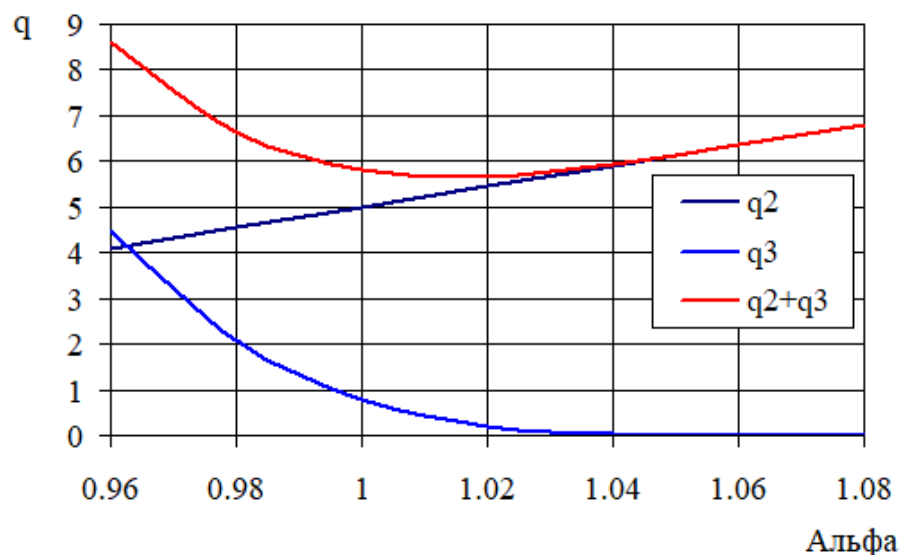


Рисунок 1.7 – Залежність відносних втрат від коефіцієнта надлишку повітря

Наведений вище аналіз залежності показує, що оптимальне значення  $\alpha$  з точки зору мінімальної величини втрат  $q_2 + q_3$  не залежить від  $t_{\text{уг}}$ , оскільки залежність  $q_2(\alpha)$  лінійна за  $\alpha$ , а  $q_3(\alpha)$  не залежить від  $t_{\text{уг}}$ . Таким чином, рівність похідної  $d(q_2 + q_3)/d\alpha$  нулю досягається при тому ж значенні  $\alpha$ .

Наприклад, на рисунку 1.7 можна побачити, що рівність нулю похідної  $d(q_2 + q_3)/d\alpha$  досягається при значеннях  $\alpha = 1,01 \dots 1,03$ .

Припустимі значення концентрацій  $\text{H}_2^{\text{доп}}$ ,  $\text{CO}^{\text{доп}}$  і  $\text{O}_2^{\text{доп}}$ .

$$\begin{aligned} \text{H}_2^{\text{доп}} &= 0,011 \text{ об.}\%, \\ \text{CO}^{\text{доп}} &= 0,117 \text{ об.}\%, \\ \text{O}_2^{\text{доп}} &= 0,757 \text{ об.}\%. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Рішення задачі мінімізації узагальненого квадратичного критерію оптимального по  $\alpha$  режиму горіння, що врахує обмеження на припустимі втрати з хімічним недопалом записується наступним чином

$$I = \sqrt{(I_E - I_{E0})^2 + (I_T - I_{T0})^2} \rightarrow \min_{\alpha}, \quad (1.6)$$

де  $I_E$ ,  $I_T$  – відповідно, економічний і екологічний (токсичний) приватні критерії якості процесу горіння;

$I_{E0}$ ,  $I_{T0}$  – значення приватних критеріїв в точці оптимального режиму процесу горіння.

Приклад розв'язання задачі пошуку оптимального режиму процесу горіння і розрахованого узагальненого критерію (1.6) приведений на рисунку 1.8.

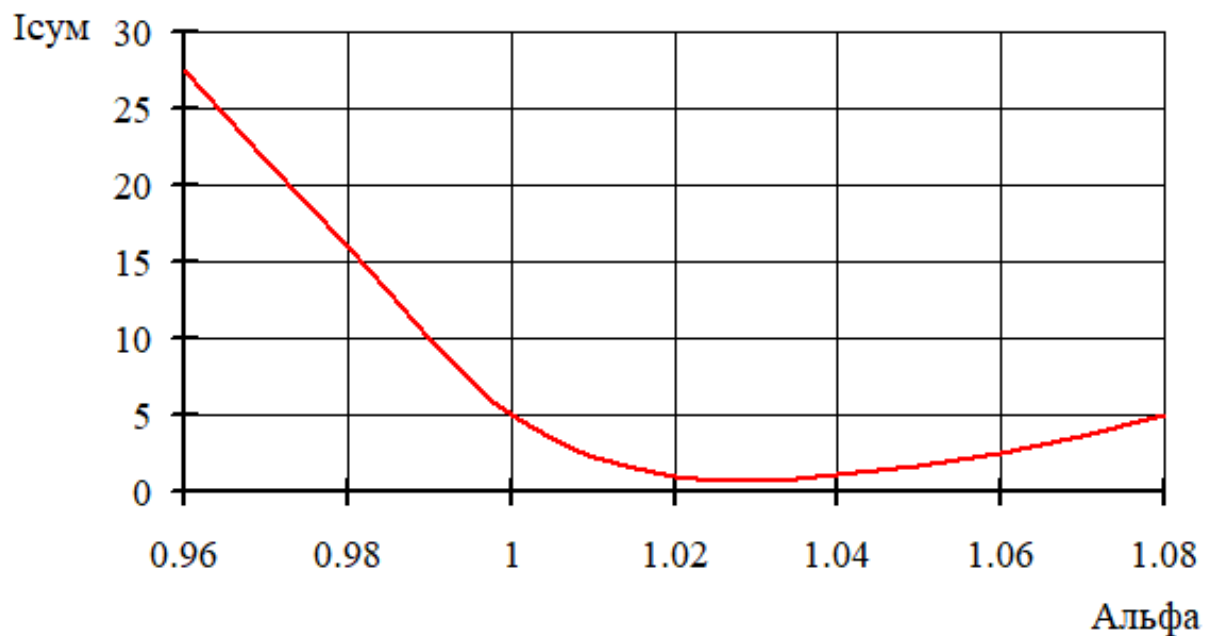


Рисунок 1.8 – Залежність узагальненого критерію оптимізації від коефіцієнта надлишку повітря в топці

Аналіз залежності квадратичного узагальненого критерію від коефіцієнта надлишку повітря в топці котла  $\alpha$ , розрахованого для горіння природного газу в повітрі, показує, що область припустимих значень  $\alpha = 1,02 \dots 1,04$  істотно звужується порівняно з загальновідомим керуванням лише із урахуванням економічності процесу [3]. Цей критерій забезпечує компромісне рішення, найбільш чутливе до змін  $\alpha$  і найбільш близьке до «ідеальної» точки  $I_0$ , тобто на межі недопалу.

### 1.5.3 Вибір принципової схеми регулювання процесу горіння в котлі

Для більш точного регулювання процесу горіння палива в котлі необхідно контролювати концентрацію всіх компонентів димових газів, для яких розраховані норми  $I_E$  і  $I_T$  ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ ), але в даній кваліфікаційній роботі враховуються схеми регулювання ефективності спалювання палива за допомогою сигналів за концентрацією  $CO$ . Тобто процес горіння регулюється на межі хімічного недопалу.

Принципова схема регулювання показана на рисунку 1.9.

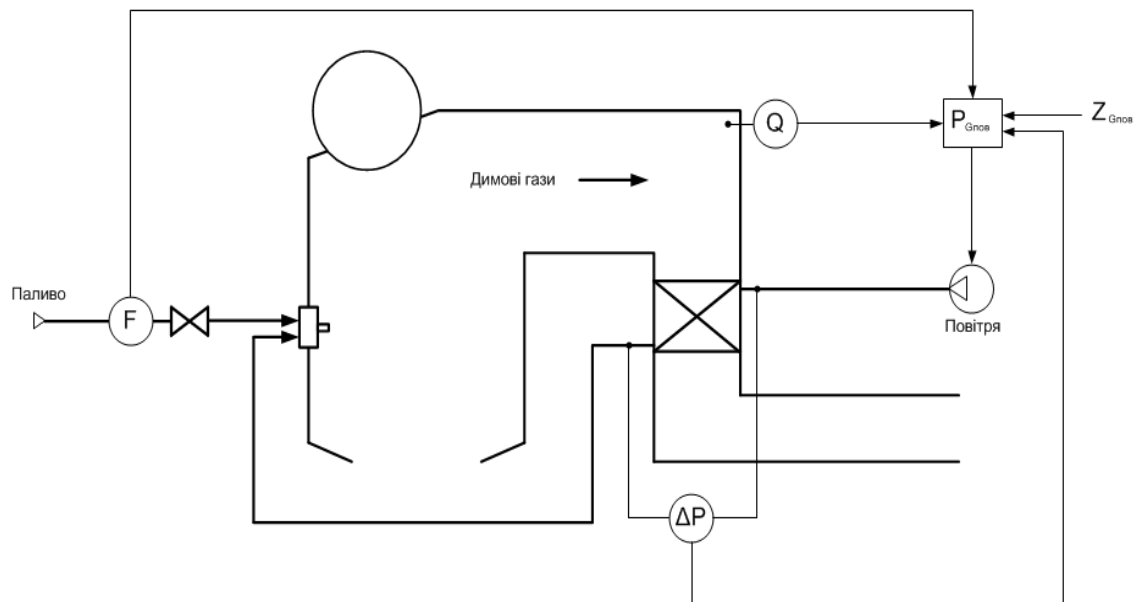


Рисунок 1.9 – Принципова схема регулювання процесу горіння в топці котла

З рисунку 1.9 видно, що на регулятор повітря подаються три сигнали від датчиків: сигнал витрати палива на пальник, сигнал витрати повітря у вигляді різниці тисків до і після повітрянагрівача та сигнал концентрації CO в димових газах. Регулювання процесу горіння палива здійснюється шляхом впливу на електропривод дутьового вентилятора зміною частоти обертання робочого колеса вентилятора.

## 1.6 Основні способи управління продуктивністю вентилятора

1.6.1. *Засувки на виході.* Засувка забезпечує управління подачею шляхом зміни гідравлічного опору газового каналу. Коли засувка закрита, величина подачі зменшується, а тиск перед клапаном збільшується. Коли гідравлічний опір труби збільшується, клапан змушує вентилятор працювати при більш високому протитиску, знижуючи продуктивність. Оскільки вентилятори працюють при високому протитиску, потужність, споживана з мережі, суттєво не зменшується, а коефіцієнт корисної дії (ККД) установки зменшується.

Вентилятор, який працює далеко від точки максимальної ефективності, збільшує витрати на експлуатацію та технічне обслуговування.

1.6.2. *Направляючі апарати на вході.* Направляючі апарати частіше використовуються для відцентрових вентиляторів, ніж для осьових. Вони змінюють профіль потоку газу, що надходить у вентилятор. Направляючий апарат створює вихор, який обертається в тому ж напрямку, що і лопать вентилятора. Ці вихори, обертаючись вперед, зменшують кут атаки між газом, що надходить, і лопатями вентилятора. Це зменшує навантаження на вентилятор, а також знижує тиск подачі.

Коли жорсткість вхідного вихору змінюється, направляючий пристрій значно змінює характеристики вентилятора. Направляючий пристрій може підвищити ефективність вентилятора, оскільки він може зменшити як кількість газу, що подається, так і навантаження. Така система дуже ефективна, коли потрібно подавати 80...100% від максимальної кількості повітря. При меншій подачі знижується їх ефективність.

1.6.3. *Зміна кута нахилу лопаток осьового вентилятора.* Зменшення кута атаки зменшує як подачу, так і навантаження на двигун. Цей метод дозволяє підтримувати досить високий ККД вентилятора в робочому діапазоні і знизити початкові механічні навантаження. Недоліком цього способу є складність його реалізації. Механізм регулювання кута нахилу лопатей заклинює, точність регулювання знижується, і з часом він може повністю вийти з ладу, особливо якщо знаходиться в зоні гарячого або агресивного середовища. Якщо продуктивність знижується менш, ніж наполовину від максимальної, таке регулювання значно знижує ККД двигуна.

1.6.4. *Зміна частоти обертання механізму.* Найбільш ефективним способом зробити це є частотно-регульований електропривод на основі перетворювача частоти.

На рисунку 1.10 показана залежність енергоспоживання від налаштування продуктивності вентиляторного механізму для різних методів управління.

Через особливості механізму вентилятора двигун повинен долати значний момент інерції вентилятора при запуску та гальмуванні, тому в некерованому електроприводі він вибирається зі значним завищенням потужності, щоб

забезпечити більший пусковий момент, але в подальшому він буде працювати в тривалому режимі S1.

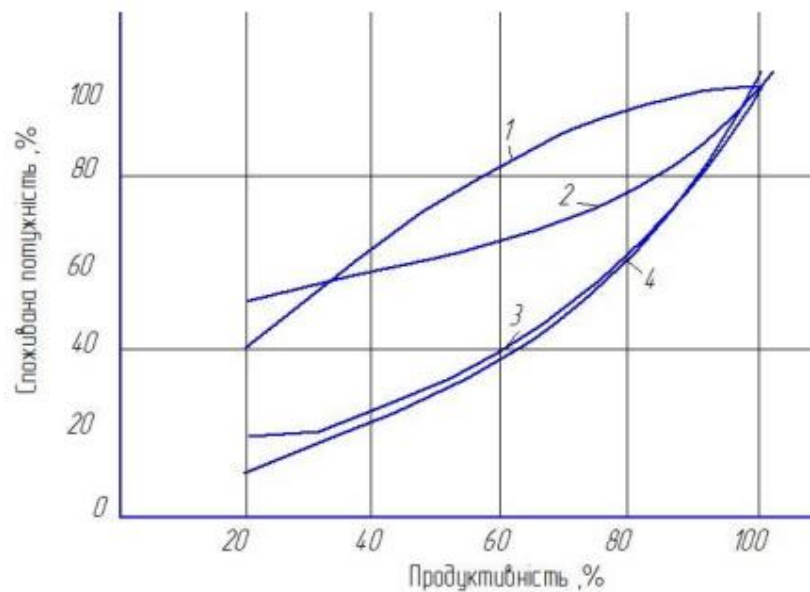


Рисунок 1.10 – Залежність споживаної потужності вентилятора від продуктивності 1 – регулювання засувкою; 2 – з направляючими апаратами на вході; 3 – зміною кута нахилу лопатей; 4 – використання частотно-регульованого електропривода

Запуск двигуна механізм вентилятора зустрічається рідко, тому в більшості випадків двигун недовантажений, а енергетична ефективність низькою. Також при безпосередньому пуску виникає явище «удару» пусковим струмом, що скорочує термін служби механізму.

Найбільш вигідним з точки зору енергоспоживання є регулювання частоти обертання приводного двигуна за допомогою перетворювача частоти.

Використання асинхронних електроприводів з частотним регулюванням дозволяє знизити потужність встановленого двигуна вентилятора, забезпечити енергоефективний контроль технологічних параметрів (продуктивності, тиску) і уникнути втрат через перебої в роботі засувки або надлишкової подачі. Завдяки широкому діапазону регулювання частоти ефективність роботи вентилятора залишається практично постійною. Крім того, гарантується економія енергії, плавний запуск і зупинка приводного механізму, що знижує пусковий струм

двигуна, збільшує тривалість безаварійної роботи всього об'єкта, виключає можливість гідравлічного удару в системі.

Якщо котел завантажений не повністю, визначимо можливу економію енергії при використанні електроприводу вентилятора з частотним регулюванням. Споживана потужність двигуна  $P$  залежить від продуктивності вентилятора  $Q$ , де  $P = F(Q)$ , яка пропорційна кубу частоти обертання двигуна  $Q \sim \omega^3$ .

Таким чином, можна припустити, що споживана потужність також залежить від куба швидкості обертання двигуна  $P = f(\omega^3)$ .

Порівняємо два способи регулювання продуктивності вентилятора: з використанням засувки і частотного регулятора швидкості. При зниженні подачі до 60% від номінального значення споживаної потужності істотно не змінюється при регулюванні засувкою.

При частотному регулюванні швидкість обертання дорівнює:

$$\omega = \omega_H \sqrt[3]{\frac{Q}{Q_H}} = \omega_H \sqrt[3]{\frac{0,6}{1}} = 0,84, \quad (1.7)$$

тобто, вона зменшиться в 1,19 рази.

Споживана потужність дорівнюватиме:

$$P = f(\omega^3) = 0,6 P_H \quad (1.8)$$

тобто вона зменшується в 1,7 рази.

Щомісячна економія при 24-годинній щоденній роботі котла визначається за формулою.

$$E = (P_1 - P_2) \cdot C \cdot T, \quad (1.9)$$

де  $E$  – економія в місяць (рік), грн.;

$P_1$  – споживана потужність до модернізації, кВт;

$P_2$  – споживана потужність після модернізації, кВт;

$C$  – ціна електроенергії, грн/кВт·год.

$T$  – час роботи в місяць, год.

Отже, при використанні частотно-регульованих електроприводів для управління роботою повітряних вентиляторів котлів з неповним навантаженням можна отримати значний економічний ефект, особливо з огляду на постійне зростання цін на електроенергію. Крім того, таке рішення дозволяє трохи знизити встановлену потужність електродвигуна, продовжити термін служби і поліпшити регульовальні характеристики самого котла. Комбіноване використання електроприводів вентиляторів з частотним регулюванням дозволяє здійснювати автоматичне управління котлоагрегатом, що оптимізує умови спалювання палива і максимізує енергоефективність.

### 1.7 Розрахунок потужності привода дутьового вентилятора

Повітряний вентилятор типу ВДН-12.5-1000 встановлюється на котлі ДКВР-20-13 заводом-виробником. Вибір розміру вентилятора заснований на аеродинамічному розрахунку параметрів дуття з використанням аеродинамічних характеристик вентилятора, показаних на рисунку 1.11.

Для вентиляторів споживана потужність на валу визначається за наступним рівнянням:

$$N = \frac{Q_p \cdot H_p}{3600 \cdot 101,3 \cdot \eta_v}, \quad (1.4)$$

де  $Q_p$  – розрахункова продуктивність на виході вентилятора,  $Q_p = 20000 \text{ м}^3/\text{год}$ ;

$H_p$  – розрахунковий напір на виході вентилятора,  $H_p = 268 \text{ кгс}/\text{м}^2$ ;

$\eta_v$  – ККД вентилятора при  $Q_p, H_p = 77 \%$ .

Залежно від режиму роботи котла продуктивність дутьового вентилятора типу ВДН-12,5-1000 може коливатися в межах  $9000 \dots 20000 \text{ м}^3/\text{год}$ . Визначимо потужність приводу вентилятора, встановленого на котлі ДКВР-10-13, для режиму максимальної потужності відповідно до виразу (1.4). За аеродинамічною характеристикою (рисунок 1.17) визначимо параметри робочої точки ( $Q_p, H_p$ ):  $Q_p = 20000 \text{ м}^3/\text{год}$ ;  $H_p = 2680 \text{ Па} = 268 \text{ кг}/\text{м}^2$ ;  $\eta = 0,77$ .

$$N = \frac{20000 \cdot 268}{3600 \cdot 101,3 \cdot 0,77} = 19,1 \text{ кВт.}$$

Визначення потужності вентилятора за графіком аеродинамічної характеристики (рисунок 1.11) дає приблизно такі ж значення. Таким чином, вентилятор ВДН-12,5-1000 забезпечить максимальну витрату повітря в пальники котла при потужності електропривода, більшій 19 кВт.

Основні технічні характеристики вентилятора ВДН-12,5-1000 наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики вентилятора ВДН-12,5-1000

Найменування параметра	Одиниця виміру	Величина або характеристика
Тип вентилятора	-	ВДН-12,5-1000 – відцентровий одностороннього всмоктування
Діаметр робочого колеса	мм	1250
Продуктивність, до	м <sup>3</sup> /год	26600
Повний тиск	Па	2700
Температура, до	°С	200
Частота обертання	об/хв	1000
Потужність на валу	кВт	22
Максимально допустима частота обертання	об/хв	1300
Максимальний ККД	%	83
Шум нагнітання	дБ	102

### 1.8 Опис і вимоги до відцентрового дутьового вентилятора типу ВДН-12,5-1000

Відцентровий повітряний вентилятор типу ВДН-12,5-1000 одностороннього всмоктування призначений для комплектації стаціонарних парових водогрійних котлів і подачі повітря в топку газомазутних котлів.

На рисунку 1.12 показана конструкція установки з відцентровим вентилятором ВДН-12,5-1000.

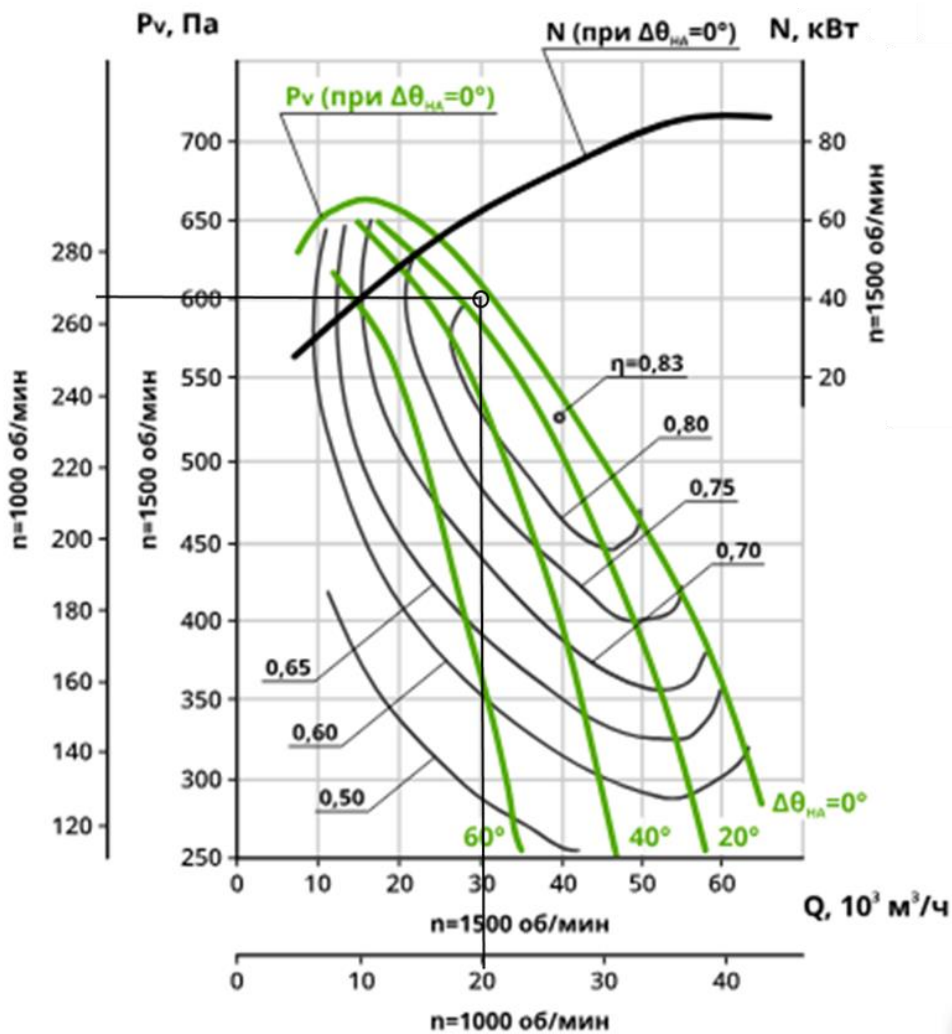


Рисунок 1.11 – Аеродинамічні характеристики вентилятора ВН-12,5-1000

Вентилятори ВН призначені для тривалої роботи в приміщенні і на відкритому повітрі в умовах помірного клімату. Максимально допустима температура на вході вентилятора при якій вентилятор може включатися, не менше  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ , якщо він працює в режимі димососа, температура не повинна перевищувати  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Вентилятор ВН-12.5-1000 (рисунок 1.12) складається з таких компонентів, як корпус равлика 1, лопать (робоче колесо) 2, диск 3, направляючий пристрій 4, впускний патрубок 5, робоче колесо 6 і електродвигун 7.

Робоче колесо вентилятора прикріплене до валу електродвигуна, тобто в кінематичній схемі вентилятора відсутній вузол для зміни обертів робочого колеса.

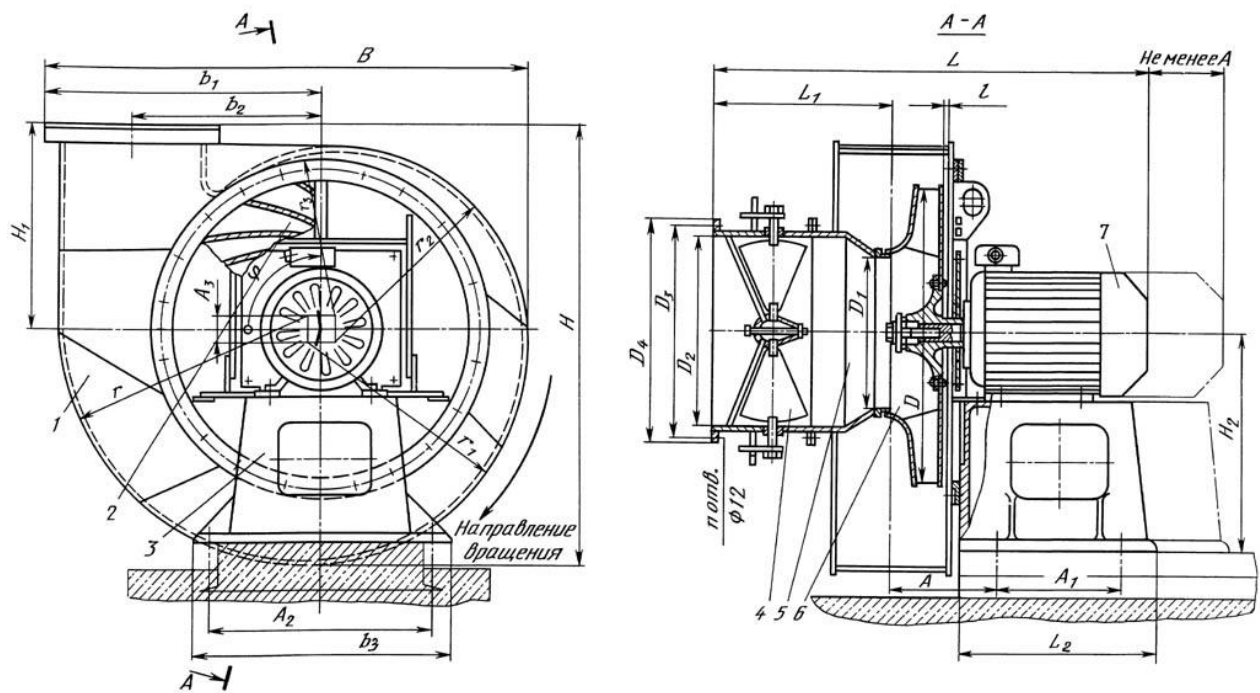


Рисунок 1.12 – Установка з відцентровим вентилятором ВН-12,5-1000

Робоче колесо являє собою пристрій, що складається з диска 2 з привареною або заклепаною лопатою 6, кінці якої з'єднані у вигляді кільця. До диска приварена втулка, а диск закріплений на валу двигуна. Коли робоче колесо вентилятора обертається, повітря подається в центр через трубку, і через відцентрову силу він відкидається від центру до периметру і закачується в трубку. У центрі робочого колеса утворюється вакуум, через який безперервно подається повітря.

За допомогою направляючого пристрою, встановленого перед вентилятором, регулюється подача повітря в топку. Направляючий пристрій виконаний з металевих труб з фланцями. Поворотна лопать знаходиться всередині цього сопла. Ці поворотні лопаті мають загальний поворотний механізм. Цей механізм дозволяє лопатям обертатися одночасно під одним кутом.

Вимоги до електроприводу вентилятора:

- Електропривод повинен забезпечувати роботу котлоагрегату відповідно до заданого режиму роботи;
- Управління і моніторинг стану обладнання повинні здійснюватися з 2-х пультів оператора, розташованих в безпосередній близькості від лінії;

- Вся інформація повинна бути представлена оператору на дисплеї панелі оператора в зручному для читання вигляді;
- Система повинна відстежувати і відображати режим роботи котлоагрегату;
- Оператор повинен мати можливість змінювати робочі параметри котлоагрегату;
- У разі збою в роботі котлоагрегату необхідно подати відповідний сигнал тривоги на пульт оператора.

Технічні вимоги до живлення електроприводу вентилятора:

- Номінальна напруга трифазного джерела живлення 380 В  $\pm 10\%$ ;
- Номінальна напруга однофазного ланцюга управління 220 В  $\pm 10\%$ ;
- Частота мережі електроживлення становить 50 Гц  $\pm 1\%$ ;
- Живлення контролера і станції оператора повинно здійснюватися від джерела безперебійного живлення.

Вимоги до конструкції дутьового вентилятора:

- Системне обладнання повинно працювати в діапазоні температур навколишнього середовища 0...40°C;
- Цифрове управління, за винятком пульта оператора, має бути розміщено в металевій шафі зі ступенем захисту не нижче IP54;
- Кабель підключається до шафи управління знизу;
- До електричної шафи повинна бути передбачена можливість підключення зовнішньої ланцюга захисного заземлення.

Використання частотно-регульованих приводів дозволяє вирішити проблему узгодження робочих параметрів і енергоспоживання тягового механізму зі зміною навантаження котла.

При модернізації електроприводу вентилятора необхідно домогтися наступного:

- 1) зниження енергоспоживання;
- 2) зниження експлуатаційних витрат;
- 3) забезпечення плавного протікання перехідних процесів, особливо запуску і зупинки, без динамічних і ударних явищ електродвигуна і вентилятора;

- 4) підтримання тиску і витрати повітря на заданому рівні;
- 5) автоматичне відключення вентилятора в разі аварії;
- 6) Збільшення продуктивності вентилятора (збільшення ККД).

Висновки по розділу: 1. Сучасні системи управління котлом забезпечують роботу вентилятора в замкнутому контурі, що вимагає аналізу перехідних процесів і моделювання. 2. Схема управління вентилятором передбачає установку перетворювача частоти, вибір якого залежить від потужності і режиму роботи двигуна.

## 2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДА

### 2.1 Вибір двигуна електропривода

Номінальна потужність приводного двигуна повинна бути більше або дорівнювати потужності на валу вентилятора у всіх можливих технічних режимах роботи. У режимі регулювання продуктивності вентилятор споживає номінальну потужність на валу при роботі в робочій точці, де  $N_{\text{вал}} = 19,1$  кВт (формула 1.4).

В якості приводного електродвигуна ми вибираємо найближчий асинхронний електродвигун (АД) з короткозамкненим ротором типу АИР200L6, номінальна потужність якого становить 22 кВт. Цей двигун задовольняє роботі вентилятора у всій області аеродинамічних характеристик при нормальних умовах. Зовнішній вигляд двигуна показаний на рисунку 2.1, технічні характеристики електродвигуна узагальнені в таблиці 2.1.

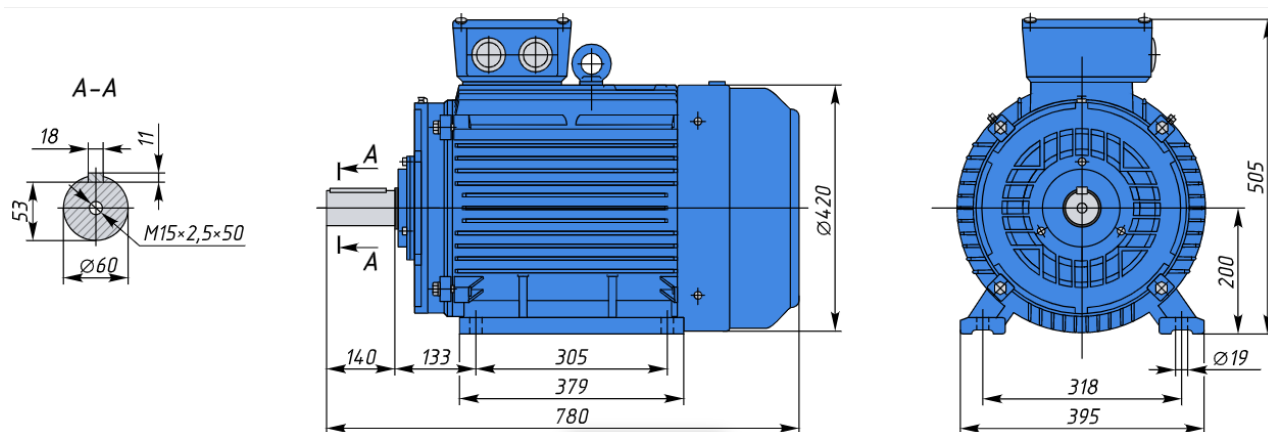


Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд електродвигуна АИР200L6 (виконання ІМ2081)

Таблиця 2.1 – Довідкові технічні дані електродвигуна АИР200L6

$n_0$ , об/хв	$U_{1H}$ , В	$P_{\text{дв.н.}}$ кВт	При номінальному навантаженні			$J_{\text{дв.н.}}$ , кг·м <sup>2</sup>
			$S_H$ , %	$\cos\varphi_H$	$\eta_H$ , %	
980	380	22	2,3	0,83	91,5	0,25

$m_n = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_n}$	$m_k = \frac{M_{\text{макс}}}{M_n}$	$m_m = \frac{M_{\text{мін}}}{M_n}$	$k_{i.дв.} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_n}$	Ступінь захисту
2,0	2,1	1,0	7,0	IP 55

## 2.2 Розрахункове визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

Параметри схеми заміщення для математичної моделі динаміки асинхронного двигуна повинні бути визначені заздалегідь. Поряд з різними експериментальними способами існують методики розрахунку параметрів схеми заміщення АД, виходячи з довідкових даних. На рисунку 2.2 показана Т-подібна схема заміщення для однієї фази асинхронного двигуна.

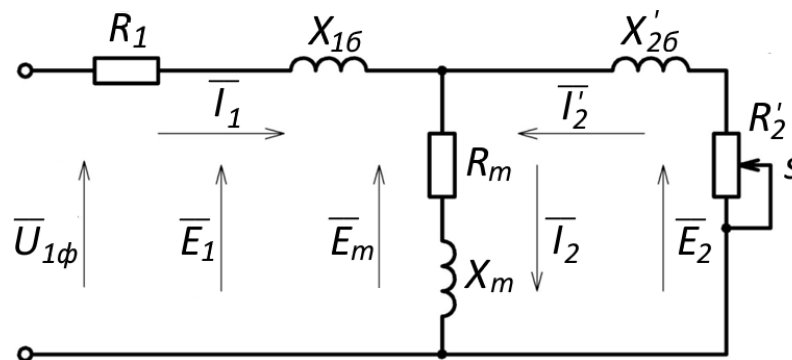


Рисунок 2.2 – Т-подібна схема заміщення для однієї фази асинхронного двигуна

Основні рівняння асинхронного двигуна, що відповідають прийнятій схемі заміщення:

$$\overline{U}_{1\phi} - \overline{E}_m - j \cdot X_1 \cdot \overline{I}_1 + R_1 \cdot \overline{I}_1 = 0,$$

$$\overline{E}_m + j \cdot X'_2 \cdot \overline{I}'_2 + R'_2 \cdot \frac{\overline{I}'_2}{s} = 0,$$

$$\overline{I}_1 + \overline{I}'_2 - \overline{I}_2 = 0.$$

Векторна діаграма для струмів, ЕРС і напруг, що відповідають вищенаведеним рівнянням, подана на рисунку 2.3.

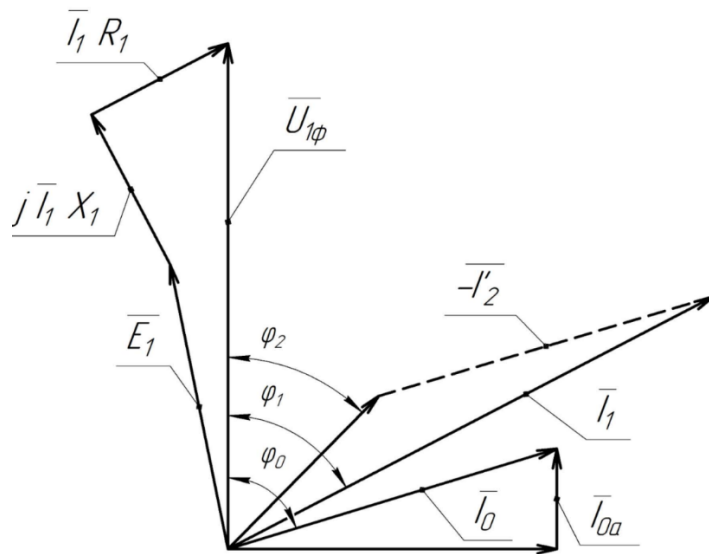


Рисунок 2.3 – Векторна діаграма асинхронної машини

Визначимо параметри Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна за його довідковими даними.

Синхронна кутова частота обертання двигуна

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,72 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номінальна кутова швидкість обертання двигуна

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 980}{30} = 102,62 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номінальне ковзання

$$s_H = 1 - \frac{f_H}{f_0} = 1 - \frac{980}{1000} = 0,02$$

Номинальний момент двигуна

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{22000}{103,62} = 214,38 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальна фазна напруга і номінальний фазний та лінійний струми статора

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$$

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{\text{фн}} \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{22000}{3 \cdot 220 \cdot 0,83 \cdot 0,915} = 44,0 \text{ А}.$$

Струм фази статора при частковому завантаженні

$$I_{1p'} = \frac{p' \cdot P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos\varphi_{p'} \cdot \eta_{p'}} = \frac{0,75 \cdot 22000}{3 \cdot 220 \cdot 0,78 \cdot 0,88} = 36,52 \text{ А}$$

де  $\eta_{p'} = 0,88$  – ККД при частковому завантаженні;

$\cos\varphi_{p'} = 0,78$  – коефіцієнт потужності при частковому завантаженні;

$p' = P/P_{\text{н}} = 0,75$  – коефіцієнт завантаження двигуна;

Коефіцієнт потужності при частковому завантаженні  $p' = 0,75$  значно відрізняється від коефіцієнта потужності при номінальному навантаженні, причому ця відмінність у значній мірі залежить від потужності двигуна і для відомих серій асинхронних двигунів з достатньою для практики точністю підпорядковується залежності, що наведена на рисунку 2.4.

Критичне ковзання

$$s_k = s_{\text{н}} \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - (1 - 2 \cdot s_{\text{н}} \cdot \beta \cdot (m_k - 1))}}{1 - 2 \cdot s_{\text{н}} \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} =$$
$$= 0,02 \cdot \frac{2,1 + \sqrt{2,1^2 - (1 - 2 \cdot 0,02 \cdot 1,5 \cdot (2,1 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,02 \cdot 1,5 \cdot (2,1 - 1)} = 0,085$$

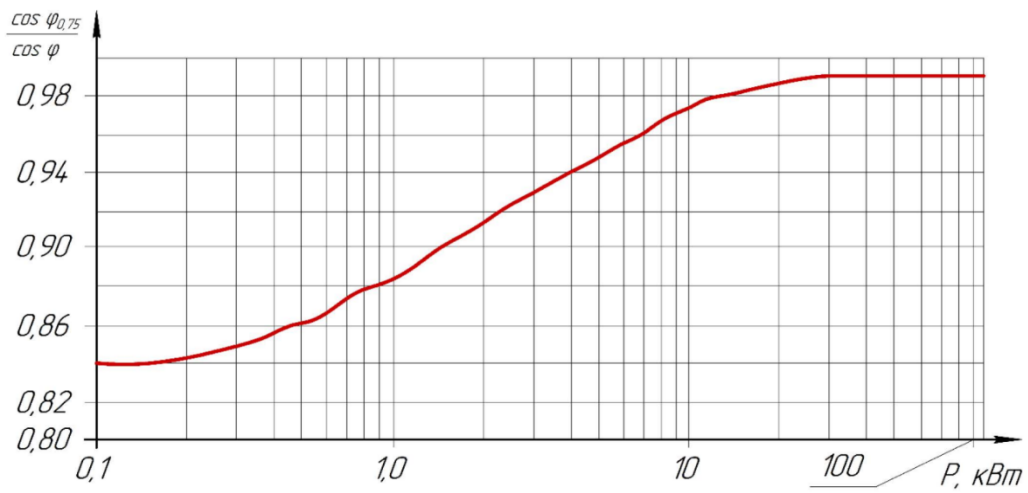


Рисунок 2.4 – Залежність  $\frac{\cos \varphi_{0.75}}{\cos \varphi_n}$  від потужності асинхронного двигуна

Струм холостого ходу асинхронного двигуна

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p'}^2 - (I_{1\phi H} \cdot p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}{1 - (p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{35,52^2 - (44,01 \cdot 0,75 \cdot (1 - 0,02) / (1 - 0,75 \cdot 0,02))^2}{1 - (0,75 \cdot (1 - 0,02) / (1 - 0,75 \cdot 0,02))^2}} = 24,0 \text{ A.}$$

Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора:

Визначаємо значення ряду проміжних коефіцієнтів:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\phi H}} = 1 + \frac{24,0}{2 \cdot 7,0 \cdot 44,01} = 1,039,$$

$$R_2' = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot k_{\max} \cdot P_H \cdot C_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_K}\right)} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,02)}{2 \cdot 2,1 \cdot 22000 \cdot 1,039^2 \cdot (1,5 + 1/0,0849)} = 0,1068 \text{ Ом}$$

Активний опір статора в номінальному режимі

$$R_1 = R_2' \cdot \beta \cdot C_1 = 0,1068 \cdot 1,5 \cdot 1,039 = 0,1665 \text{ Ом}$$

Визначимо параметр  $\gamma$ , який дозволяє знайти індуктивний опір короткого замикання в номінальному режимі:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = \sqrt{1/0,0849 - 1,5^2} = 11,684.$$

Опір короткого замикання

$$X_{кн} = R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 0,1068 \cdot 11,684 \cdot 1,039 = 1,297 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір розсіювання статорної обмотки

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,42 \cdot 1,297 = 0,5447 \text{ Ом}$$

Індуктивність розсіювання обмотки статора

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{0,5447}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0017 \text{ Гн}$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки ротора, приведений до обмотки статора, в номінальному режимі

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{кн}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{1,2969}{1,0389} = 0,7240 \text{ Ом}$$

Індуктивність розсіювання роторної обмотки, що приведена до статорної

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{0,7240}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0023 \text{ Гн}$$

ЕРС гілки намагнічування, що наведена потоком повітряного зазору в обмотці статора при номінальному режимі

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\phi_H} \cdot \cos\varphi - R_1 \cdot I_{1\phi_H})^2 + (U_{1\phi_H} \cdot \sin\varphi - X_{1\sigma} \cdot I_{1\phi_H})^2} =$$

$$= \sqrt{(220 \cdot 0,83 - 44,01 \cdot 0,1665)^2 + (220 \cdot 0,5778 - 44,01 \cdot 0,5447)^2} = 202,76 \text{ В}$$

Індуктивний опір намагнічування

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{202,46}{24,0} = 8,448 \text{ Ом}$$

Результуюча індуктивність гілки намагнічування

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{8,449}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0269 \text{ Гн}$$

Значення номінального потокозчеплення

$$\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot I_M = \sqrt{2} \cdot 24,0 \cdot 0,269 = 0,9127$$

Еквівалентна індуктивність обмотки статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_\mu = 0,0017 + 0,0269 = 0,0286 \text{ Гн}$$

Еквівалентна індуктивність обмотки ротора

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_\mu = 0,0023 + 0,0269 = 0,0292 \text{ Гн}$$

Коефіцієнт розсіювання

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 + L'_2} = 1 - \frac{0,0269^2}{0,0286 + 0,0292} = 0,9875.$$

Параметри схеми заміщення зведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри схеми заміщення електродвигуна АИР200М6

$R_l, \text{ Ом}$	$X_{1\sigma}, \text{ Ом}$	$L_{1\sigma}, \text{ Гн}$	$X_{\mu}, \text{ Ом}$	$L_{\mu}, \text{ Гн}$	$R'_{2'}, \text{ Ом}$	$X'_{2\sigma}, \text{ Ом}$	$L_{2\sigma}, \text{ Гн}$	$X_{кн}, \text{ Ом}$
0,1665	0,5447	0,0017	8,448	0,0269	0,1068	0,7240	0,0023	1,2970

### 2.3 Вибір перетворювача частоти

При впровадженні енергозберігаючої системи регульованого електроприводу виникає складне завдання, яке полягає у вірному виборі перетворювача частоти (ПЧ) для живлення двигуна.

Більшість сучасних перетворювачів частоти включають енергозберігаючі функції управління, які гнучко регулюють напругу і частоту живлення двигуна при зміні навантаження. За допомогою цього елемента керування в деяких режимах можливо заощадити до 30% споживаної потужності. Економія досягається за рахунок зниження втрат двигуна та плавного пуску. Режим енергозбереження дуже важливий для механізмів, які працюють часто зі зниженим навантаженням.

Конвеєри, насоси та вентилятори є прикладами таких механізмів. У багатьох випадках асинхронні двигуни вибираються зі значним запасом потужності і часто працюють з неповними навантаженнями, тому можна очікувати високих показників ефективності широкого використання енергозберігаючих перетворювачів частоти.

При роботі перетворювача частоти з одним двигуном він може бути обраний відповідно до наступних параметрів:

1) Номінальна потужність в кВт повинна бути більше або дорівнює номінальній потужності двигуна, кВт;

1) Номінальний тривалий струм ПЧ повинен бути більше (або дорівнювати) фактичному тривалому струму, споживаному двигуном

$$I_{\text{вих.пч}} \geq I_{\text{IH}} \cdot \quad (3.1)$$

Для управління вентилятором виберемо перетворювач частоти Delta VFD-B, універсальний перетворювач частоти загального призначення потужністю 30 кВт і напругою 380 В 3 фази.

Частотний перетворювач Delta VFD-B може використовуватися для регулювання електроприводів систем вентиляції великих будівель, насосів каналізаційних систем, вентиляторів та димососів котлів, кранового обладнання, високошвидкісних пилок, компресорів, ліфтів, ескалаторів тощо.

Основні відмінні риси перетворювача частоти Delta VFD-B:

- Вихідна частота: 0...400 Гц;
- Функція регулювання  $U/f$ ;
- Основні та додаткові джерела розподілу частоти;
- Автоматичне покрокове управління;
- Автоматична компенсація крутного моменту і ковзання;
- Скалярне та векторне управління розімкнутим і замкнутим контурами;
- Автоматичне тестування двигуна.

Зовнішній вигляд перетворювача частоти Delta VFD-B показаний на рисунку 2.5. Технічні характеристики перетворювача частоти Delta VFD-B наведені в таблиці 2.3.



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд перетворювача частоти Delta VFD-B

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики перетворювача частоти Delta VFD-B

Назва		Значення
Клас напруги (В)		380
Модель		VFD300C43A/E
Номінальна потужність двигуна, кВт		30
Вихід	Повна потужність, кВт	30
	Ном. вихідний струм, А	80
	Вихідна напруга, В	3-х фазна
	Вихідна частота, Гц	0,1...400
	Несуча частота ШІМ, кГц	1...6 кГц (20...55 кВт)
Вхід	Номінальний вхідний струм, А	80
	Напруга частоти, Гц	3 фази, 380...480В, 50/60 Гц
	Допустиме відхилення напруги	+/- 10 % (342...528 В)
	Допустиме відхилення частоти	+/- 5 % (47...63 Гц)
Охолодження		Вентилятор
Вага		50

## 2.4 Опис роботи перетворювача частоти

В даний час перетворювачі частоти виготовляються за схемою з автономними перетворювачами напруги. Це пов'язано з появою повністю керованих силових напівпровідникових приладів – IGB-транзисторів і замикаючих тиристорів. Типова схема електроприводу з інвертором напруги з повністю керованими приладами показана на рисунку 2.6.

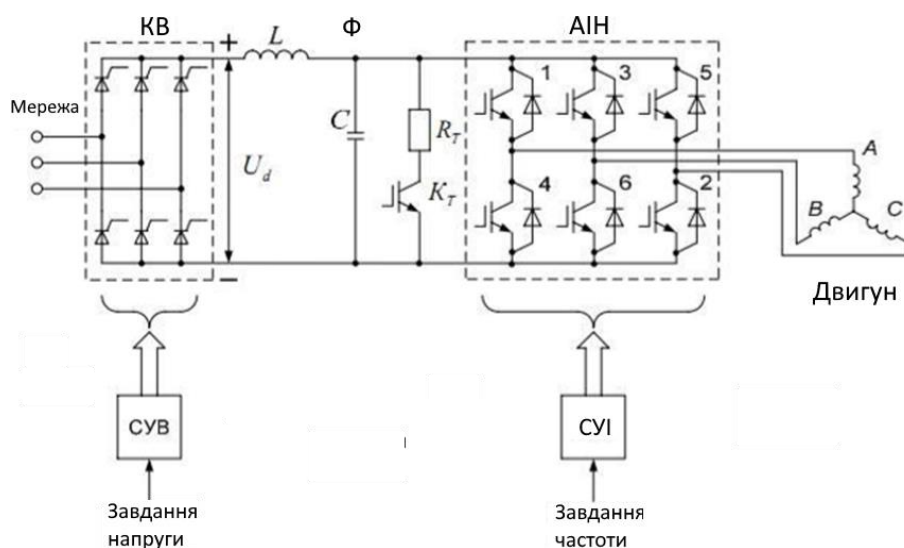


Рисунок 2.6 – Схема частотно-керованого електропривода

Перетворювач частоти складається з керованого випрямляча КВ, LC-фільтра, автономного інвертора АІН, системи управління випрямлячем СУВ і автономної системи управління інвертором СУІ.

У КВ в якості вентиля використовується повністю або неповністю тиристори високої потужності, а в АІН використовуються в якості вентилів VT1...VT6 потужні польові MOSFET-транзистори або біполярні IGBT-транзистори.

## **2.5 Підключення ПЧ до електроприводу**

1 Підготовка до установки:

а) Переконайтеся, що компоненти приводу: джерело живлення, перетворювач частоти та двигун розраховані на однакову напругу;

б) Зверіться зі схемою підключення обмотки двигуна, перевірити перемички монтажною коробки двигуна. Підключити двигун за схемою «зірка» або «трикутник», яка забезпечує необхідну напругу живлення, не більшу за напругу мережі живлення ПЧ;

в) Перевірити тип, точність і номінал вибраного запобіжника швидкої дії;

г) Перевірити умови навколишнього середовища, в яких передбачається експлуатація приводу.

2 Виконати електричні з'єднання за рисунком 2.7:

Пристаюючи до виконання цього і наступних пунктів, необхідно переконатися в дотриманні правил техніки безпеки. Необхідно відключити джерело живлення, розрядити конденсатор, загальмувати і зафіксувати вал двигуна.

а) Підключити лінію живлення та провід заземлення від двигуна до клеми РЕ перетворювача. Кожен перетворювач заземлюється окремо, і заземлення ланцюгом не допускається. Нейтраль не є заземленням;

б) Підключити виводи фазних обмоток двигуна до відповідних клем;

в) Підключити лінії електропередачі до клем L і N для однофазних мереж і L1, L2 і L3 для трифазних мереж (переконайтеся у відсутності напруги при підключенні).

### 3 Подача напруги живлення:

Ця процедура виконується відповідно до вимог безпеки.

а) Перевірити ще раз надійність і точність монтажу всіх ланцюгів;

б) Відключити всі команди для пуску, старту і роботи;

в) Переконатися, що обертання вала двигуна та механізму не може зашкодити людям або обладнанню;

г) Подати живлення на ПЧ. Вентилятор ПЧ повинен увімкнутися, і дисплей загорітися через кілька секунд. Індикатор «Off» повинен горіти на панелі управління.

### 4 Тестовий запуск у ручному режимі

а) встановити параметри двигуна 1-20, 1-22, 1-23, 1-24, 4-14, 4-18, 3-41, 3-42, відповідно до значень, зазначених на заводській табличці двигуна;

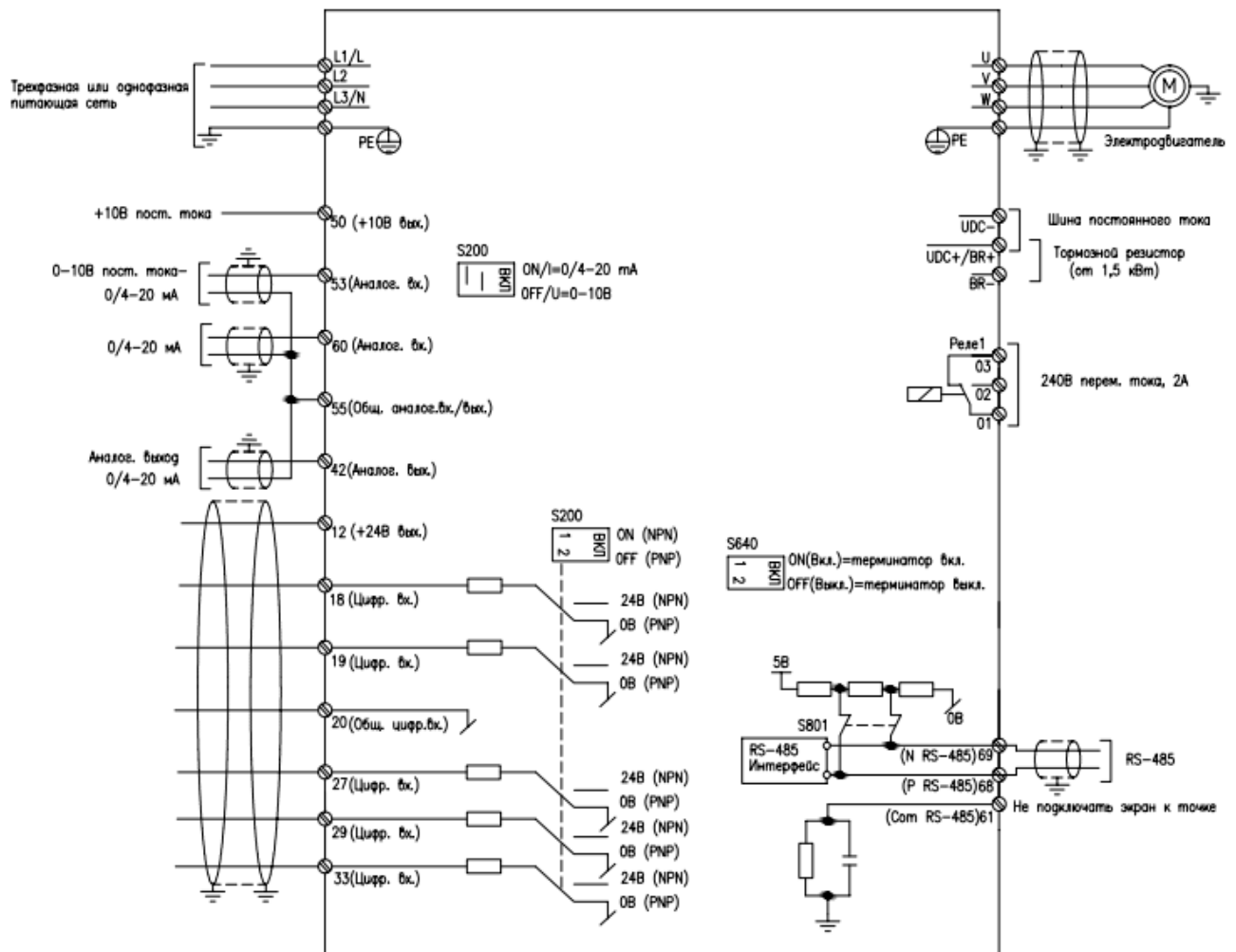


Рисунок 2.7 – Схема електричних з'єднань перетворювача частоти типу VFD

б) Натиснути кнопку «HAND ON» на панелі управління (для екстреного гальмування натисніть «Off»);

в) Встановити бажану швидкість обертання (за допомогою кнопок «Вгору», «Вниз» або потенціометра на панелі);

г) Переконайтеся в правильності напрямку обертання. Якщо напрямок не співпав, то потрібно поміняти місцями дві будь-які фази на ПЧ (наприклад, U-W), лише після повного виключення ПЧ і очікування протягом декількох хвилин.

## 2.6 Вибір закону управління електроприводом на базі ПЧ

Розрізняють два типи систем управління електроприводом на базі ПЧ: з скалярним і векторним законами.

Існує два типи систем управління електроприводом на основі ПЧ: з скалярним і векторним законами.

### 2.6.1 Принцип роботи системи управління зі скалярними законами управління.

Скалярне управління, або  $U/f$ -управління асинхронним двигуном, впливає на зміну частоти обертання двигуна шляхом зміни частоти напруги статора і одночасної зміни модуля цієї напруги.

При  $U/f$ -управлінні частота і напруга функціонують як дві операції управління, звичайно керовані спільно. У цьому випадку частота вважається незалежним фактором, і значення напруги на заданій частоті визначається на основі того, як змінюється тип механічних властивостей приводу при зміні частоти, тобто як змінюється критичний момент двигуна в залежності від частоти.

Для реалізації таких законів регулювання необхідно забезпечити сталість співвідношення  $U/f = \text{const}$ , де  $U$ ,  $f$  – відповідно, напруга і частота напруги на статорі. При постійній перевантажувальній здатності номінальна потужність і коефіцієнт корисної дії двигуна істотно не змінюються у всьому діапазоні регулювання частоти обертання (рисунок 2.8).

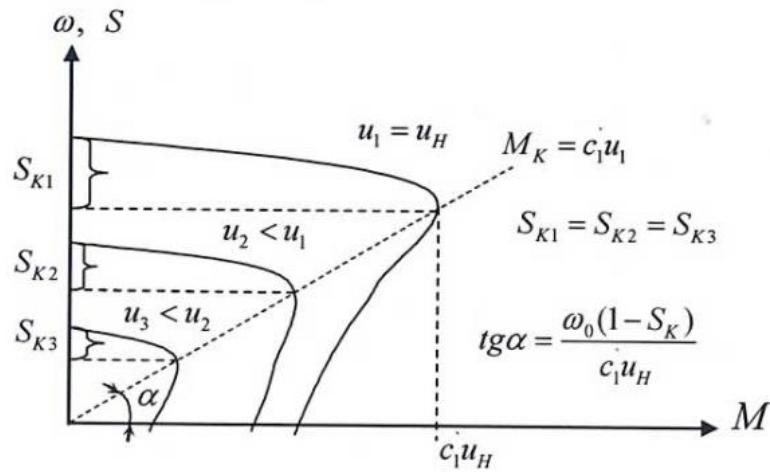


Рисунок 2.8 – Механічні характеристики при  $\frac{U}{f} = const$

До законів  $U/f$ -регулювання відносяться також закони, які пов'язують величину та частоту напруги живлення двигуна:  $U/f = const$ ,  $\frac{U^2}{f} = const$  (рисунок 2.9,а),

$\frac{U}{f^2} = const$  (рисунок 2.9,б) та інші.

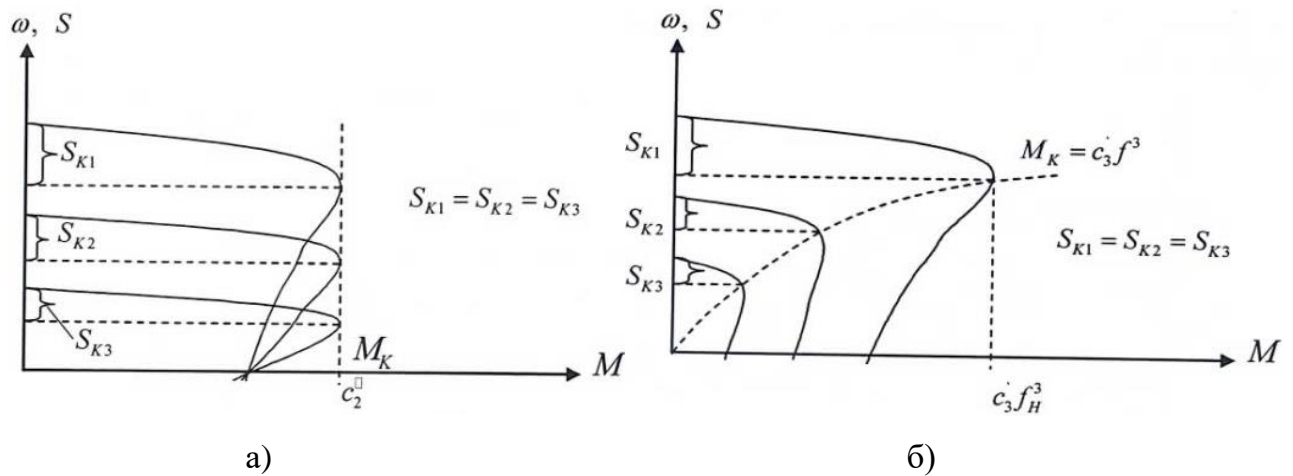


Рисунок 2.9 – Механічні характеристики при а)  $\frac{U^2}{f} = const$ , б)  $\frac{U}{f^2} = const$

Можливість одночасного керування групою електродвигунів є їх перевагою. Скалярне керування застосовується для більшості практичних випадків застосування частотного електропривода з діапазоном регулювання частоти обертання двигуна до 1:40 без використання датчика зворотного зв'язку.

Скалярний алгоритм управління не дозволяє контролювати та регулювати крутний момент двигуна і режим позиціонування. Найбільш ефективними

областями застосування цього методу управління є вентилятори, насоси, конвеєри і т.д., які допускають похибку до 5% для підтримки оборотів.

*2.6.2 Принцип роботи системи управління з векторним керуванням.* Векторне керування – це метод керування асинхронним двигуном, який не тільки генерує гармонічні струми і фазні напруги (скалярне управління), але і забезпечує управління магнітним потоком (потокозчепленням)0 двигуна. Векторне управління засноване на ідеї зв'язку напруги, струму і потокозчеплення як просторових векторів.

Основні принципи частотного управління асинхронними двигунами були розроблені ще в 20-70-х роках минулого століття. В результаті фундаментальних теоретичних експериментів і успіхів в області силової напівпровідникової електроніки і мікропроцесорних систем сьогодні розробляються електроприводи з векторним управлінням, які серійно виробляються виробниками приводів по всьому світу.

За допомогою векторного управління в асинхронному електроприводі в перехідний період можна підтримувати постійне значення потокозчеплення ротора, на відміну від скалярного управління, при якому потокозчеплення ротора в перехідний період змінюється при зміні струму статора і струму ротора, а швидкість зміни електромагнітного моменту зменшується. У приводі з векторним керуванням, де потокозчеплення ротора може підтримуватися постійним, електромагнітний крутний момент змінюється одночасно зі зміною складовою струму статора (аналогія зі зміною моменту при зміні струму якоря в машині постійного струму).

При векторному управлінні використовується математична модель регульованого електроприводу.

Режими векторного управління можна класифікувати наступним чином:

1. Залежно від точності математичної моделі електродвигуна, використовуваної в блоці управління:

– Додаткове уточнення блоком управління параметрів електродвигуна з використанням математичних моделей без вимірювань (використовуються тільки типові дані двигуна, введені користувачем);

– Використання математичних моделей з додатковими уточнюючими вимірюваннями пристроєм для контролю параметрів електродвигуна: активного і реактивного опору статора і ротора, напруги і струму двигуна.

2. Залежно від наявності або відсутності зворотного зв'язку за швидкістю (датчиків швидкості) векторне управління може бути розподілено наступним чином:

– Управління двигуном без зворотного зв'язку за швидкістю – в цьому випадку пристрій управління використовує дані математичної моделі двигуна і значення, отримані шляхом вимірювання струму статора і/або ротора.

– Управління двигуном зі зворотним зв'язком за швидкістю – в цьому випадку пристрій використовує не тільки значення, отримані шляхом вимірювання струму статора і/або ротора електродвигуна (як в попередньому випадку), але і дані про частоту обертання (положення) ротора від датчика. Це дозволяє домогтися більшої точності при вирішенні задач відпрацювання електроприводом завдання швидкості (положення).

Основні закони векторного управління включають:

а. Закон, що гарантує незмінність зв'язку магнітного потоку статора  $\Psi_1$  (тобто  $E_{\text{зовн}}/f = \text{const}$ ).

б. Закон, що забезпечує незмінність зв'язку магнітного потоку повітряного зазору  $\Psi_0$  (тобто  $E/f = \text{const}$ ).

в. Закон, що гарантує незмінність зв'язку магнітного потоку ротора  $\Psi_2$  (тобто  $E_{\text{внутр}}/f = \text{const}$ ).

Закон збереження незмінності зв'язку потоку статора реалізується шляхом підтримки постійним відношення ЕРС статора до кутової частоти магнітного поля. Основним недоліком такого закону є зниження перевантажувальної здатності двигуна при роботі на високих частотах. Це відбувається тому, що індуктивний опір статора збільшується, і, як наслідок, зв'язок потоку в повітряному зазорі між статором і ротором зменшується зі збільшенням навантаження.

Підтримка сталості основного потоку збільшує перевантажувальну здатність двигуна, але ускладнює апаратну реалізацію системи управління і

вимагає або зміни конструкції машини, або наявності спеціальних датчиків. При постійного потокозчеплення ротора крутний момент двигуна не має максимального значення, але основний магнітний потік збільшується зі збільшенням навантаження, що призводить до насичення магнітопровода, і підтримувати постійність потокозчеплення ротора неможливо.

Висновок. Таким чином, скалярний закон управління електроприводом вентилятора дозволяє підтримувати частоту обертання двигуна з точністю до 5%, що в більшості випадків відповідає технічним вимогам виробництва теплової енергії.

Однак в нашому випадку для точного регулювання співвідношення «паливо-повітря» потрібна більш висока точність регулювання витрати повітря, яка може бути досягнута за допомогою електроприводу з векторним законом управління.

# 3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРА

## 3.1 Побудова механічної характеристики вентилятора

Номинальний режим роботи вентилятора відповідає максимальному значенню ККД при наступних параметрах установки:

- номінальний ККД  $\eta_n = 77 \%$ ;
- номінальна швидкість обертання  $n_n = 980$  об/хв,  $\omega_n = 102,62$  рад/с;
- номінальна продуктивність  $Q_n = 20000$  м<sup>3</sup>/год = 6,11 м<sup>3</sup>/с;
- номінальний напір  $H_n = 2680$  Па.

Вираз для механічної характеристики вентилятора при роботі з постійним значенням ККД  $\eta_i$  має такий вигляд:

$$M_{\text{вент}}(n) = a \cdot n + c,$$

де  $a$  і  $c$  – коефіцієнти змінних і постійних втрат вентилятора в режимі роботи з постійним значенням ККД.

Коефіцієнт змінних втрат вентилятора для навантаження 90 %:

$$a = \frac{0,9 \cdot M_n}{n_{\text{ном}}^2} = \frac{0,9 \cdot 214,37}{980^2} = 0,00021.$$

Коефіцієнт постійних втрат вентилятора:

$$c = 0,3 \cdot M_n = 0,3 \cdot 214,37 = 64,31.$$

Наваєтажувальна характеристика вентилятора в режимі роботи з номінальним ККД після підставлення чисельних значень коефіцієнтів рівняння механічної характеристики вентилятора має вигляд:

$$M(n) = 0,00021 \cdot n + 64,31 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (3.1)$$

Механічна характеристика вентилятора, розрахована за виразом (3.1), наведена на рисунку 3.2 лінією червоного кольору.

### 3.2 Побудова сімейства механічних характеристик двигуна

Побудуємо сімейство механічних характеристик асинхронного двигуна за наступним виразом, задаючись діапазоном ковзання  $s$  від 1 до 0,00001 з кроком 0,01, при  $n(s) = n_0 \cdot (1 - s)$

$$M_{\text{ем}}(s) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ X_{\text{кн}}^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30} = 102,6 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номінальний момент за паспортними даними:

$$M_{\text{н(паспорт)}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{22000}{102,6} = 214,4 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Критичний момент за паспортними даними:

$$M_{\text{к(паспорт)}} = m_{\text{к}} \cdot M_{\text{н(паспорт)}} = 2,1 \cdot 214,4 = 450,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Пусковий момент за паспортними даними:

$$M_{\text{п(паспорт)}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{н(паспорт)}} = 2,0 \cdot 214,4 = 428,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Критичний момент за формулою Клосса:

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2})} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104.72 \cdot 1.0172 \cdot (0.17 + \sqrt{0.17^2 + 1.326^2})} = 450,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номинальний момент за формулою Клосса:

$$M_H = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + a \cdot s_K)}{\frac{s_K}{s_H} + \frac{s_H}{s_K} + 2 \cdot a \cdot s_K} =$$

$$= \frac{2 \cdot 450,2 \cdot (1 + 1.526 \cdot 0.0848)}{\frac{0.0848}{0.0200} + \frac{0.0200}{0.0848} + 2 \cdot 1.526 \cdot 0.0848} = 214,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де  $a = \frac{R_1}{R_2'} = \frac{0.1700}{0.1114} = 1.526$

Пусковий момент за формулою Клосса:

$$M_{\Pi} = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + a \cdot s_K)}{\frac{s_K}{s_{\Pi}} + \frac{s_{\Pi}}{s_K} + 2 \cdot a \cdot s_K} =$$

$$= \frac{2 \cdot 450,2 \cdot (1 + 1.526 \cdot 0.0848)}{\frac{0.0848}{1} + \frac{1}{0.0848} + 2 \cdot 1.526 \cdot 0.0848} = 83,88 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Побудова сімейства механічних властивостей здійснюється в діапазоні робочих швидкостей вентилятора 500...1000 об / хв відповідно до формули

$$M_{em}(s, f_1) = \frac{3 \cdot (U_{1\Phi H} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}})^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot s \cdot \left[ (X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 \right]}$$

Для побудови графіків механічних характеристик в пакеті Mathcad залежність швидкості двигуна від частоти та ковзання прийнята у вигляді

$$n_1(s, f_1) = n_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot (1 - s) .$$

Сімейство механічних характеристик електродвигуна АИР200М6 наведено на рисунку 3.2.

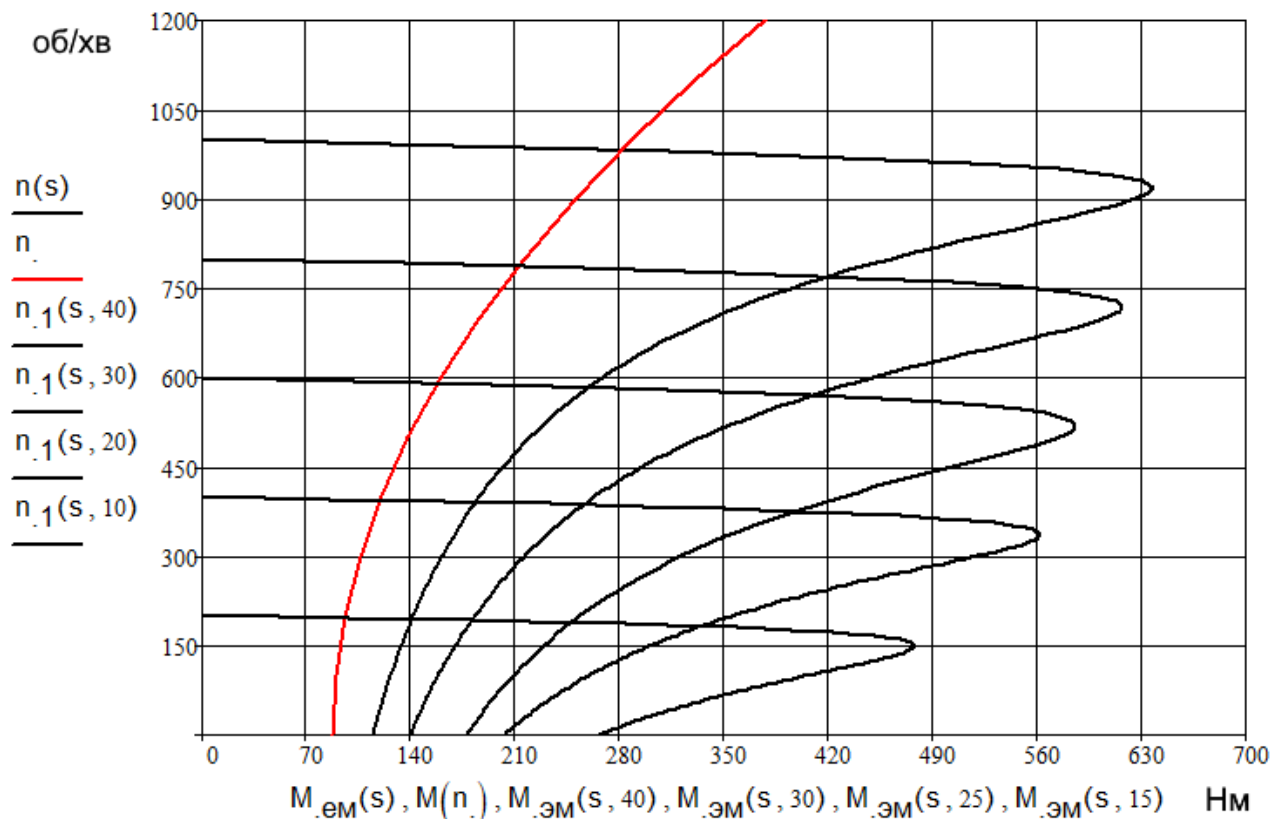


Рисунок 3.2– Сімейство механічних характеристик електродвигуна АИР200М6

З отриманих даних видно, що побудовані механічні характеристики дійсні тільки в робочій зоні, оскільки значення критичного і номінального моментів практично збігаються зі значеннями, розрахованими за паспортними даними. Це показує точність певних параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна. Однак значення пускового моменту, визначене за паспортними даними, має набагато вище значення розрахункового пускового моменту. Це пов'язано з тим, що при розрахунках не враховувалося вплив витіснення струму в обмотках ротора.

Номинальний струм ротора двигуна при номінальній кутовій швидкості обертання двигуна  $\omega_n = 102,62$  рад/с ( $n = 980$  об/хв):

$$I'_{2H} = \frac{U_{1\phi H}}{\pm \sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2}} = \frac{220}{\pm \sqrt{1.3246^2 + \left(0.1701 + \frac{0.1114}{s}\right)^2}} = 37,2 \text{ A}$$

Синус кута між вектором фазної напруги  $\overline{U_{1\phi}}$  і пов'язаним вектором струму ротора  $\overline{I'_{2H}}$ :

$$\sin \varphi_{2H} = \frac{X_{KH}}{\sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2}} = \frac{1.3246}{\pm \sqrt{1.3246^2 + \left(0.1701 + \frac{0.1114}{s}\right)^2}} = 0.2248$$

Номинальний струм статора двигуна:

$$I_{1H} = \sqrt{I_0^2 + I'_{2H}^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{2H} \cdot \sin \varphi_{2H}} = \\ = \sqrt{10.93^2 + 37.23^2 + 2 \cdot 10.93 \cdot 37.23 \cdot 0.2248} = 41,1 \text{ A}$$

### 3.3 Дослідження на моделі динамічних характеристик асинхронного двигуна при прямому пуску

Прямий пуск асинхронного двигуна здійснюється за простою схемою підключення з використанням звичайного релейного контактної комутаційного пристрою (рисунок 3.4). Такий електропривод не регулюється і підтримує оберти, відповідні точці перетину механічних характеристик двигуна і навантаження від вентилятора при частоті мережі 50 Гц. Такий електропривод використовується, наприклад, в схемі з дросельним принципом регулювання технологічних параметрів, використовуючи направляючий пристрій, з'єднаний послідовно з вентилятором, для підтримки заданого значення тиску повітря в пальнику котла. Його перевагою є простота схеми підключення електроприводу вентилятора, а

недоліками – значні пусковий струм і крутний момент, що перевищують номінальні значення в 5...8 разів, що спричиняє механічні та гідравлічні удари в електричній та гідравлічній мережах.

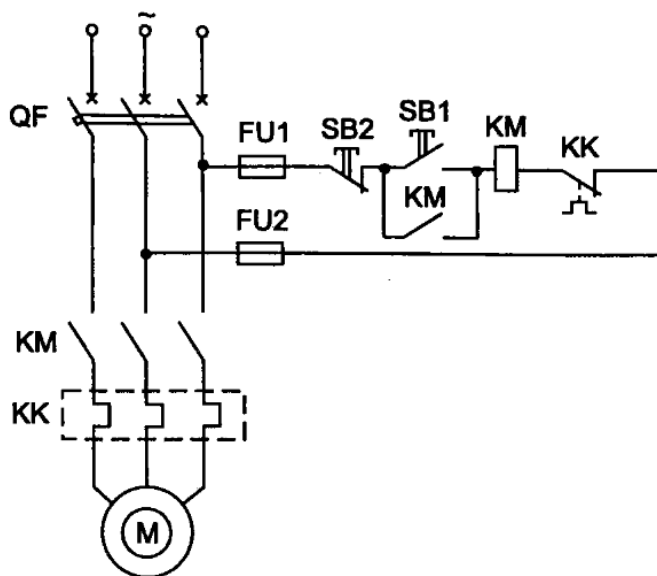


Рисунок 3.4 – Схема електрична принципова нерегульованого електроприводу

Схема імітаційної моделі прямого пуску асинхронного електропривода вентилятора в пакеті моделювання *Matlab-Simulink* з використанням бібліотеки *SimPowerSystem* наведена на рисунку 3.5. Момент навантаження двигуна – вентиляторний, з параметрами з виразу (3.1).

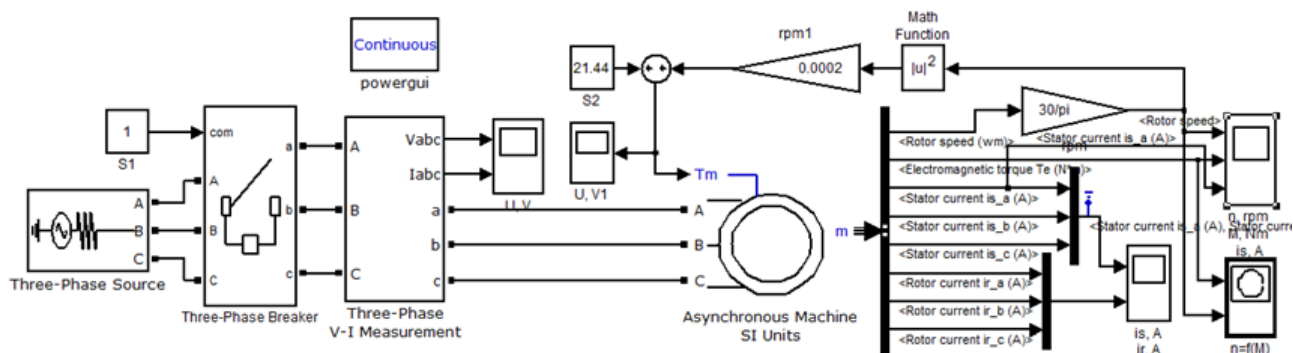


Рисунок 3.5 – Схема моделі прямого пуску електропривода вентилятора

Параметри схеми заміщення асинхронного двигуна АИР200М6, взяті з таблиці 3.6 розрахункових параметрів двигуна, показані на рисунку 3.6.

Розрахунковий момент інерції ротора вентилятора  $0,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  додається до номінального моменту інерції двигуна  $0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . На рисунку 3.7 показані параметри трифазного блоку живлення *Three-Phase Source* і двокоординатного будувача *XY-scope*.

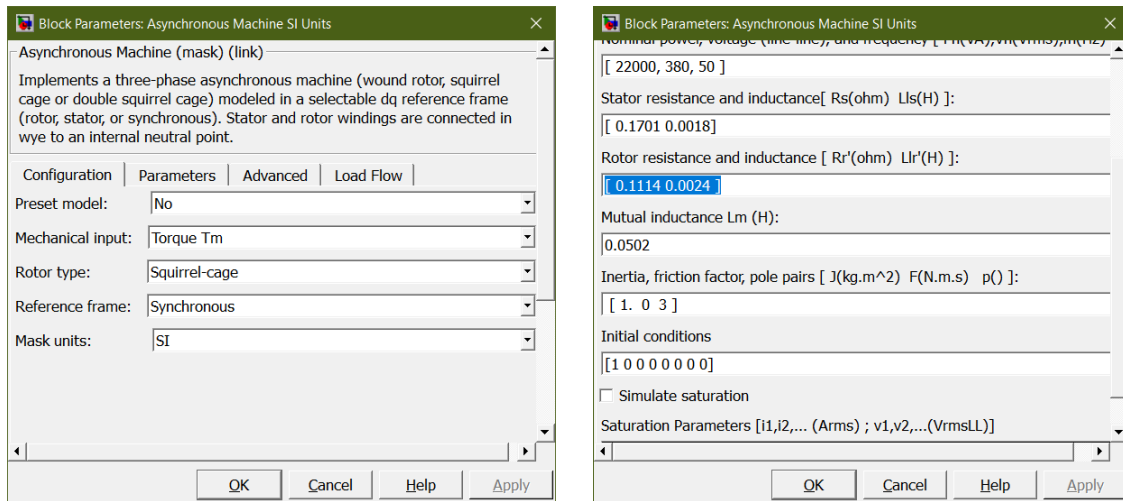


Рисунок 3.6 – Параметри асинхронного двигуна потужністю 22 кВт з таблиці 2.2

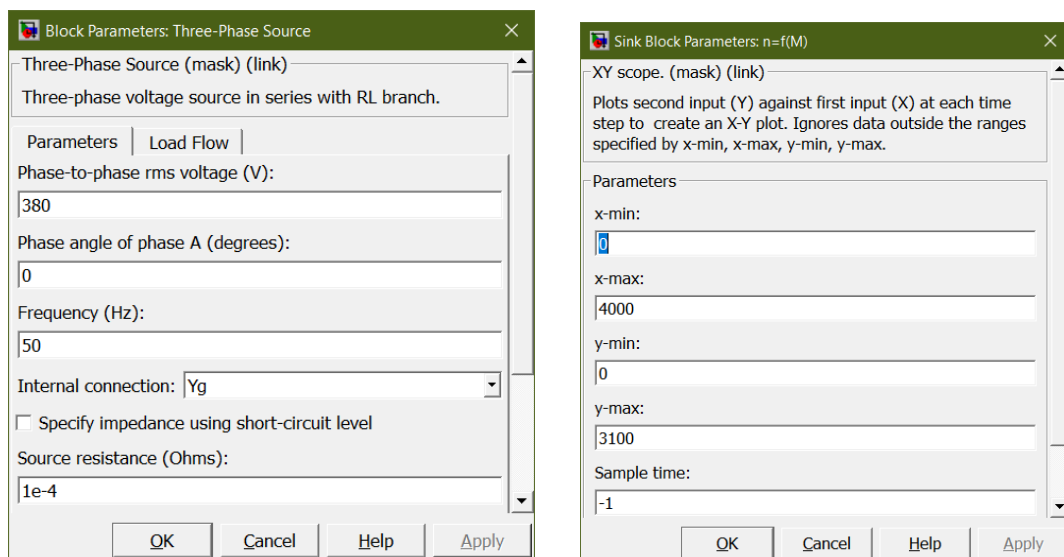


Рисунок 3.7 – Параметри трифазного блоку живлення *Three-Phase Source* і блоку двокоординатного будувача *XY-scope*

Результати моделювання електропривода вентилятора на базі трифазного асинхронного електропривода наведені на рисунках 3.8, 3.9.

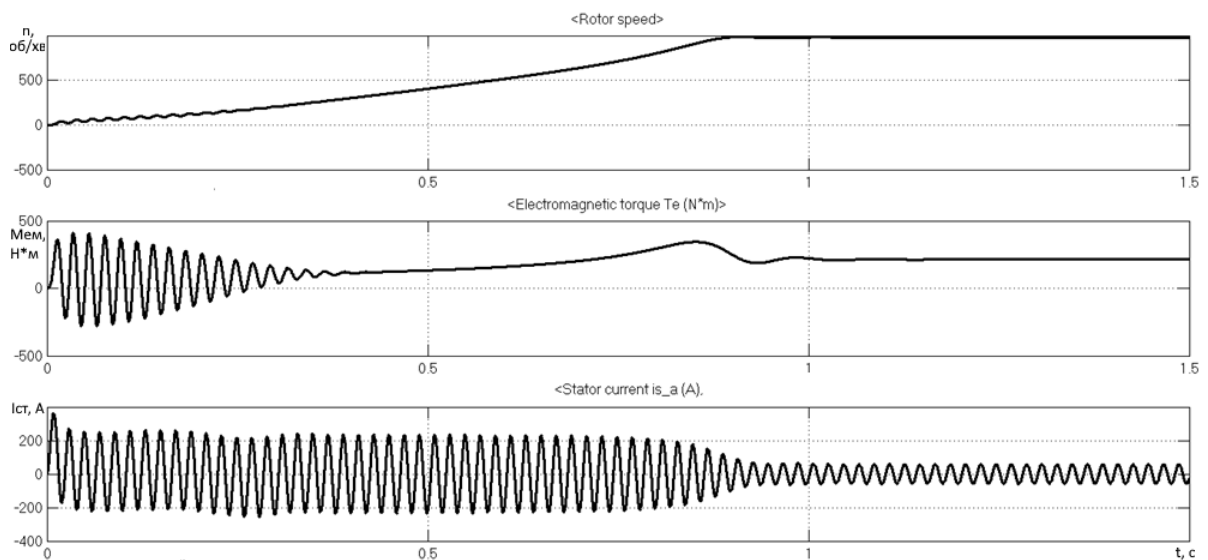


Рисунок 3.8 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при прямому пуску електропривода

Як видно з графіків на рисунку 3.8, час встановлення обертів і моменту при прямому пуску електропривода складає біля 1,0 с, пусковий електромагнітний момент досягає біля 400 Н·м, що в майже в 2 рази більше номінального, пусковий струм статора досягає 350 А, що майже в 7 разів перевищує номінальний.

### 3.4 Дослідження на моделі динамічних характеристик асинхронного електропривода з широтно-імпульсним перетворювачем частоти (АД-ПЧ)

Схема електропривода вентилятора з перетворювачем частоти зображена на рисунку 3.10.

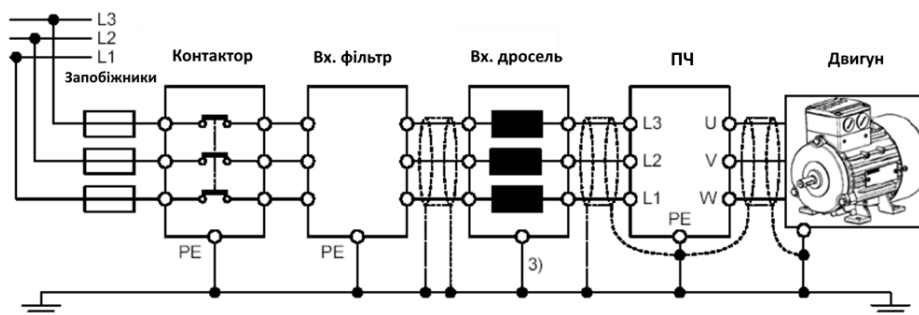


Рисунок 3.10 – Схема частотно-керованого електропривода вентилятора з ПЧ

Схема моделі електропривода вентилятора з ПЧ наведена на рисунку 3.11.

Момент навантаження двигуна – вентиляторний, з параметрами з виразу (3.1).

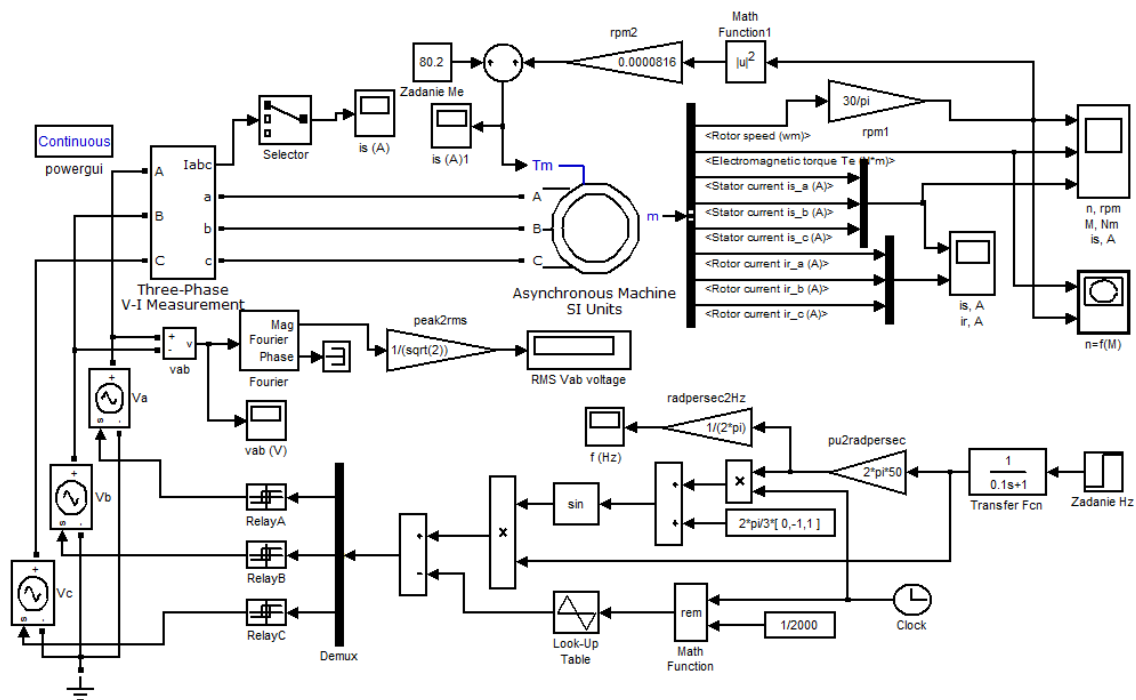


Рисунок 3.11 – Схема моделі електропривода вентилятора з широтно-імпульсним перетворювачем частоти

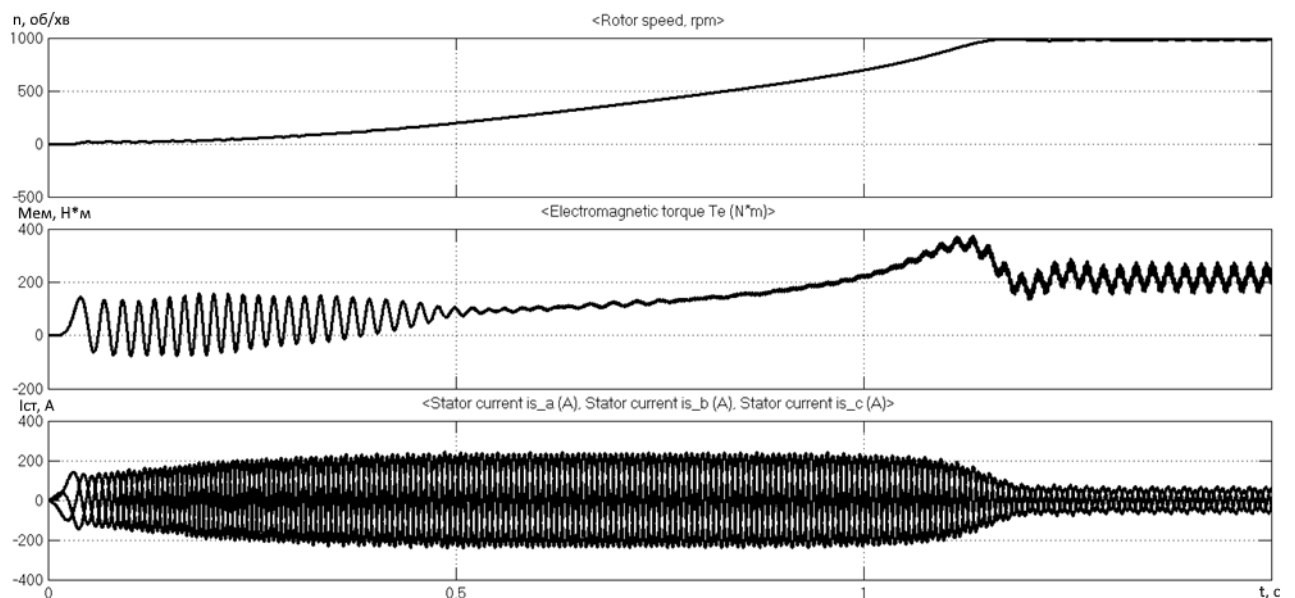


Рисунок 3.12 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при пуску електропривода з ПЧ на частоті 50 Гц

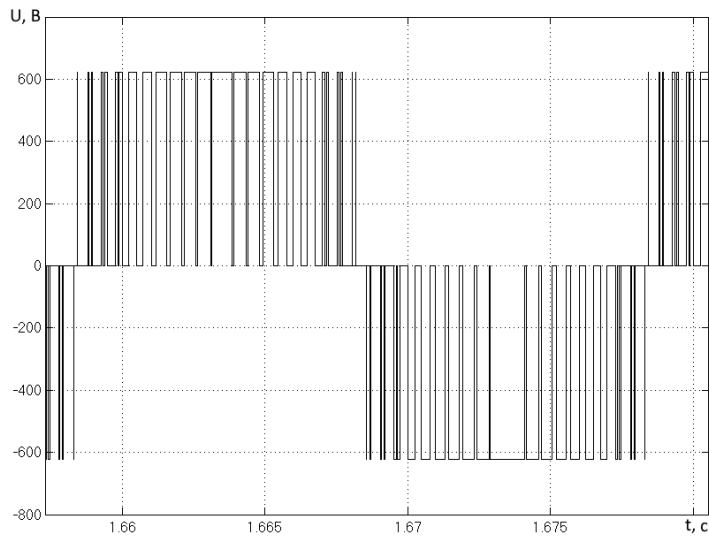


Рисунок 3.13 – Осцилограма формування синусоїдального струму статора широтно-імпульсним перетворювачем

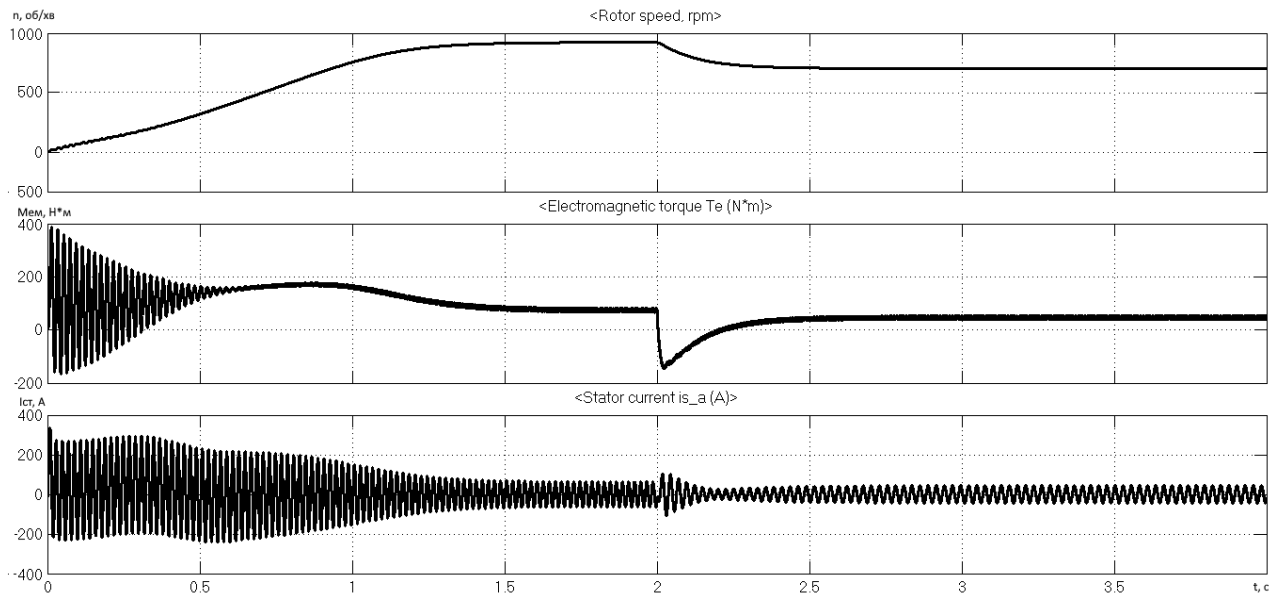


Рисунок 3.14 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при зміні частоти електропривода з 50 Гц до 35 Гц

Як видно з графіків на рисунку 3.8, час встановлення обертів і моменту при пуску електропривода з перетворювачем частоти складає 1,4 с, пусковий електромагнітний момент досягає біля 400 Н·м, що в майже в 2 рази більше номінального, пусковий струм статора досягає 350 А, що майже в 7 разів перевищує номінальний.



Коли напруга на конденсаторі  $C1$  перевищує 600 В, схема управління використовується для включення ключа *Universal Bridge1*, який паралельно підключає так званий «гальмівний» резистор до конденсатора. Фактично надлишкова енергія двигуна знищується за допомогою резистора. При низькій потужності приводу (до 20... 50 кВт) таке рішення може бути прийнятним, а при великій потужності необхідно шукати інші рішення.

Некерований напівпровідниковий підсилювач *Universal Bridge* живиться від трифазної напруги живлення і забезпечує напругу близько 550 В. Роль конденсатора подвійна: по-перше, зменшити пульсації напруги випрямляча, а по-друге, зменшити внутрішній опір джерела при імпульсному навантаженні.

Реалізація комутації «гальмівного» резистора  $R1$  виконана на однофазному перетворювачі *Universal Bridge1*, у якого використовується лише верхній транзистор (ключ). Налаштування блоку показано на рисунку 3.16.

Управління виконане від блоку *Relay*. Так як в однофазному перетворювачі *Universal Bridge1* два транзистори, то на виході блоку *Relay* включаємо мультиплексор на два входи – обидва транзистори управляються одним сигналом. Налаштування блоку *Relay* показано на рисунку 3.17.

Увімкнення ключа з резистором  $R1$  здійснюється при напрузі на виході випрямляча (на конденсаторі  $C1$ ) 600 В і більше, виключення – при зниженні напруги до 580 В і нижче.

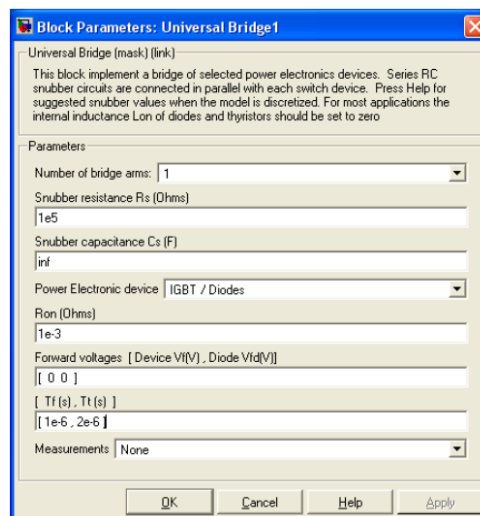


Рисунок 3.16 – Вікно налаштування блоку *Universal Bridge1*

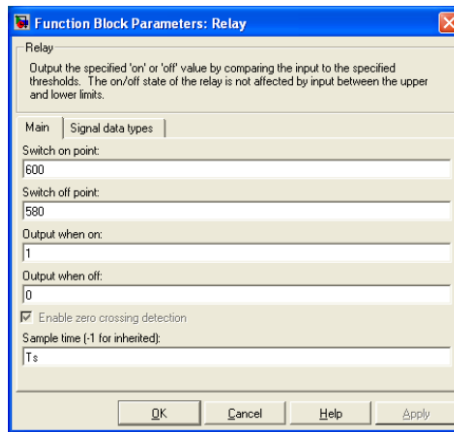


Рисунок 3.17 – Вікно налаштування блоку *Relay*

На рисунку 3.18 показані параметри конфігурації асинхронного двигуна.

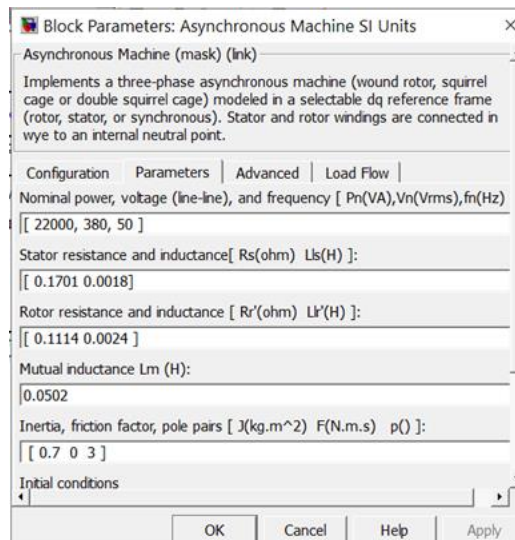


Рисунок 3.18 – Вікно налаштування блоку *Asynchronous Mashine SI Units*

Напруга живлення інвертора становить 600 В, яка забезпечується елементом постійного струму. Завдання швидкості забезпечується 2 блоками *Speed* і *Speed1*, а настройка навантаження також виконується двома блоками *Torque* і *Torque1*. Два блоки використовуються для розширення можливості комбінування швидкості і навантаження (рисунки 3.19 і 3.20).

Передбачається, що параметри ланцюгів зворотного зв'язку щодо частоти обертання і струму були розраховані раніше.

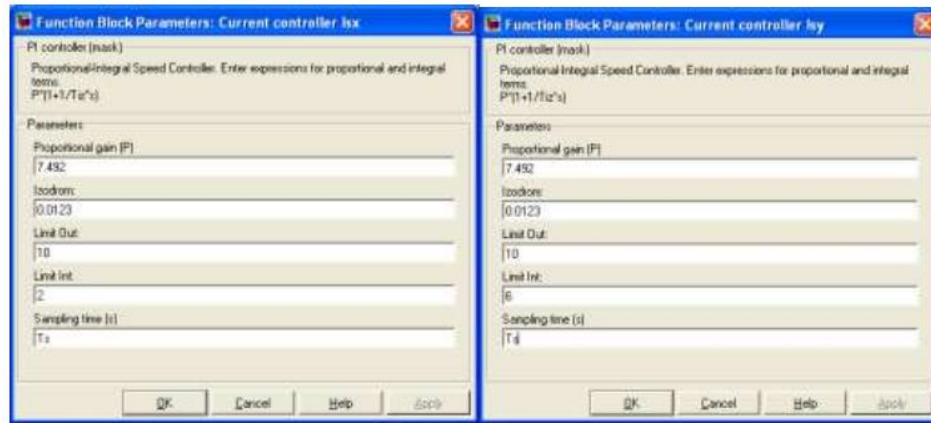


Рисунок 3.19 – Вікна введення параметрів регуляторів струму

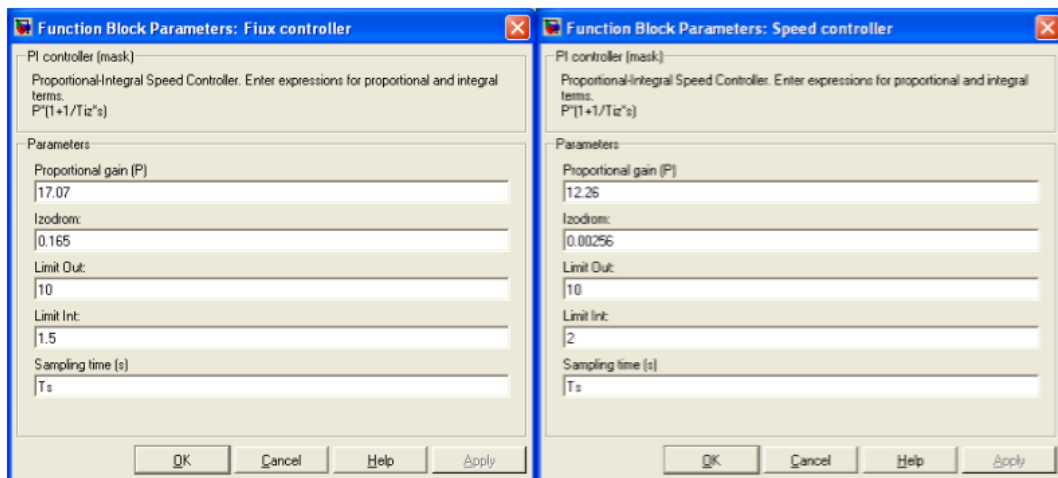


Рисунок 3.20 – Вікна введення параметрів регуляторів потоку та швидкості

Процес моделювання цієї моделі виконується з фіксованим кроком з використанням програми дискретного рішення. Крок моделювання  $T_s$  налаштовується в спеціальному вікні, доступ до якого можна отримати, перейшовши в головне меню *File Model Properties Callbacks*. У зв'язку з цим формат відображення налаштувань блоку моделі специфічний, і символ  $T_s$  повинен бути вказаний у *Sample (Sampling) Time* та були внесені відповідні коригування. Крім того, для прискорення рішення використовується процедура *Accelerator*. Перед початком моделювання *Simulink* створює додаткові файли, які використовують час.

Для візуалізації результатів моделювання використовуються осцилографи *Scope*. Центральною ланкою електроприводу є схема векторного управління, модель якої показана на рисунку 3.21.

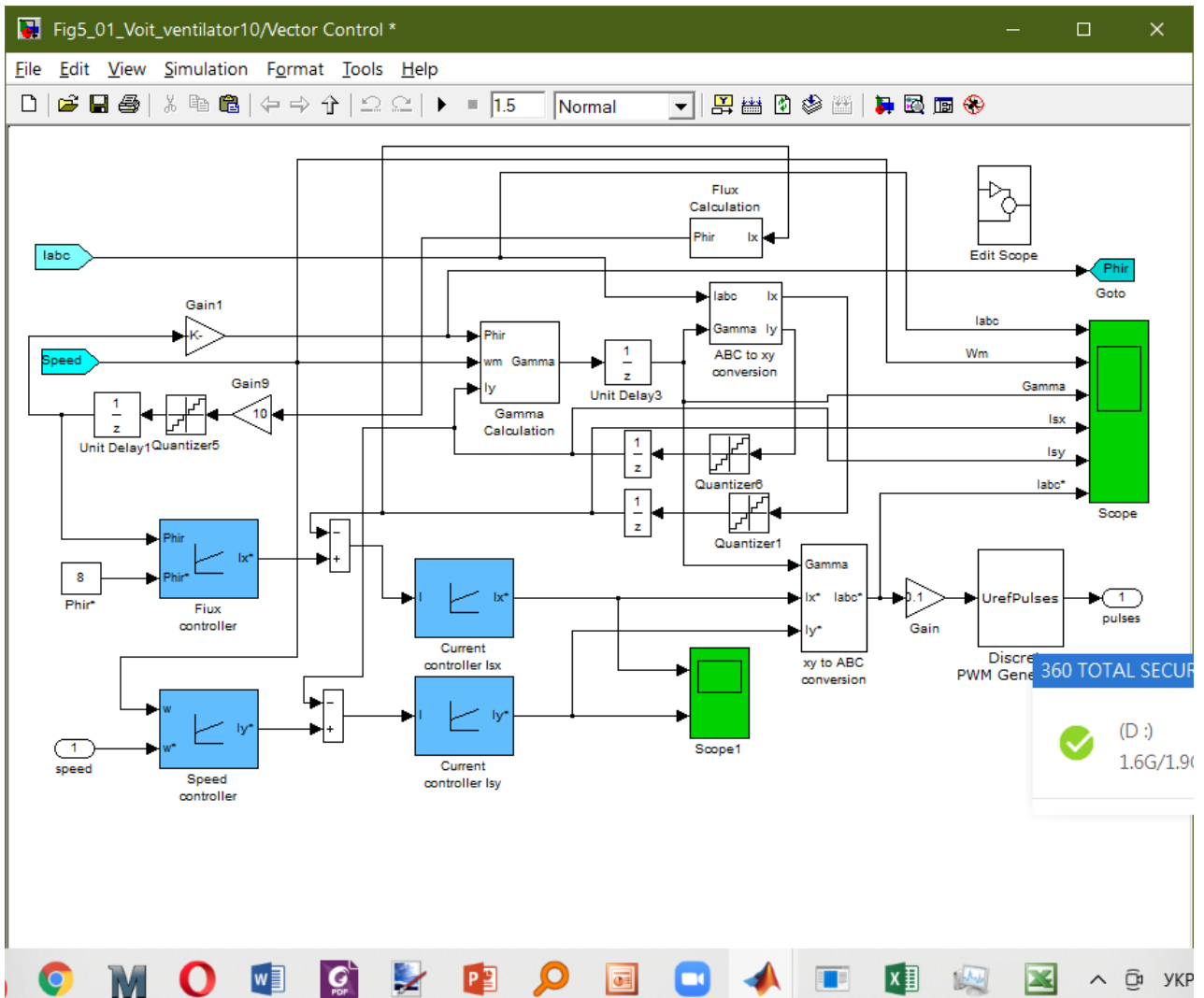


Рисунок 3.21 – Модель схеми керування приводом *Vector Control*

На блок *Vector Control* (рисунок 3.21) від двигуна надходять два сигнали, доступні для вимірювання – трифазний струм статора та частота обертання ротора. Інші сигнали обчислює схема векторного управління. Насамперед, має бути обчислена частота обертання координат  $\omega_k$  (частота інвертора) та поточний кут повороту координат  $\gamma$ . Цю функцію виконує блок *Gamma Calculation*, схема моделі якого показана рисунку 3.22.

Блок реалізує два рівняння 
$$\gamma = \frac{1}{s}(\omega_k) \quad \text{та} \quad \omega_u = \omega_k = p\omega_m + k_R R_R \frac{i_{Sy}}{\psi_{Rx}}$$

Так як рівняння записані в абсолютних одиницях, а  $\omega_m$  діє в схемі в машинних одиницях, то на вході  $\omega_m$  (рисунок 3.22) з'явився підсилювач з коефіцієнтом підсилення 10. З цієї ж причини з'явився підсилювач на вході  $I_y$  з коефіцієнтом підсилення 1/0,66. Кут повороту системи координат формує

дискретний інтегратор, у схемі управління інтегратором передбачено скидання вихідної напруги інтегратора до нульового рівня при досягненні значення  $2\pi$ .

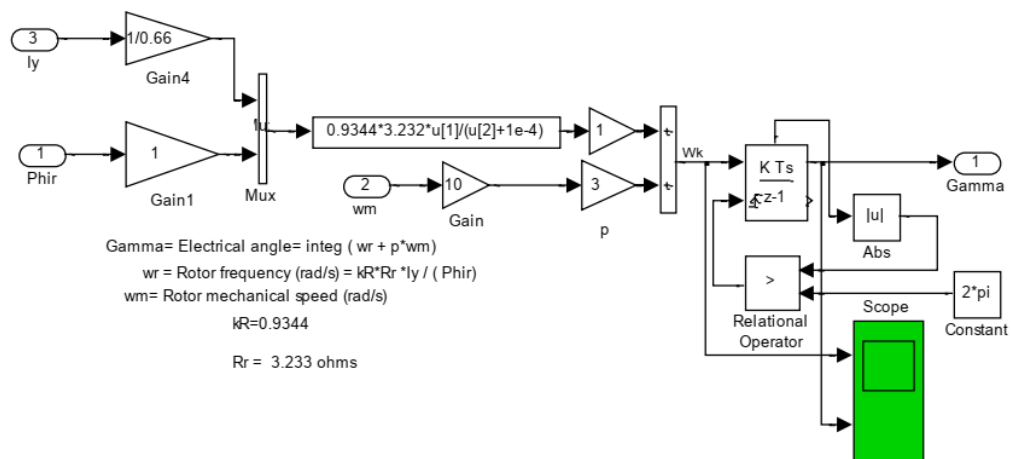


Рисунок 3.22 – Схема моделі блоку *Gamma Calculation*

Далі, регулятори струму в контурах потоку і швидкості виробляють завдання на струм статора двигуна у двох фазах і в системі координат, що обертається. Необхідно перевести завдання в нерухому систему та подати сигнал трифазним. Це завдання виконує блок *xy to ABC conversion*. В одному блоці поєднані два згадані вище перетворювачі (рисунок 3.23).

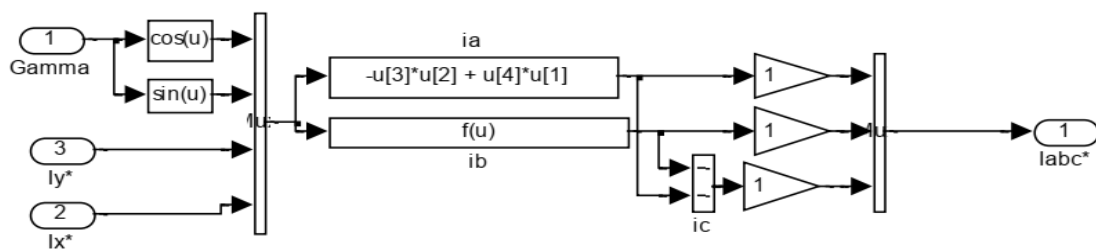


Рисунок 3.23 – Схема моделі блоку *xy to ABC conversion*

Перетворення виконуються у машинних одиницях, тому масштабні коефіцієнти не запроваджуються. На виході блоку одержуємо трифазне завдання на потрібній поточній частоті роботи інвертора.

Трифазний сигнал завдання необхідної частоти та амплітуди струму статора надходить у блок керування інвертором *Discrete PWM Generator*. Вікно установки параметрів блоку керування інвертором показано на рисунку 3.24.

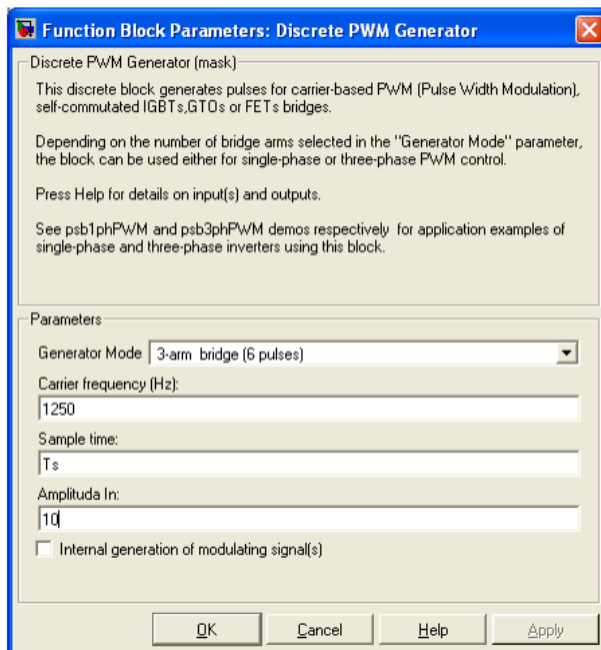


Рисунок 3.24 – Вікно введення параметрів блоку *Discrete PWM Generator*

Особливістю схеми керування інвертором є завдання несучої частоти 1250 Гц, удвічі менше значення частоти комутації (пульсацій). Максимальне значення амплітуди вхідного сигналу завдання будь-якої полярності 10 В.

Вихідні сигнали блоку *Discrete PWM Generator* забезпечують управління шістьма транзисторами інвертора та упаковані у мікропроцесорну шину.

Інвертор відпрацьовує завдання: на обмотках двигуна з'являється напруга та струм. Управління струмове, тому регулятори струму керують струмами статора по осях  $x$  і  $y$  таким чином, щоб швидше відпрацювати завдання при обмеженні струму на допустимому рівні.

Сигнал зворотного зв'язку за дійсним струмом статора, квантований і затриманий після обробки на обумовлені раніше значення, надходить на блок *ABC to xy conversion*, де перетворюється на двофазний в системі координат, що обертається. Схема моделі блоку показана на рисунку 3.25. Перетворення здійснюються у машинних одиницях.

Отримані після вироблення сигнали зворотних зв'язків за струмом по своїм осям, квантовані за рівнем і затримані на час обробки, надходять у ланцюг порівняння із заданими значеннями на регулятори струму.

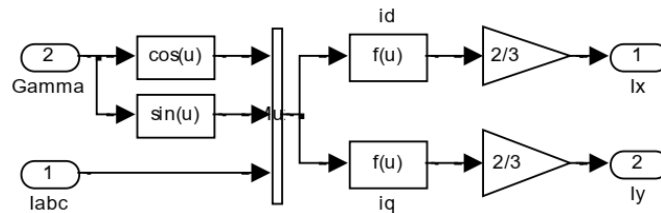


Рисунок 3.25 – Схема моделі блоку *ABC to xy conversion*

Оскільки елементів зворотного зв'язку за магнітним потоком немає, то доводиться ланцюг намагнічування двигуна моделювати за даними розрахунку схеми заміщення. Схема моделі ланцюга намагнічування двигуна представлена на рисунку 3.26.

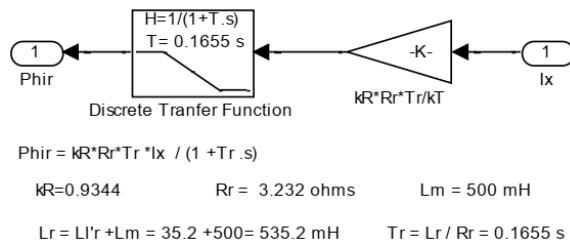


Рисунок 3.26 – Схема моделі ланцюга намагнічування двигуна

Модель ланцюга намагнічування двигуна складена відповідно до виразу

$$\psi_{Rx} = \frac{T_R}{(1 + T_R s)} k_R R_R i_{Sx},$$

Єдина відмінність полягає у наявності коефіцієнта зворотного зв'язку, щоб перевести машинний струм  $I_{sx}$  в абсолютний. Сигнал, сформований на виході цього блоку, використовується як зворотний за потоком в контурі потоку.

Квантування та запізнення, що введені в ланцюг зворотного зв'язку, характеризують витрати часу на розрахунок моделі з певною точністю.

Останній блок *Edit Scope*, що входить до схеми векторного управління приводом *Vector Control*, дозволяє відкрити головне меню графічної діаграми, створеної у процесі моделювання.

Головне меню відкриває всі передбачені Simulink можливості редагування та обробки створеної діаграми. Для виклику меню необхідно до моделювання

викликати порожній екран *Scope* та виконати моделювання. На екрані відображається результат моделювання та головне меню.

Найбільш напружений режим роботи електроприводу – генераторний (рекуперативний). Такий режим можливий за активного моменту опору і в цьому режимі вирішальну роль виконує «гальмівний» резистор *R1*. Тому навантаження на двигун подаватимемо по входу *Ta*.

Опір гальмівного резистора *R1* прийнято 5 Ом, ємність конденсатора *C1* взята 300 мкФ.

Програми управління частотою обертання та активним моментом у часі занесені до таймерів *Timer1* та *Timer* та представлені на рисунку 3.27.

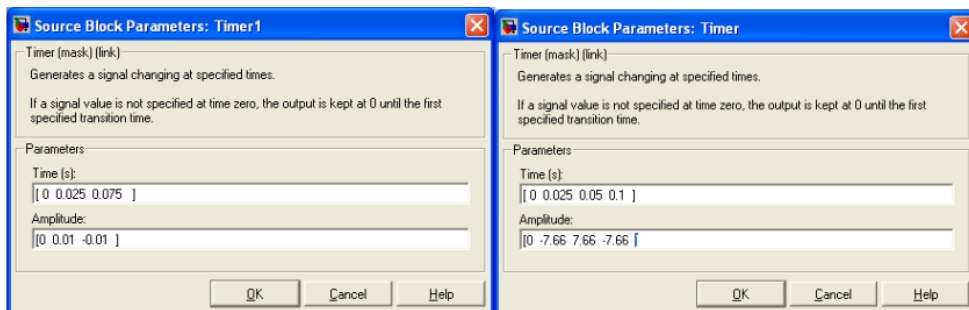


Рисунок 3.27 – Часові програми керування частотою обертання та активним моментом опору

На рисунку 3.28 представлені результати моделювання роботи електроприводу з векторним керуванням, укомплектованого повністю необхідним обладнанням.

Перший висновок, який необхідно зробити першим, це принципово інший характер реакції приводу на управління та збурення.

Перерегулювання стало чітко вираженим фактом і є наслідком дії активного моменту. Однак завдання щодо частоти обертання виконується досить акуратно, хоча через великі перерегулювання чіткість відпрацювання заданої частоти обертання в цьому масштабі дещо розмита.

І, третє, напруга джерела живлення вибирається у 600 В, за винятком моменту включення приводу до мережі.

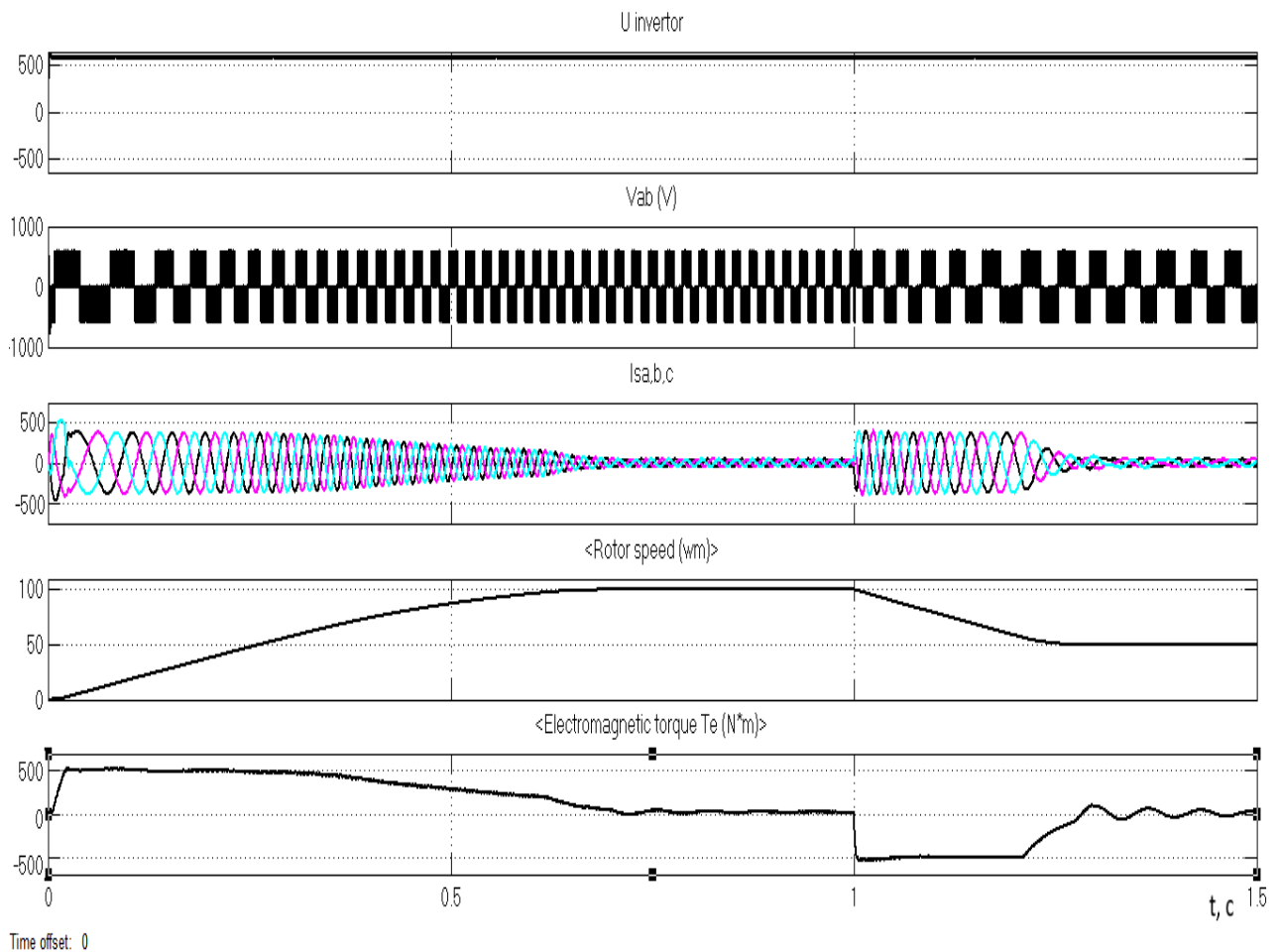


Рисунок 3.28– Результати моделювання електроприводу з векторним керуванням при роботі на активне навантаження при переході з великої на середню швидкість

Висновок. Як видно з результатів моделювання, розроблений електропривод впевнено працює у діапазоні 1:1000 з різним характером навантаження, при впливі навантаження номінального значення астатичні властивості системи не порушуються у всьому діапазоні частоти обертання.

## 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 4.1 Розрахунок витрат при існуючому електроприводі вентилятора

У собівартості енергії на теплових електростанціях та промислових котельнях 60...70 % складають витрати на паливо. Основою зниження питомої витрати палива в котлах є підвищення тиску пари і його температури, а також вдосконалення автоматизації котельних установок.

Оскільки для повного згоряння одного м<sup>3</sup> природного газу потрібно подавати в пальник приблизно в 11 раз більший об'єм повітря та підтримувати в топці коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha \approx 1,1$ , то вентилятори вимагають великих витрат електроенергії на привод. Тому виникає необхідність в модернізації електроприводу, яка полягає в заміні нерегульованого асинхронного приводу на енергозберігаючий частотно-регульований електропривод.

Дана заміна дозволить вирішити ряд завдань:

- 1) знизити витрату електроенергії;
- 2) знизити витрату палива;
- 3) знизити експлуатаційні витрати;
- 4) збільшити продуктивність вентилятора (збільшити його ККД).

Модернізація електроприводу вентилятора котельні, побудованого на базі сучасного частотного перетворювача, який дозволить регулювати швидкість подачі газів при зміні навантаження. Розраховуються річні витрати при роботі вентилятора з нерегульованим електроприводом.

Річні витрати електроенергії  $Q_{E1}$ , кВт/год

$$Q_{E1} = F_{до} \cdot k_3 \cdot P_{CP1}, \quad (4.1)$$

де  $F_{до}$  – дійсний час роботи обладнання, год.

$k_3$  – коефіцієнт завантаження устаткування за часом,  $k_3 = 1$ ;

$P_{CP1}$  – середня потужність, споживана електродвигуном вентилятора,

приймається  $P_{\text{CP1}} = 16$  кВт;

Дійсний час роботи обладнання  $F_{\text{до}}$ , год:

$$F_{\text{до}} = F_{\text{н}} \cdot (1 - (a_{\text{р}} + a_{\text{н}})), \quad (4.2)$$

де  $a_{\text{р}}$  – коефіцієнт, втрати часу, до уваги не береться;

$a_{\text{н}}$  – коефіцієнт, що враховує втрати часу на налаштування і налагодження обладнання під час робочих змін, приймаємо  $a_{\text{н}} = 0,07$ ;

$F_{\text{н}}$  – номінальний час роботи електроприводу, год.

Номінальний час роботи електроприводу  $F_{\text{н}}$ , год

$$F_{\text{н}} = \Phi_{\text{см}} \cdot F_{\text{см}} \cdot F_{\text{р.д}}, \quad (4.3)$$

де  $\Phi_{\text{см}}$  – тривалість зміни,  $\Phi_{\text{см}} = 12$  год;

$F_{\text{см}}$  – число змін у добі,  $F_{\text{см}} = 2$ ;

$F_{\text{р.д}}$  – робочих днів у році, приймається, з урахуванням простою на ремонт

$F_{\text{р.д}} = 335$  днів.

$$F_{\text{н}} = 12 \cdot 335 = 8040 \text{ год,}$$

$$F_{\text{до}} = 8040 \cdot (1 - (0 + 0,07)) = 7477 \text{ год,}$$

$$Q_{\text{Е1}} = 7477 \cdot 1 \cdot 16 = 119635 \text{ кВт/год.}$$

Річні витрати на електроенергію  $C_{\text{Е1}}$ , грн/год

$$C_{\text{Е1}} = Q_{\text{Е1}} \cdot \text{ц}, \quad (4.4)$$

де  $\text{ц}$  – ціна кВт електроенергії, приймаємо  $\text{ц} = 2,74$  грн.

$$C_{\text{Е1}} = 119635 \cdot 2,74 = 327800 \text{ грн/рік.}$$

Витрати на електроенергію при роботі вентилятора з нерегульованим електроприводом 327800 грн/рік.

## 4.2 Розрахунок витрат в проектному варіанті (з ПЧ-АД)

Річні витрати електроенергії після модернізації  $Q_{E2}$ , кВт / год:

$$Q_{E2} = F_{ДО} \cdot k_3 \cdot P_{CP2}, \quad (4.5)$$

де  $P_{cp2}$  – середня потужність, споживана електродвигуном вентилятора, приймаємо  $P_{cp2} = 11,2$  кВт.

$$Q_{E2} = 7477 \cdot 1 \cdot 11,2 = 83745 \text{ кВт/ч}$$

Річні витрати на електроенергію після модернізації  $C_{E2}$ , грн / рік

$$C_{E2} = Q_{E2} \cdot \text{Ц}, \quad (4.6)$$

$$C_{E2} = 83745 \cdot 2,74 = 229460 \text{ грн/рік.}$$

Розрахуємо капітальні вкладення у виробництво при установці регульованого електропривода.

Витрати на основні технічні засоби  $K_{TC}$ , знаходяться за формулою:

$$K_{TC} = \sum_{i=1}^m N_i \cdot \text{Ц}_i + C_{mp}, \quad (4.7)$$

де  $m$  – число типів технічних засобів;  $m = 3$ ;

$N_1 = N_2 = N_3 = 1$  – кількість датчиків АДР, перетворювачів частоти, електродвигунів;

$\text{Ц}_1$  – ціна датчика АДР-0,25.3, грн,  $\text{Ц}_1 = 7900$  грн;

$\text{Ц}_2$  – ціна перетворювача частоти, грн,  $\text{Ц}_2 = 150494$  грн;

$\text{Ц}_3$  – ціна електродвигуна, грн,  $\text{Ц}_3 = 85848$  грн;

$C_{mp}$  – транспортні витрати, грн., 10 % від витрат на технічні засоби.

Транспортні витрати  $C_{mp}$ , грн.

$$C_{mc} = 0,1 \cdot (N_1 \cdot \Pi_1 + N_2 \cdot \Pi_2 + N_3 \cdot \Pi_3), \quad (4.8)$$

$$C_{mc} = 0,1 \cdot (1 \cdot 7900 + 1 \cdot 150494 + 1 \cdot 85848) = 24394 \text{ грн},$$

$$K_{TC} = 1 \cdot 7900 + 1 \cdot 150494 + 1 \cdot 85848 + 24394 = 268336 \text{ грн},$$

Витрати на допоміжне обладнання  $K_{bc}$ , грн:

$$K_{bc} = 0,1 \cdot K_{TC}, \quad (4.9)$$

$$K_{bc} = 0,1 \cdot 268336 = 26834 \text{ грн}.$$

Витрати на монтаж і налагодження технічних засобів  $K_{mn}$ , грн:

$$K_{mn} = \frac{K_{mc} \cdot 50}{100}, \quad (4.10)$$

$$K_{mn} = \frac{268336 \cdot 50}{100} = 134168 \text{ грн}$$

Капітальні вкладення  $K$ , грн:

$$K = K_{TC} + K_{bc} + K_{mn}, \quad (4.11)$$

$$K = 268336 + 26833 + 134168 = 429338 \text{ грн}$$

Витрати на електроенергію при роботі вентилятора з регульованим електроприводом  $C_{E2} = 229460$  грн/рік.

Економічний ефект:

Наведені витрати  $Z_i$ , грн

$$Z_i = C_i + E_i \cdot \Sigma K_i, \quad (4.12)$$

де  $C_i$  – річні поточні витрати на підготовку виробництва, грн;

$E_i$  – коефіцієнт економічної ефективності,  $E_i = 0,15$ ;

$K_i$  – капітальні вкладення в підготовку виробництва, грн.

Для існуючого електроприводу вентилятора:

$$\begin{aligned} Z_1 &= C_{E2} + 0,15 \cdot (K - Z_2) = \\ &= 327800 + 0,15 \cdot (429337 - 150194) = 369672 \text{ грн} \end{aligned}$$

Для проектного варіанту:

$$Z_2 = 229460 + 0,15 \cdot 429338 = 369672 \text{ грн}$$

Економічний ефект, грн:

$$\begin{aligned} E &= Z_1 - Z_2, & (4.13) \\ E &= 369672 - 293861 = 75811 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Термін окупності  $T_{ок}$ , рік

$$T_{ок} = \frac{\Sigma K}{E}, \quad (4.14)$$

де  $\Sigma K$  – капітальні вкладення, грн.

$$T_{ок} = \frac{429338}{75811} = 5,6 \text{ років}$$

Дані економічного розрахунку зводимо в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Зведені дані економічного розрахунку

Показники	Одиниця виміру	Діюча схема	Проектна схема
Капітальні вкладення	Грн.	-	429337
Витрати на електричну енергію	Грн/рік	327800	229460
Наведені витрати	Грн/рік	369672	293861
Економічний ефект	Грн/рік	75811	
Термін окупності	Рік	5,6	

Висновок: Економічний ефект від модернізації склав 75811 гривень на рік, термін окупності проекту 5,6 років, що відповідає нормативам. Витрати на електричну енергію за проектною схемою скоротяться на 32 %, а наведені витрати на 25 %.

## 5 РЕЗУЛЬТАТИВНА ЧАСТИНА

### 5.1 Висновки і рекомендації за прийнятими в проекті рішеннями

В розділі «Вступ» показано, що на цей час більша частина енергії, яка виробляється, споживається системами електропривода, електро-технологічними і освітлювальними установками. Резерви енергозбереження закладені в удосконаленні електроприводів, на які приходиться більше половини всієї споживаної електроенергії. У деяких галузях промисловості споживання електроенергії електроприводами досягає 80 %. Зниження швидкості двигуна до швидкості робочого механізму допомагає економити енергію і покращувати управління технологічним процесом.

В розділі «Загальна частина» описаний технологічний процес генерування пари у котлі ДКВР-10/13, вибраний тип вентилятора ВДН-12,5-1000, описана його конструкція, виконані розрахунки для визначення потужності привода вентилятора, вибраний для приводу вентилятора трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу АИР200М6 потужністю 22 кВт з частотою обертання 980 об/хв, а також відповідний йому за потужністю перетворювач частоти типу Delta VFD-B моделі VFD300C43A/E потужністю 30 кВт. Виконаний розрахунки параметрів схеми заміщення електродвигуна вентилятора.

В розділі «Моделювання роботи електропривода» виконані розрахунки механічних та електромеханічних характеристик електропривода. Моделювання показало, що при прямому пуску асинхронного двигуна при незмінних параметрах мережевої напруги спостерігається великий пусковий струм, що у 7 разів більше номінального, електромагнітний момент перевищує номінальний у 2 разів, час пуску двигуна під вентиляторним навантаження складає біля 1 с.

При пуску АД із перетворювачем частоти напруга живлення АД і частота змінного струму поступового зростають до номінальних значень за 1,3 с, імпульси до 1,3 с, струм статора і електромеханічний момент більші номінальних відповідно у 2 і 5 разів. Механічні удари електропривода при пуску вентилятора з ПЧ будуть значно меншими, ніж при прямому пуску.

Використання скалярного закону управління в розімкненій схемі керування електроприводом вентилятора забезпечує необхідну точність підтримки 5,0 % в робочому діапазоні регулювання частоти обертання вентилятора, а векторного – біля 1-2 %.

В розділі «Економічна частина» приведений економічний ефект від модернізації склав 75811 гривень на рік, термін окупності проекту 5,6 років. Витрати на електричну енергію за проектною схемою скоротяться на 32 %, а наведені витрати на 25 %.

Таким чином, модернізація електропривода вентилятора парового котла є технічно і економічно доцільною та може бути рекомендована до впровадження в котельнях підприємств харчової промисловості України.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тележко Г.М., Ягов Г.В. Современные методы обеспечения ресурсоэнергосбережения в теплоэнергетике и теплоснабжении. // Энергетика Татарстана, №1, 2009. – С. 27-33.
2. Газоанализаторы «Оптима». Руководство по эксплуатации. ЛШЮ.413411.014 РЭ. Санкт-Петербург, 2004.
3. Sensorgesteuerte CO-Regelung zur Optimierung des Verbrennungsprozesses für Feuerungsanlagen kleiner und mittlerer Leistung. - Dr.-Ing. Frank Hammer, Ing. (FH) Harald Weber, LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co KG, D-69190 Walldorf, Druckschrift Nr. DLT 5014.06.
4. Гафаров А.Х. Особенности перевода паровых котлов ДКВР-20-13 и ДКВР-10-13 в водогрейный режим на предприятии тепловых сетей г. Набережные Челны. // Новости теплоснабжения, № 3 (67), 2006.
5. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): Учебное пособие / В.Б. Терехин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.
5. Правила устройства электроустановок: 9-е изд., перераб. и дополн. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 776 с.
6. Электротехнический справочник: В 3 т. – М.: Энергоатомиздат. 1986. – Т.2.: Электротехнические изделия и устройства / Под. общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И.Н. Орлов) и др. 1986. – 712 с.
7. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1991.
8. Андрущенко О.А., Водичев В.В. Электронные программируемые реле серий EASY и MFD-Titan. Одеса: Изд. «Автограф», 2006. – 324 с.
9. Герман-Галкин С.Г. Проектирование мехатронных систем на ПК. С.Г. – СПб.: Корона, 2008. – 346 с.
10. Дьяков В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2002. – 286 с.
11. Черных, И.В. «Simulink: Инструмент моделирования динамических систем». / И.В. Черных. – Питер: ДМК Пресс, 2008. – 400 с.

12. Настанова з проектування Danfoss VLT® AQUA Drive FC 202

13. Макаров, А.М. Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока: учеб. пособие / А. М. Макаров, А. С. Сергеев, Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016.– 192 с.

14. Методические указания к выполнению электротехнической части ДП для студентов механических специальностей / А.А. Галиулин, П.Н. Монтик, Е.П. Штепа. – Одесса: ОНАПТ, 2011. – 42 с.

15. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістрів спеціальності 141 / Укладачі: Бабіч В.Ф., Осадчук П.І., Галіулін А.А., Штепа Є.П. – Одеса: ОНАХТ, 2021 р. – 56 с.