

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
Сергій ПЕРЕСАДА
(підпис)

“ ” _____ 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи автоматизації,
електропривод та електромобільність»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**
(код і назва)

на тему: Електромеханічна система автоматизації піролізного котла

Виконав: студент 3 курсу, групи ЕП-п71
(шифр групи)

Гуцул Олег Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)


(підпис)

Керівник доцент, к.т.н., Ковбаса Сергій Миколайович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)


(підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Рецензент доцент, к.т.н., Гайденок Юрій Антонович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент


(підпис)

Київ – 2020 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

[illegible]

				141. 0002.002.БР		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Розробн.	Гуцул О.О.				2	77
Керівн.	Ковбаса С.М.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-п71	
Консульт.						
Н/контр.	Теряєв В.І.					
Зав.каф.	Пересада С.М.					

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: «Електромеханічна система автоматизації піролізного котла»

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

_____ Гуцул Олег Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Електромеханічна система автоматизації піролізного котла

керівник проекту _____, доцент, к.т.н., Ковбаса С.М., _____,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту 05.06.2020 р.

3. Вихідні дані до проекту Житлове приміщення площею 200 квадратних метрів. Піролізний котел потужністю 25 кВт з можливістю автоматичної подачі палива. Регулювання температурою котла за допомогою регулювання обертів нагнітаючого вентилятора. Захист системи від перевищення температури, надмірного тиску. Підключення акамулюючої ємності та бойлера для нагріву води від системи гарячого водопостачання. Автономне живлення системи електроенергією в випадку відключення від мережі електропостачання в аварійних ситуаціях.

4. Зміст пояснювальної записки Список скорочень та умовних позначень. Вступ. Аналітичний огляд. Розрахунок та вибір основних елементів електромеханічної системи. Розробка схеми електричної принципової та шафи керування. Розробка системи керування та автоматизації піролізного котла. Розробка алгоритму керування асинхронним двигуном. Висновок. Список використаної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Схема технологічного процесу. Схема електрична принципова автоматизованої системи піролізного котла. Схема креслення щита. Результати досліджень динамічних режимів.

6. Консультанти розділів проекту*

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

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

7. Дата видачі завдання 26.03.2020 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд	10.04.2020	
2	Розрахунок та вибір основних елементів електромеханічної системи	10.05.2020	
3	Розробка схеми електричної принципової та шафи керування	15.05.2020	
4	Розробка системи керування та автоматизації піролізного котла	20.04.2020	
5	Розробка алгоритму керування асинхронним двигуном	20.04.2020	
6	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини. Підготовка презентації	05.06.2020	

Студент

Керівник проекту



(підпис)



(підпис)

Олег ГУЦУЛ

Сергій КОВБАСА

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить 77 сторінок, 18 рисунків, 14 таблиць, 3 аркуша графічної частини.

Метою даного проекту є розробка електромеханічної системи автоматизації піролізного котла. Розроблена система спроектована згідно вимог до проекту. Під час виконання роботи було розраховано та підібрано ряд апаратури: відцентровий насос, димосос, датчик рівня палива в бункері, датчик температури, нагнітаючий вентилятор та двигун до нього. Для двигуна вентилятора було проведено ряд досліджень, а саме вибір керування за умовою найефективнішого використання енергії.

Спроектowana система може використовуватись в реальній системі для підвищення ефективності опалювальної системи, що показано в результатах досліджень.

Графічна частина включає в себе: технологічну схему, схему електричну принципову системи, результати досліджень

ПІРОЛІЗНИЙ КОТЕЛ, ККД, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, НАГНІТАЮЧИЙ ВЕНТИЛЯТОР, ДИМОСОС, ТЕПЛООБМІННИК, ЦИРКУЛЯЦІЙНИЙ НАСОС, РЕГУЛЯТОР ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ.

					141.0002.002.БР						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Гуцул О.О.			Електромеханічна система автоматизації піролізного котла			Літ.	Арк.	Акрушіє	
Перевір.		Ковбаса С.М.								6	77
								НТУУ «КПІ» Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-п71			
Н. Контр.		Теряєв В.І.									
Затверд.		Пересада С.М.									

ABSTRACT

Thesis project contains 77 pages, 18 figures, 14 tables, 3 sheets of graphics.

The purpose of this project is to develop an electromechanical system for pyrolysis boiler automation. The developed system is designed according to the requirements of the project.

During the work, a number of equipment was calculated and selected: a centrifugal pump, a smoke pump, a fuel level sensor in the hopper, a temperature sensor, a blower fan and a motor for it. A number of studies have been conducted for the fan motor, namely the choice of control based on the most efficient use of energy.

The designed system can be used in a real system to increase the efficiency of the heating system, as shown in the research results.

The graphic part includes: technological scheme, electrical scheme of the basic system, research results

PYROLYSIS BOILER, EFFICIENCY, FREQUENCY CONVERTER, INJECTOR FAN, SMOKE PUMP, HEAT EXCHANGER, CIRCULATION PUMP, REGULATOR.

					141.0002.002.BR				
	Letter	No of doc.	Sign.	Date					
Devel.	O. Hutsul				Electromechanical system of pyrolysis boiler automation	L.		Page	Pages
Checked	S. Kovbasa							7	77
						NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», FEA			
N. Contr.	V. Teriaiev								
Approved	S. Peresada								

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	10
ВСТУП.....	11
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	12
1.1. Загальна інформація про піролізні котли	12
1.1.1. Вимоги до палива для піролізного котла.....	13
1.1.2. Основні переваги піролізних котлів.....	14
1.1.3. Основні недоліки піролізних котлів.....	15
1.1.4. Аналіз процесу піролізу.....	16
1.1.5. Піроліз деревини	22
1.2. Опис технологічного процесу обігріву з використанням піролізного котла..	24
1.3. Формулювання вимог до електроприводу, систем автоматичного керування та автоматизації	27
1.4. Вимоги до системи автоматизації	27
2. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВИБІР ПІРОЛІЗНОГО КОТЛА	29
2.1. Розрахунок потужності та вибір двигунів.	29
2.1.1. Вибір циркуляційного насосу:	30
2.1.2. Вибір димососу та нагнітаючого вентилятора	32
2.2. Розрахунок та вибір елементів системи автоматизації (клапани, вентилі, датчики тощо)	34
2.3. Проектування силової частини перетворювача	36
2.4. Обґрунтування та вибір ПЛК.....	47
2.5. Розрахунок параметрів двигуна вентилятора.....	48
2.5.1. Розрахунок номінальних даних двигуна.....	49
2.5.2. Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення.....	51

3. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ ТА ШАФИ КЕРУВАННЯ.....	54
4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ПІРОЛІЗНОГО КОТЛА.....	56
4.1. Розробка алгоритму керування асинхронним двигуном.....	56
4.1.1. Математична модель асинхронного двигуна	56
4.1.2. Частотне керування кутовою швидкістю	58
4.2. Спрощена математична модель нагріву.....	61
4.3. Дослідження динамічних характеристик методом математичного моделювання	64
4.4. Розробка регулятора технологічного процесу	67
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	75

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПЧ – перетворювач частоти;

IGBT – (БТІЗ, англ. Insulated-gate bipolar transistor) біполярний транзистор з ізолюваним затвором;

АД – асинхронний двигун;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ПК – піролізний котел;

ГВП – гаряче водопостачання;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

R_1, R_2 – опори статора та ротора;

L_1, L_2 – індуктивності статора та ротора;

ω – кутова швидкість ротора;

M – електромагнітний момент двигуна;

M_c – момент навантаження;

ω_0 – кутова швидкість синхронної системи координат $(d-q)$ відносно стаціонарної системи координат;

ε_0 – кутове положення синхронної системи координат $(d-q)$ відносно стаціонарної системи координат;

L_m – індуктивність намагнічуючого контуру;

J – сумарний момент інерції;

ВСТУП

Піролізні котли [1] на сьогоднішньому ринку опалювального обладнання вже не новинка, вони відомі за своє функціонування на єдиному завантаженні яке в кілька разів перевищує час функціонування вугільних і дров'яних котлів. Піролізні котли набагато ефективніші традиційних. В основі цього обладнання лежить технологія піролізного спалювання палива. Його суть полягає в тому, що під впливом підвищеної температури і в умовах браку кисню деревина починає розкладатися на твердий залишок і летючу частина - піролізний газ. Піроліз деревини відбувається при температурі, що знаходиться в межах від 250 - 750 градусів. Надалі змішання кисню з піролізним газом при значній температурі призводить до згорання останнього, який застосовується з метою отримання теплової енергії.

До переваг такого котла також можна віднести можливість контролю та регулювання його роботи та потужності. Автоматика керує циркуляційними насосами, нагнітаючими вентиляторами, димососами, шнеком. Користувач може на пульті управління змінювати потужність в межах від 60 до 100% від номіналу або просто встановити бажану температуру в приміщенні. Саме за рахунок автоматики та різних пристосувань, таких як теплоакумулятор забезпечується неперервний процес горіння.

Одним з факторів які впливають на ККД піролізного котла є те, що він горить безперервно, або з нетривалими паузами. Це пояснюється тим, що коли вода в системі нагріта, набагато менше енергії йде на підтримання температури ніж на те, щоб набрати робочу температуру від мінімального значення. Встановивши теплоакумулятор та ряд пристосувань для автоматизації процесів опалення (завантаження палива, зміна тяги в котлі, перемикання води по «малому» та «великому» колу) забезпечує ефективне використання палива.

Метою даного дипломного проекту є проектування електромеханічної системи автоматизації піролізного котла для забезпечення автоматичного обігріву житлового приміщення.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Загальна інформація про піролізні котли

Піролізний котел працює за принципом, який заснований на отриманні тепла при згорянні деревини. Це може бути тирса, дрова, гілки, поліна, паливні брикети тощо. За своєю конструкцією він відрізняється від звичайного твердопаливного газогенераторного котла. Твердопаливні [1] піролізні котли мають топку, яка поділяється на два відділення.

У камері для газифікування (також – камера завантаження) проходить термічний розклад палива в умовах нестачі кисню. Цей процес називається піролізом. При цьому виділяються піролізні гази, які надходять в камеру згорання (друге відділення топки). Вторинне повітря прямує туди ж і зводиться до мінімуму відвід тепла з першого відділення топки. Ці два відділення розділені колосником.

На ньому знаходиться паливо (брикети або дрова). Первинне повітря рухається вниз і проходить через шар палива. Цим і відрізняються котли піролізні твердопаливні від інших – принципом верхнього дуття. У таких топках аеродинамічний опір характеризується підвищеними значеннями. З цієї причини такі пристрої обладнуються пристроями для примусової тяги (димосос, дуттєвий вентилятор).

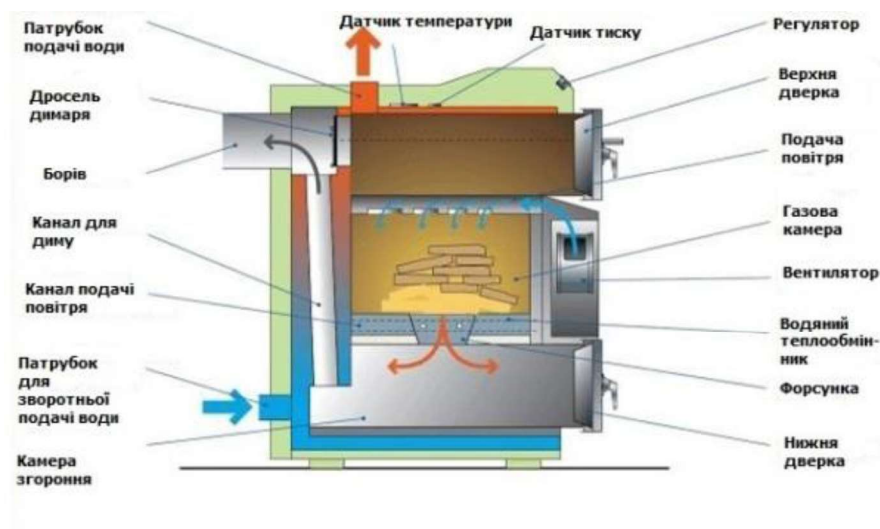


Рисунок 1.1 – Будова піролізного котла

Конструкція піролізних котлів передбачає наявність наступних складових: сталевий корпус, зварений з листів товщиною 5-7 мм, камери згоряння і кількох керамічних блоків. У задній частині цього обладнання є колектор продуктів згоряння, оснащений витяжним вентилятором (димососом). У передній частині - завантажувальна камера (верхня) і нижня камера являє собою піддувало через яке повітря потрапляє в камеру згоряння.

У піролізних котлах топка розділена на дві частини. У першій частині (камера завантаження) при нестачі кисню повільно горить і піролізу паливо, а що виділяються при цьому газу догорають у другій частині куди подається вторинне повітря (подвійне дуття). Відведення тепла з камери завантаження мінімізується. В існуючих конструкціях ці простору розділяє колосник , на якому лежить паливо; первинний повітря проходить крізь шар палива зверху вниз. Таким чином, характерною відмінністю піролізних котлів від інших побутових котлів є верхнє дуття. Топки такої конструкції мають підвищену аеродинамічний опір , тому тяга їх, як правило, примусова. Часто з технологічних міркувань вона реалізується за допомогою димососа , а не дуттьового вентилятора (більше характерного для невеликих котлів); в статтях зазвичай все одно вживається термін «вентилятор».

Головною перевагою цієї системи вважається можливість віддаленого керування. Подача повітря здійснюється завдяки нагнітаючого вентилятора. Піролізний газ в камері формується за допомогою витяжного вентилятора та направляється в камеру згоряння, де відбувається його змішування з повітрям. Як показує практика, піролізне горіння гарантує котлу коефіцієнт корисної дії, що знаходиться на рівні 86-89%.

1.1.1. Вимоги до палива для піролізного котла

В залежності від конструкції, піролізні котли працюють на колених дровах різного розміру або на стандартних паливних брикетах чи деревних пелетах. Також існують конструкції, що можуть використовувати різні види деревного палива. Для

піролізних котлів рекомендовано використовувати деревину, що має вологість менше 25%. Це зменшить витрати самого палива, підвищить ефективність котла та збільшить термін його експлуатації. Дуже вологе деревне паливо також врешті згорить у піролізному котлі, але це може зменшити загальну ефективність аж на половину, через це збільшиться витрата самого палива, а циркуляція у контурі котла вологого диму з підвищеною, ніж зазвичай, кислотністю негативно відіб'ється на стані стінок котла та димових труб.

1.1.2. Основні переваги піролізних котлів

- При згорянні газу не утворюється сажа, а зола утворюється в мінімальній кількості (відповідно піролізний котел чистити необхідно набагато рідше);
- Піролізний котел в змозі підтримувати необхідну температуру значно довше в порівнянні з традиційними пристроями для спалювання деревини;
- Газогенераторний котел має ККД набагато вище в порівнянні зі звичайними котлами;
- Топка піролізного котла влаштована таким чином, що паливо достатньо закласти в завантажувальну камеру один раз для роботи протягом доби;
- При горінні газ, що виділяється з деревини, взаємодіє з атомарним вуглецем, що при згорянні дає суміш H_2O (пари) і CO_2 (вуглекислоти) – досить нейтральних продуктів;
- Потужність газогенераторних котлів можна регулювати в досить широких межах (від 25% до 100%);
- В піролізних котлах можна утилізувати відходи деяких типів без забруднення повітря (ГТВ, полімерні вироби).
- Регульований (подачею первинного повітря) процес горіння дозволяє працювати з однією закладки досить тривалий час, до 12 годин (у звичайних дров'яних котлів близько 3-4 годин, однак у котлів верхнього горіння цей показник

більше - від 30 годин на дровах до 6-7 днів на вугіллі). Можна забезпечити автоматичне регулювання параметрів.

- Повне згоряння палива. Як наслідок, гарантована економічність горіння, рідше треба чистити зольник.
- Двоступенева спалювання дозволяє знизити надлишок повітря у вихідних газах (підвищує економічність)
- Процес горіння піролізних газів легко піддається управлінню і регулюванню, що дозволяє автоматизувати роботу такого котла приблизно в тій же мірі, що і роботу газових або рідкопаливних котлів

Зниження викидів шкідливих речовин в атмосферу (зокрема, висока температура у верхній камері пригнічує CO)

- Застосування даного типу котлів стимулює до відмови від застосування несушеного палива, що підвищує ефективність господарювання
- Можливість спалювання великих (навіть неколотих) дров.

Ефективність піролізних котлів пов'язана з тим, що під час згоряння дров не можна досягти такої високої температури, як в процесі згоряння газу, отриманого з них; щоб підтримувати горіння газу потрібно менше повітря, ніж для спалювання дров, відповідно, температура горіння буде більшою, а разом з нею зростає ефективність спалювання палива; процедурою спалювання піролізного газу простіше керувати, таким чином, функціонування газогенераторного котла автоматизований також, як рідкопаливний або газовий.

1.1.3. Основні недоліки піролізних котлів

- Більш висока (в 1,5-2 рази) вартість.
- Енергозалежність - без димососа працювати не можуть (за рідкісним винятком)
- Вимогливість до вологості палива
- У деяких моделей помічені зміни потужності в процесі спочатку зростаючого, потім затухаючого виходу летючих в ході піролізу закладки - до 40%

- На малих (нижче 50%) навантаженнях горіння нестабільно, відзначається утворення дьогтю в газоходах
- Температура зворотної води повинна бути не менше 60 ° С (рідко 40 °), щоб уникнути випадання в газовому тракті конденсату і низькотемпературної корозії (це звичайна вимога до казанів, проблема легко вирішується підмішуванням прямої води до зворотного)
- У дров'яної піролізний котел не можна організувати автоматичну подачу палива (потрібні великі дрова) разом з тим є пелетні піролізні котли
- Значна частина публікацій про піролізні котли носить яскраво виражений рекламний характер, в результаті сформувані об'єктивне уявлення про них часом проблематично.
-

1.1.4. Аналіз процесу піролізу

Піроліз, або теплова деградація — від «піро» — вогонь, і «лізис» — розчинення означає «розчинення вогнем» (так само «гідроліз», «електроліз») — хімічна реакція, під час якої органічні сполуки розпадаються.

У вузькому сенсі, піроліз — розкладання органічних природних сполук (деревини, нафтопродуктів тощо) за нестачі кисню. Піроліз може визначатися як високотемпературний (750—800 °С) термоліз вуглеводнів, що проводиться за низького тиску і малої тривалості.

У широкому сенсі під піролізом розуміють високотемпературний термоліз органічних сполук. В найширшому розумінні — розкладання будь-яких сполук на складові легші молекули або хімічні елементи під дією підвищеної температури. Так, наприклад, телуководень розкладається на водень і телур вже при температурі близько 0 °С.

Принцип піролізу полягає в тому, що всі складні органічні тіла складаються з ланцюгів молекул (полімерів, наприклад, пластмаси, гума, дерево, папір тощо).

Тепло допомагає зруйнувати цей ланцюжок і створюються менші органічні молекули.

Коли тіла тверді, наприклад, дрова, це часто відбувається таким чином:

- Можливе випаровування вологи (зневоднення).
- Тепло полум'я зменшує молекули і матеріал стає легшим.
- Метан спалюється з киснем повітря.

Насправді, в цьому прикладі описано поєднання і піролізу і згоряння газу. Піроліз підтримує горіння до зникнення органічного тіла. Велику частину часу займає сам піроліз — розкладання матеріалу теплом полум'я, але не в полум'ї.

У промисловості поширення набули трубчасті піролізні реактори. Вони складаються з двох частин, що відрізняються характером теплообміну — радіаційної і конвекційної. Саме у радіаційній секції знаходяться трубчасті реактори піролізу (пірозмійовики), що обігріваються теплотою згоряння подаваного ззовні пального газу у пальниках цієї секції.

В радіаційній секції пірозмійовики обігріваються не безпосередньо полум'ям пальників, а тепловим випромінюванням (радіацією) від факела полум'я і від теплового випромінювання внутрішньої вогнетривкої кладки радіаційної секції установки, що безпосередньо нагрівається полум'ям пальників.

У конвекційній частині установки теплообмін між нагрівальним газом — продуктами горіння відбувається за рахунок конвективного теплообміну. У цій частині установки піролізу відбувається попереднє нагрівання сировини, водяної пари, і нагрівання до температури початку піролізу (600–650 °C). Газу в конвективну частину надходять з радіаційної секції.

Для точного регулювання температури в обох секціях на виході з установки встановлено димосос з регульовальним шиббером для керування витратанням димових газів.

Для енергетичної ефективності піролізні установки додатково обладнують теплоутилізаційними системами — котлами-утилізаторами. Крім нагрівання сировини і водяної пари, що її розбавляє, в конвекційній частині відбувається нагрівання живильної води котла-утилізатора, і далі ця вода використовується для

охолодження продуктів піролізу, сама при цьому підігриваючись. Отримана в результаті часткового випаровування води пароводяна суміш, подається в барабан котла-утилізатора.

У барабані відбувається сепарація пари від рідини. Насичена пара з барабана далі додатково перегрівається в пароперегрівнику цієї ж установки, в результаті виходить перегріта пара середнього тиску, що потім використовується в якості робочого тіла парової турбіни, яка є приводом компресора-нагнітача для сировини піролізу — пірогазу.

В сучасних піролізних установках в конвекційній її частині розташовують поверхні нагріву перегріву насиченої пари до технологічно прийнятної температури (550 °С, при зниженні температури перегрітої пари падає тепловий ККД, за високих температур знижується надійність і безпека установки через зниження міцності конструкційних сталей за високих робочих температур). Ці заходи дозволили підвищити ККД використання тепла в сучасних моделях печей піролізу до 91–93 %.

Для підвищення селективності процесу і виходів продуктів (забезпечення максимального виходу бажаних продуктів реакції і придушення утворення небажаних продуктів реакції) при піролізі час перебування сировини в реакційній зоні — зоні високої температури необхідно скорочувати, а температуру процесу — підвищувати. Такий підхід забезпечує підвищення виходу цільових продуктів піролізу з одночасним зниженням утворення побічних продуктів реакції.

Тому конструктори установок прагнули скорочувати тривалість фази піролізу. У сучасних установках час перегріву сировини і наступного охолодження продуктів складає ~0,2 с, а температура нагріву для реакцій піролізу досягає 870—900 °С.

Проблема швидкого нагрівання-охолодження реакційної суміші за час 0,2 с від ~600 °С до ~1000 °С являє собою складну технічну задачу. Завдання ускладнюється тим, що необхідно враховувати гранично допустиму робочу температуру сучасних хромонікелевих сплавів, — основних конструкційних сталей таких установок, з яких виготовляються реакційні змішувачі. Також, за

високих температур різко підвищується коксоутворення на внутрішніх поверхнях труб з цих сплавів.

Швидке нагрівання-охолодження суміші можна забезпечити або підвищенням перепаду температур між нагрівною поверхнею і сумішшю, або збільшуючи поверхню теплообміну, або оптимізуючи геометрію і розташування теплообмінних поверхонь. У сучасних установках застосовується сполучення всіх підходів. Без збільшення температурного перепаду між стінкою пірозмійовика і паросировинним потоком швидке нагрівання можна забезпечити збільшивши питому поверхню пірозмійовика, тобто поверхню на одиницю витрати паросировинного потоку. Більшість фірм-розробників печей піролізу пішли шляхом конструктивного виконання пірозмійовиків розгалуженими, зі змінним діаметром труб, що входять у пакет змійовика.

Якщо в установках попередніх поколінь пірозмійовик являв собою довгу трубу постійного діаметра, зігнуту на рівні частини (змійовик) для зменшення розмірів печі, то тепер пірозмійовики виготовляють з великої кількості труб (10-20) малого діаметра, які об'єднують у загальні труби на вході суміші і на виході, і, в підсумку, на виході змійовик закінчується 1-2 трубами значно більшого діаметра. У таких пірозмійовиках досягається високий перепад температур на початковій ділянці і низький — на кінці, де висока температура стінки труби небажано викликає високе коксоутворення.

В установках ранніх поколінь пірозмійовики в радіаційній секції орієнтувалися горизонтально, час реакційного контакту в таких печах становив не менше 1,0 с, оптимальна температура піролізу — не вище 800 °С. У наступних поколіннях реакційні труби орієнтують вертикально — труби радіаційної секції пірозмійовиків, що вільно звисають, дозволили застосувати більш жаростійкі, але крихкіші матеріали для виготовлення пірозмійовиків, оскільки при такому розташуванні матеріал труб не зазнає згинальних механічних напружень, а тільки розтягувальні. Це дозволило створити високотемпературні установки з коротким часом перебування потоку сировини в пірозмійовиках.

Для швидкого охолодження суміші, що прореагувала, з метою зберегти термодинамічно нерівноважний стан суміші і запобігання перебігу небажаних вторинних реакцій, на виході з пірозмійовиків встановлюють так звані гартувально-випарні апарати. В їх трубному просторі відбувається швидке охолодження (гарт) продуктів реакції до температур 450—550 °С, за яких швидкість реакцій поліконденсації вуглеводнів дуже мала. В міжтрубному просторі відбувається випаровування котлової води котла-утилізатора, яка, як згадувалася вище, використовується для отримання пари високого тиску.

Коли органічна речовина нагрівається при підвищенні температури у відкритих контейнерах, як правило, відбуваються такі процеси:

- Нижче приблизно 100 ° С летючі речовини, включаючи трохи води, випаровуються. Теплочутливі речовини, такі як вітамін С і білки, можуть частково змінюватися або розкладатися вже на цій стадії.
- При температурі приблизно 100 ° С або трохи вище, вода яка просто вбирається в матеріал, відганяється. Вода, потрапила в кристалічну структуру гідратів, може виходити при дещо більш високій температурі. Цей процес споживає багато енергії, тому температура може перестати підвищуватися до завершення цієї стадії.
- Деякі тверді речовини, такі як жири, воски та цукри, можуть плавитися та відокремлюватися.
- Від 100 до 500 ° С розпадається багато звичайних органічних молекул. Більшість цукрів починає розкладатися при 160-180 ° С. Целюлоза - основний компонент тканин з дерева, паперу та бавовни - розкладається при температурі близько 350 ° С. Лігнін, ще один головний компонент деревини, починає розкладатися при температурі близько 350 ° С, але продовжує випускати летючі продукти до 500 ° С. До продуктів розпаду зазвичай належать вода, оксид вуглецю CO та / або вуглекислий газ CO₂ а також велика кількість органічних сполук. Гази і летючі продукти залишають зразок, і деякі з них можуть знову конденсуватися у вигляді диму. Як правило, цей процес також поглинає енергію. Деякі летючі речовини можуть запалюватися і горіти, створюючи видиме полум'я.

Енергоне залежні залишки, як правило, збагачуються вуглецем і утворюють великі неупорядковані молекули з кольорами від коричневого до чорного. У цей момент, як кажуть, питання було « обвуглене » або « карбонізоване ».

При температурі 200–300 ° С, якщо кисень не був виключений, вуглекислий залишок може почати горіти в сильній екзотермічній реакції, часто без жодного або мало видимого полум'я. Як тільки починається горіння вуглецю, температура підвищується мимовільно, перетворюючи залишок у світиться вугілля і виділяючи вуглекислий газ та / або монооксид.

На цій стадії частина азоту, що залишився в залишку, може бути окислена в оксиди азоту. На цій стадії сірка та інші елементи, такі як хлор та миш'як, можуть окислюватися та спалюватися. Після закінчення горіння вуглекислого залишку часто залишається порошкоподібний або твердий мінеральний залишок (зола), що складається з неорганічних окислених матеріалів з високою температурою плавлення. Деякі золи, можливо, залишилися під час горіння, захоплені газами у вигляді золи або викидів частинок. Метали, присутні в вихідній речовині, зазвичай залишаються в золі як оксиди або карбонати, наприклад, калій. Фосфор з таких матеріалів, як кістка, фосфоліпіди та нуклеїнові кислоти, зазвичай з Термічне очищення

Піроліз також використовується для термічного очищення, промислового застосування для видалення органічних речовин, таких як полімери, пластмаси та покриття з деталей, виробів або виробничих компонентів, таких як гвинти екструдера, спінерети та статичні змішувачі.

Під час процесу термічного очищення, при температурі від 310 ° С до 540 ° С (600 ° F до 1000 ° F), органічний матеріал перетворюється піролізом

Та окисленням в летючі органічні сполуки, вуглеводні та вуглекислий газ. Неорганічні елементи залишаються.

У піролізі використовується кілька типів систем термічного очищення:

Розплавлені соляні ванни належать до найдавніших систем термічного очищення за допомогою розплавленої соляної ванни відбувається дуже швидко, але передбачає ризик виникнення небезпечних бризок або інших потенційних

небезпек, пов'язаних із застосуванням соляних ванн, як вибухи або високотоксичний ціаністий водень.

Системи з псевдозрідженним шаром використовують пісок або оксид алюмінію в якості нагрівального середовища; ці системи також очищаються дуже швидко, але середовище не плавиться і не кипить, не виділяє парів і запахів; процес очищення займає одну-дві години.

Вакуумні печі використовують піроліз у вакуумі, уникаючи неконтрольованого горіння всередині очисної камери; процес очищення займає від 8 до 30 годин.

Печі, що випалюються, також відомі як печі для термоочищення, піддаються газовому виконанню і використовуються в малярній, покривній, електродвигунах і пластмасовій промисловості для видалення органіки з важких і великих металевих деталей залишається як фосфати.

1.1.5. Піроліз деревини

Піроліз — перша [1] стадія горіння деревини. Усім знайомі язики полум'я на палаючих дровах, сучках у вогнищі утворюються за рахунок горіння не вуглецю самої деревини, а газів — летких продуктів піролізу. При піролізі деревини (450—500 °C) утворюється дуже багато різних речовин, найбільші концентрації в газоподібних продуктах піролізу мають: метиловий спирт (тому метанол носить застарілу назву «деревний спирт»), оцтова кислота, ацетон, бензол, фуран тощо.

Нелеткі продукти неповного піролізу — рідкі та пастоподібні смоли, (дьоготь). Кінцевим продуктом повного піролізу деревини є майже чистий вуглець — деревне вугілля.

Цей процес використовується в піролізних котлах. Процес газифікації деревини (піроліз) відбувається у верхній камері котла (завантажувальному просторі) під дією високої температури і при обмеженому доступі повітря. Утворені при цьому процесі гази проходять через зону високих температур, досягають короби вихідного пристрою і змішуються з вторинним повітрям.

На основі процесу піролізу деревини (найчастіше трісок вільхи) відбувається копчення різних харчових продуктів. Правильніше назвати цей процес частковим окисленням або окислювальним піролізом, оскільки він йде з обмеженим доступом повітря.

Існують проекти знищення побутового сміття за допомогою піролізу. Труднощі з організацією піролізу шин, пластмас і інших органічних відходів не пов'язані з технологією власне піролізу, яка не відрізняється від технології термічної переробки інших твердих матеріалів. Проблема полягає в тому, що в більшості відходів міститься фосфор, хлор та сірка. Сірка і фосфор в окисленій формі леткі і наносять шкоду навколишньому середовищу. Хлор активно реагує з органічними продуктами піролізу з утворенням стійких отруйних сполук (наприклад — діоксинів). Уловлювання цих сполук з диму — процес дорогий і має свої складності.

Проблема переробки зношених автомобільних шин і гумотехнічних виробів має велике екологічне і економічне значення для всіх розвинених країн світу. А невідновлюваність природної нафтової сировини диктує необхідність використання вторинних ресурсів з максимальною ефективністю, тобто замість гір сміття можна було б розвинути нову галузь промисловості — комерційну переробку відходів.

Шини і полімери являють собою цінну сировину, в результаті їх переробки методом низькотемпературного піролізу (до 500 °C), виходять рідкі фракції вуглеводнів (синтетична нафта), вуглецевий залишок (технічний вуглець), металокорд і горючий газ. У той же час, якщо спалити 1 т шин звичайним способом, то в атмосферу буде викинуто 270 кг сажі та 450 кг токсичних газів.

1.2. Опис технологічного процесу обігріву з використанням піролізного котла

Технологічна схема електромеханічної системи автоматизації піролізного котла зображена на рис.1.2

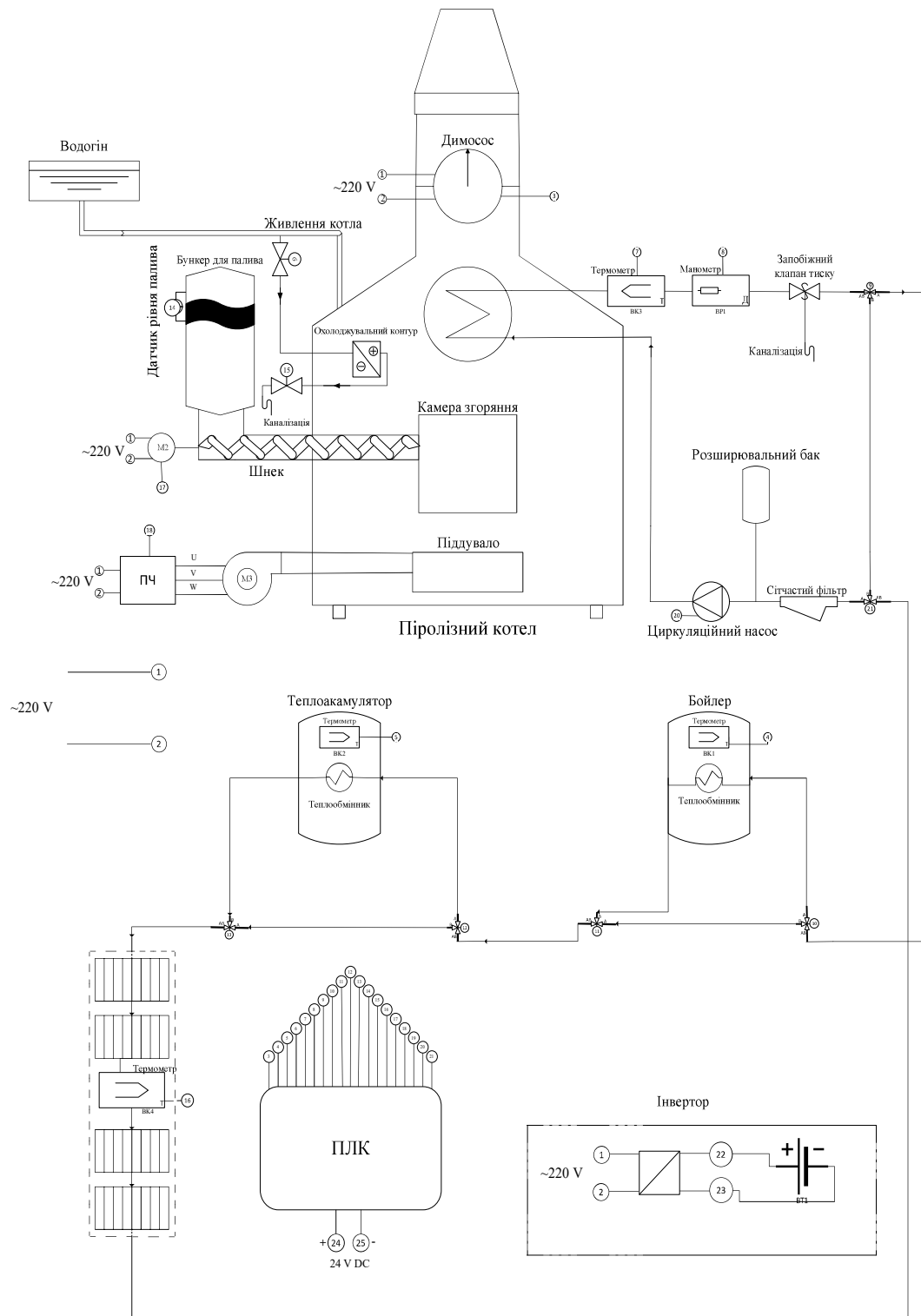


Рисунок 1.2 – Технологічна схема система опалення

Опис компонентів схеми:

1) **Камера згоряння** – призначена для спалювання палива (пелети) для отримання тепла.

2) **Піддувало** – отвір через який нагнітаючий вентилятор вдуває повітря необхідне для ефективного процесу горіння.

3) **Теплообмінник** – водяний кожух, через який протікає вода для нагрівання.

4) **Димосос** – пристрій необхідний для створення необхідної тяги для процесу горіння.

5) **Охолоджувальний контур** – окремий водяний кожух, не пов'язаний з системою опалення але щільно розташований до теплообмінника. Необхідний у випадку аварійних ситуаціях, таких як перегрів котла, наприклад коли паливо в котлі ще залишилось, а електроенергія відключена, циркуляційний насос не функціонує (вода не циркулює) і котел гріє «сам себе», від цього стрімко піднімається температура. І щоб котел не закипів і не пошкодився вода яка знаходиться в охолоджувальному контурі (вже нагріта) скидається в каналізацію, а замість неї з системи водопостачання поступає холодна вода, яка зменшує температуру води в котлі і запобігає надмірному тиску і розриву котла.

6) **Бункер для палива та шнек** – система яка забезпечує автоматичне завантаження камери згоряння котла без участі людини (окрім завантаження бункеру).

7) **Циркуляційний насос** – насос призначений для перекачування води в системі опалення. Покращує циркуляцію та тепловіддачу.

8) **Розширювальний бак** – захисний пристрій, необхідний у випадку збільшення тиску води в системі.

9) **Сітчастий фільтр** – захисний пристрій призначений для захисту елементів системи опалення (насосів, клапанів, кранів) від частинок які можуть завадити їхній роботі.

10) **Термометр** (термопара) – датчик необхідний для контролю температури води в системі опалення.

11) **Датчик тиску** (тензометр) – датчик необхідний для контролю тиску води в системі опалення.

12) **Запобіжний клапан тиску** – захисний клапан, необхідний у випадку коли тиск системи перевищує максимальний допустимий. Скидає воду в каналізацію.

13) **Водогін** – котел та система гарячого водопостачання підключена до системи холодного водопостачання для регулювання рівня води та для охолоджувального контуру.

14) **3-ходовий клапан з приводом** – пристрій призначений для розподілу потоку води. Має вхід АВ, та два виходи А та В. Перемикання відбувається за допомогою приводу встановленого на клапан.

15) **Бойлер** – пристрій який складається з бочки в якій знаходиться вода, що нагрівається, та теплообмінника (змієвика) через який протікає гаряча з системи опалення.

16) **Теплоакумулятор** – пристрій схожий будовою на бойлер описаний вище, але має більший об'єм (зазвичай 500 або 1000 літрів) та ізольований краще. Необхідний для ефективної роботи піролізних котлів.

17) **Батареї опалення** – теплообмінники розташовані в приміщенні, призначені для обігріву.

18) **ПЛК** – (програмований логічний контролер) пристрій призначений для автоматичного управління робочими органами системи (клапанами, реле, двигунами).

19) **Інвертор** – пристрій призначений для автономного живлення системи опалення у випадку відсутності електропостачання під час аварій (погодних катаклізмів, ремонт системи електропостачання).

1.3. Формулювання вимог до електроприводу, систем автоматичного керування та автоматизації

Забезпечення 3 режимів роботи котла:

1) Розпалювання котла – крани YA1 і YA4 закриті, це потрібно для того щоб котел спочатку нагрів об'єм води в собі, а потім вже саму систему, а також щоб котел не досягав точки роси. Обігрів по малому колу пришвидшує процес нагрівання всієї системи та економить паливо. Вентилятор та димосос ввімкнуті, паливо подається через шнек в ручному режимі.

2) Робочий режим – котел набрав робочу (задану температуру), крани YA1 і YA4 відкриті, насос M1 ввімкнутий, крани YA3 та YA5 закриті доки температура в будинку не досягне заданої. Після досягнення температури в будинку крани YA3 та YA5 відкриваються і тоді теплоносії протікає через бойлер через акумулюючу ємність. Це потрібно для ефективної роботи піролізного котла. Адже ККД котла буде високим лише у випадку непереривної роботи.

3) Режим енергозберігання – цей режим актуальний в той момент коли вода в акумулюючій ємності нагрілась, і тоді подача повітря в котел зменшується і нагріта вода береться з тепло батареї, а не з котла. Також ця ємність стане в нагоді в випадку коли паливо закінчилось і котел затух, адже запасів гарячої води з цієї ємності вистачить на певний час для опалення.

1.4. Вимоги до системи автоматизації

1) Реалізація резервного живлення за допомогою інвертора та акумулятора дозволить у випадку відключення живлення мережі продовжити функціонування системи.

2) Датчик тиску. Котел підключений до системи живлення холодною водою, при малому рівні система докачає потрібну кількість води, а при великому тиску клапан відкриється і скине лишню воду.

3) Датчик температури. При досягненні критичної температури вода з охолоджуючого контуру (гаряча) скинеться в каналізацію, а на її місце закачається холодна, що забезпечить швидке та безпечне охолодження котла в аварійній ситуації.

4) Керування тягою за допомогою нагнітаючого вентилятора та димососа.

5) Керування обертами нагнітаючого насоса для регулювання температурою.

6) Керування шнеком для ефективної витрати палива.

2. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВИБІР ПІРОЛІЗНОГО КОТЛА

2.1. Розрахунок потужності та вибір двигунів.

Завданням дипломної роботи є вибір котла та автоматизації процесу обігріву житлового будинку площею 200 квадратних метрів. Було обрано котел фірми Rojek, а саме котел КТР 25 Pellet, який зображено на рис.2.1



Рисунок 2.1 – Піролізний котел КТР 25 Pellet

Діапазон потужності котла 5.3 – 25 кВт. Для приміщення площею 200 кв.м. при стандартному споживанню енергії на 1 кв.м. в 100 Вт, необхідний котел з номінальною потужністю в 20 кВт, отже наш котел для нашого завдання підходить. Котел комплектується бункером з шнеком та пальником для опалення пеллетами.

У табл.2.1 зображено детальні характеристики котла КТР 25 Pellet.

Таблиця 2.1 – Характеристики котла КТР 25 Pellet

Водний обсяг котла	109 л
Максимальна робоча температура	90 °C
Витрати палива при номінальній потужності	6,2 кг/год
Обсяг завантажувального бункера	300 л
Діапазон потужності	5,2-25 кВт
Робочий тиск	0,5-2 бар

2.1.1. Вибір циркуляційного насосу:

Витрата (об'ємна подача) розраховується за такою формулою [2]:

$$Q = \frac{\Phi \cdot 0.86}{T_F - T_R} = \frac{20 \cdot 0.86}{80 - 60} = 0.86 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

0.86 – коефіцієнт теплоємності води;

Q - об'ємна витрата, м³ / год;

Φ - потрібна теплова потужність, кВт;

T_F - температура в прямому трубопроводі, ° C;

T_R - температура в зворотному трубопроводі, ° C;

Потрібну теплову потужність визначаємо по табл.2.2 [3] (при максимальних теплових втратах = 100 Вт / м²):

Таблиця 2.2 – Вибір теплової потужності, кВт

S _{от} , м ²	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
Φ, кВт	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0	22,0	24,0	26,0	28,0	30,0	32,0	34,0	36,0

Наступним кроком при підборі насоса буде визначення необхідного напору (тиску) в трубопроводі - опір, яке насос повинен подолати при нагріванні води в трубах. Висота всмоктування насоса Н визначається наступною формулою:

$$H = \frac{1.3 \cdot (R_1 \cdot L_1 + R_2 \cdot L_2 + Z_1 \cdot Z_2 + \dots + Z_n)}{10000}$$

де: R_1, R_2 – втрати тиску в подаючому і зворотному трубопроводах (Па / м);

L_1, L_2 – довжина подаючого та зворотного трубопроводів, м;

Z_1, Z_2, Z_n – окремі опори, Па.

Значення окремих опорів [4] можна знайти в технічних вимогах виробників на використовувані вироби. Наприклад:

- 1) Котел: 1-5 кПа;
- 2) Теплообмінник: 10-20 кПа;
- 3) Радіаторна батарея: 0.5 кПа;
- 4) Регулюючий клапан: 10-20 кПа;
- 5) Фільтр (чистий): 15-20 кПа;

З наведених даних знайдемо величину H . Рекомендовані втрати в трубах - не більше 105 Па / м. Площа приміщення 200 кв.м. отже прийемо, що сторони будівлі 20*10 метрів, отже довжина трубопроводу складає 60 метрів.

$$L_1, L_2 = 60, 60 \text{ м};$$

$$R_1 = 60 \cdot 150 = 6300 \text{ Па};$$

$$R_2 = 60 \cdot 150 = 6300 \text{ Па};$$

Звідси:

$$H = \frac{1.3 \cdot (6300 \cdot 60 + 6300 \cdot 60 + 1000 + 50 + 12 \cdot 10000)}{10000} = 11.4 \text{ м.вод.ст.} = 1.1 \text{ бар}$$

По розрахованим даним обираємо насос [5] TOP-S WILO 25/7 DM, основні технічні характеристики якого вказані в табл.2.3.

Таблиця 2.3 – Основні технічні характеристики TOP-S WILO 25/7 DM

Висота подачі	7 м
Продуктивність	8 л/хв
Тиск	10 бар
Живлення	200 В

2.1.2. Вибір димососу та нагнітаючого вентилятора

Підбір димососа [6] виконують на основі проектно-технічної документації котельної: використовують дані аеродинамічних характеристик котла і повітряного тракту, враховують режим роботи котельної, тип палива і необхідність підтримання розрідження в топці котла 20-40 Па (залежить від індивідуальних особливостей котлоагрегату).

Продуктивність димососа можна розрахувати по формулі:

$$Q = \frac{1.05 \cdot B \cdot V \cdot T}{273}$$

Де , **B** – витрата палива, кг/год;

V – питома вага вихідних газів;

T – Температура вихідних газів;

Звідси:

$$Q = \frac{1.05 \cdot 6.2 \cdot 21.7 \cdot 190}{273} = 98.3 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

Знайдемо потужність димососа:

$$N = \frac{Q \cdot \Delta P}{3600 \cdot \mu} \cdot 10^3$$

Q – продуктивність, $\frac{\text{м}^3}{\text{год}}$;

ΔP – гідравлічний напір, Па;

μ – ККД димососа;

Звідси:

$$N = \frac{98.3 \cdot 1.7}{3600 \cdot 0.75} \cdot 10^3 = 61.9 \text{ Вт}$$

Виберемо димосос по розрахованим параметрам G2E-180-GV82, основні характеристики [7] якого наведені в табл.2.4

Таблиця 2.4 – Параметри димососа G2E-180-GV82

Напруга живлення	230 В/50 Гц
Потужність двигуна	65 Вт
Максимальний тиск	520 Па
Максимальна продуктивність	340 м ³ /год
Температура перекачувальних газів	Понад +250°C

Вибір нагнітаючого вентилятора здійснюється за потужністю котла та за необхідною кількістю подачі повітря. Відповідно інформації [8], для котла потужністю 25 кВт необхідний нагнітаючий вентилятор який забезпечить подачу повітря у кількості 180 м³/год, що показано в табл.2.5

Таблиця 2.5 – Таблиця підбору вентиляторів

Потужність котла, кВт	Максимальна кількість повітря, м куб .
10 - 20	150
25	180
35	220
50	280
75	400

Виберемо нагнітаючий вентилятор [9] ВЦУН 140х74-0,25-4 який повністю задовольняє критерії вибору. Основні характеристики нагнітаючого вентилятора наведені в табл.2.6.

Таблиця 2.6 – Основні характеристики нагнітаючого вентилятора

Напруга живлення, В/Гц	380/50
Потужність, Вт	250
Струм статора, А	0.8
Продуктивність, м3/год	450
Кількість обертів, об/хв	1350
Рівень шуму, дБ	60
Захист	IP54

2.2. Розрахунок та вибір елементів системи автоматизації (клапани, вентилі, датчики тощо)

1) Для забезпечення певних режимів роботи системи, а саме під час розпалювання котла, або під час режиму енергозберігання, необхідно спрямовувати потік нагрітої води від котла у правильному напрямку до певних споживачі в конкретному режимі. Це можна реалізувати за допомогою 3 ходових клапанів, які мають 3 робочі отвори (2 входи і 1 вихід, або 1 вхід і 2 виходи). За допомогою клапанів можна об'єднувати або розділяти потік. В нашому випадку необхідний клапан який буде розділяти потік, тобто матиме 1 вхід та 2 виходи.

Необхідною умовою для вибору клапану є можливість встановлення на нього приводу для автоматичного відкривання або закривання, та робота в умовах високих температур (до 90 °С). Було обрано 3-ходовий клапан [10] Honeywell VCZMP6000 з можливістю встановлення на нього приводу [11] Honeywell VC 24B SPST.

Детальні характеристики наведені в табл.2.7

Таблиця 2.7 – Технічні характеристики 3-ходового клапану та приводу

3-ходовий клапан Honeywell VCZMP6000	
Температура теплоносія, °C	1-95
Робочий тиск, МПа	2
Пропускна здатність клапану, м3/год	7.7
Матеріал	бронза
Привід для клапану Honeywell VC 24B SPST	
Час спрацювання, с	7
Живлення, В	24 DC
Керування	2 точки
Керуючий сигнал	SPST

2) Для можливості контролю рівня палива в бункері та наближеного розрахунку витрати палива необхідно встановити датчик рівня. Датчик рівня має працювати в умовах запиленості, неоднорідності рівня речовини, не мати контакту з речовиною, не мати обертових частин. Для поставленого завдання ідеально підходить ультразвуковий рівнемір серії EAX. Детальні характеристики наведені в табл.2.8

Таблиця 2.8 – Характеристики ультразвукового рівнеміра EAX

Висота вимірювання, м	12
Напруга живлення, В	7-30 DC
Потужність, Вт	0.5
Аналоговий вихід	4-20 мА, HART
Точність вимірювань, %	±0.25
Температура середовища, °C	-40...+70
Захист	IP67

3) Важливим елементом системи є термометр, адже саме за температурою відбувається зворотній зв'язок в системі. Температура вимірюється для

забезпечення захисту системи від закипання, та для забезпечення необхідних робочих процесів. Необхідною умовою вибору датчика температури є можливість підключення до ПЛК, та діапазон вимірювальних температур від +5 до +100°C. Було обрано датчик температури Honeywell M10 + M8 L, який повністю задовольняє поставлені умови.

4) Для керування силовими частинами системи, а саме насосами та вентиляторами необхідна допоміжна апаратура для вмикання двигунів напругою 220 В від 24 В. Тобто необхідно обрати проміжне реле. По заданим критеріям для системи підходить проміжне реле IEK OIR11616A24BAC/DC, детальні характеристики якого наведені в табл.2.9

Таблиця 2.9 – Проміжне реле IEK OIR11616A24BAC/DC

Номінальний струм, А	16
Номінальна напруга	230V AC/ 24V DC
Напруга живлення	24 В AC/DC
Кількість контактів	1 перемикаючий

2.3. Проектування силової частини перетворювача

На базі аналізу [12] технічних даних актуальних перетворювачів частоти популярних іноземних фірм, таких як Siemens, ABB, Mitsubishi і ін., можливо визначити відповідні спільні вимоги, що пред'являються покупцем для перетворювальних приладів асинхронних електроприводів:

- напруга живлення – ~380 V, 50 Hz або ~220 V, 50 Hz;
- вихідна частота 0...400 Hz.

Методи регулювання, що реалізовані перетворювачем:

- стандартне частотне керування з квадратичною або лінійною U/f характеристикою з можливістю IR-компенсації та компенсації ковзання;
- бездавачеве векторне керування;

- векторне керування з давачем швидкості.

В базовій версії електропривод має забезпечувати наступні початкові можливості:

- дискретні гальванічно-розв'язані входи – 6;
- аналогові входи $0...10\text{ В}$ – 1 канал, $4...20\text{мА}$ – 1 канал;
- аналоговий вихід $0...10\text{ В}$;
- релейні виходи – 2;
- інтерфейс верхнього рівня RS-485, CAN;
- влаштований ПД-регулятор технологічного параметру;
- ключ-клампер для низьких потужностей ($>15\text{ кВт}$);
- спроможність під'єднання енкодера;

Звичайна функціональна схема актуального електроприводу змінного струму, побудованого на базі перетворювача частоти з ланкою постійного струму, зображена на рис.2.2. Як видно з рис.2.2 базову частину асинхронного електроприводу містить перетворювач частоти, який з'єднує в собі перетворюючий і керуючий прилад з традиційного визначення електроприводу. Через це дуже часто перетворювачі частоти називають електроприводами, але в загальному випадку це неправильно.

В звичайному перетворювачі можливо відзначити 2 головні елементи: силову частину, в склад якої входить клампер, вхідний фільтр, інвертор, некерований випрямляч, ємність фільтра випрямляча, датчик напруги ланки постійного струму, датчик вихідного струму, зарядний коло, схеми драйверів і гальванічної розв'язки сигналів управління ключами інвертора і клампера, блок живлення; керуючий контролер, до складу якого входять цифровий контролер, який, як правило, ґрунтується на цифровому сигнальному процесорі, і схеми узгодження сигналів.

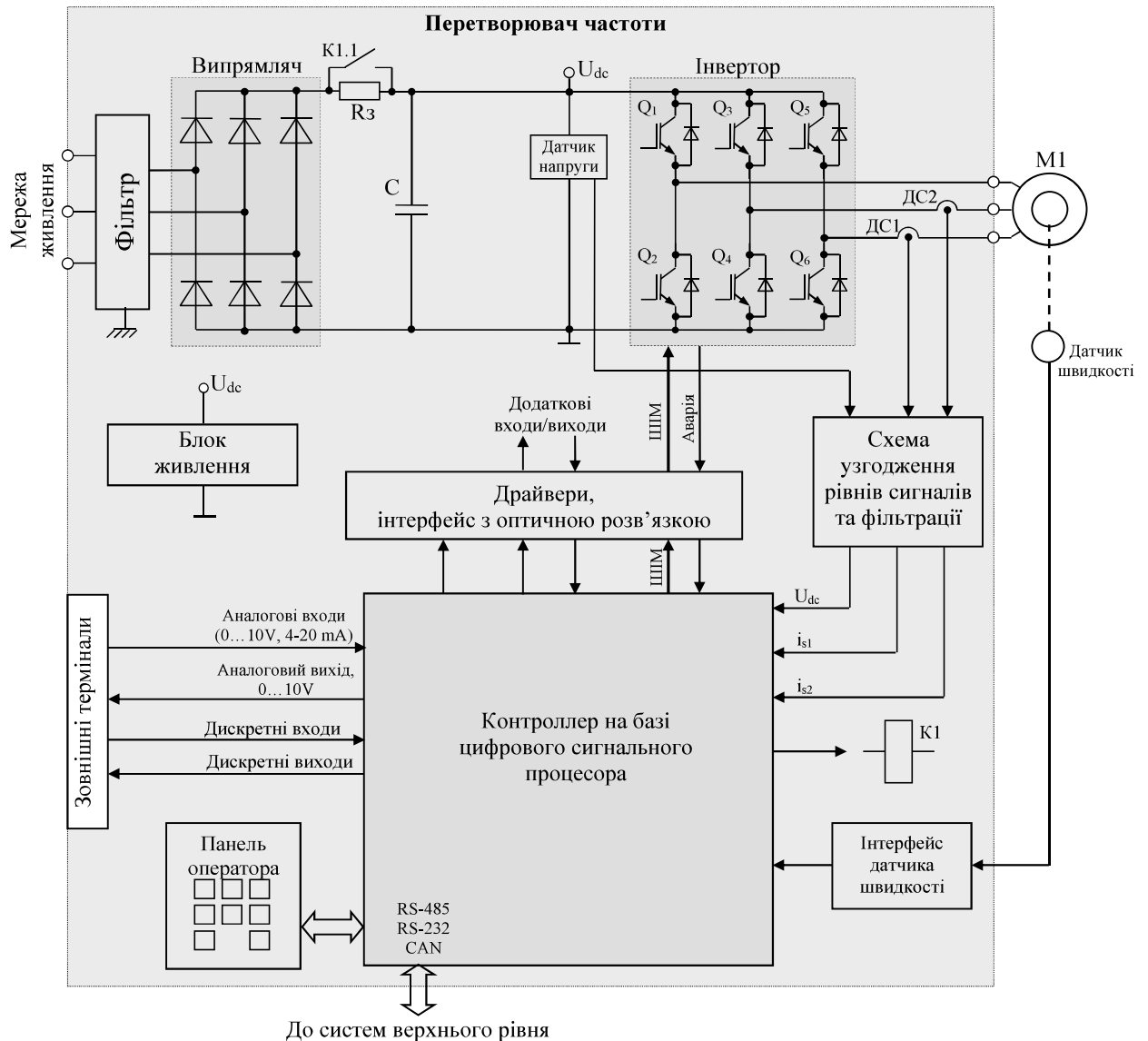


Рисунок 2.2 - Функціональна схема асинхронного електроприводу

Детальний опис загальних модулів та елементів, показаних на рис.2.2.

Фільтр – зазвичай об'єднує в собі 2 основні складові: фільтр завад, який запобігає розповсюдженню в мережу живлення високочастотних завад, які виникають при комутації ключів інвертора та варистори для запобігання перенапругам в ланці постійного струму через сплески напруги мережі живлення.

Випрямляч – трансформує змінну напругу мережі живлення в постійну напругу ланки постійного струму U_{dc} .

Ємність C – фільтр, потрібний для згладжування випрямленої напруги на виході випрямляча.

Зарядне коло (резистор R_z та реле $K1$) – необхідне для поступового зарядження ємності фільтру випрямляча C при подачі живлення на перетворювач. При завершенні заряду контакт реле $K1.1$ замикається.

Клампер – прилад, необхідний для стабілізації напруги в ланці постійного струму під час генераторних режимів роботи двигуна, які характерні рекуперацією енергії в ланку постійного струму.

Датчик напруги – передає в керуючий контролер необхідну інформацію про напругу ланки постійного струму U_{dc} , отримане значення використовується для контролю заряду ємності фільтру випрямляча, забезпечення захисних функцій, та генерації імпульсів для керування ключами інвертора по законам широтно-імпульсної модуляції.

Інвертор – необхідний для перетворення постійної напруги ланки постійного струму в необхідне значення трифазної напруги на виході перетворювача.

Датчики струму ДС1, ДС2 – передає інформацію в керуючий контролер для організації зворотних зв'язків в системах векторного керування, а саме значення фазних струмів двигуна, де вони використовується для організації захисних функцій двигуна та інвертора.

Датчик швидкості – призначений для вимірювання контролером кутової швидкості (положення) з метою організації зворотних зв'язків та захисних функцій.

Драйвери – необхідні для отримання параметрів від контролера, а саме імпульсів керування силовими ключами, для надійного відкривання та закривання IGBT ключів. Тобто драйвери використовуються для підсилення сигналів. Також драйвери можуть захищати від струмів короткого замикання інвертора.

Опторозв'язки – необхідні для реалізації гальванічної розв'язки дискретних сигналів управління для підвищення завадозахищеності контролера, та для запобігання його поломки в аварійних режимах. Реалізований з використанням оптопар, або ж оптоволоконних ліній зв'язку у перетворювачах великої потужності.

Керуючий контролер – необхідний для автоматичного виконання та

отримання завдання на регульовані координати, здійснює комунікації з системами верхнього рівня, генерує імпульси керування ключами, розраховує алгоритм керування двигуном, реалізує захисні функції.

Схеми узгодження рівнів сигналів та фільтрації – використовується для того щоб привести рівень сигналів, які отримуються від датчиків струму та напруги до рівня необхідної входної напруги АЦП керуючого контролера. Фільтрація використовується для підвищення завадостійкості системи керування.

Інтерфейс датчика швидкості – дає можливість підключати до контролера фото-імпульсні датчики різних типів апаратних інтерфейсів. Містить гальванічну розв'язку.

Блок живлення – прилад необхідний для живлення перетворювача: живлення драйверів, контролера, лінії +10 В та +24 В, живлення датчиків та ін. В сучасних перетворювачах входна напруга власних потреб підключена до ланки постійного струму, це дозволяє виконати безпечну зупинку системи при зникненні напруги мережі живлення.

Зовнішні термінали – необхідні для під'єднання до перетворювача дискретних входів/виходів та аналогових входів/виходів.

Панель оператора – потрібна для налаштування параметрів системи, подачі команд перетворювача та завдання на регульовану величину в ручному режимі, спостереження за контрольними величинами та для діагностики.

Додаткові входи виходи – використовуються для керування додатковими системами.

Операції які опрацьовує контролер в електроприводі змінного струму визначають вимоги до його апаратної та програмної частини та умовно діляться на наступні групи:

функції керування – містять формування імпульсів керування ключами інвертора, розрахунок алгоритму керування двигуном, розрахунок регуляторів технологічних параметрів і т.д. Функції керування виконуються в режимі реального часу, тому швидкодія процесорного пристрою має бути високою. Також до функцій керування можна віднести вимірювання та обробку сигналів зворотних

зв'язків;

функції автоматизації – включають в себе керування елементами перетворювача, виконання захисних функцій, формування станів дискретних виходів та аналогових сигналів, отримання та обробка команд по каналах дискретних входів або від інших систем, аналіз сигналів від зовнішніх аналогових входів;

функції інтерфейсу – це обмін інформацією з пультом керування та системою верхнього рівня.

Враховуючи вимоги до сучасних електроприводів та функцій керуючого контролера, можна визначити типову функціональну схему представлену на рис. 2.2 На рисунку 2.3 виділено частину сірим кольором, вона містить модулі, необхідні для керування електромеханічними системами.

Ядро контролера – опрацьовує всі обрахунки та обробку даних.

Енергонезалежна пам'ять програм – в неї записана програма згідно якої працює керуючий контролер. Зазвичай ця пам'ять є недоступною для користувача.

Оперативна пам'ять – в ній зберігаються робочі дані, необхідні лише в певний момент часу, такі як значення змінних системи та інша оперативна інформація. Інформація з оперативної пам'яті втрачається після відключення живлення від контролера.

Енергонезалежна пам'ять параметрів – необхідна для збереження налаштувань системи, які здійснюються кінцевим користувачем.

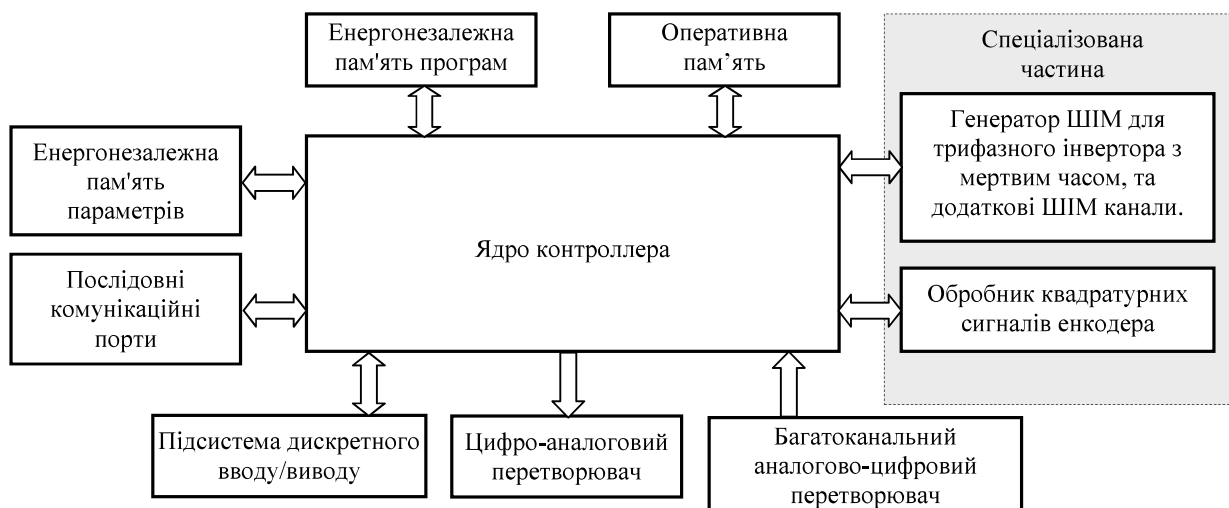


Рисунок 2.3 - Типова функціональна схема керуючого контролера

Генератор ШІМ трифазного інвертора – необхідний для формування шести імпульсів керування силовими ключами інвертора, імпульси формуються у вигляді трьох компліментарних пар. Імпульси кожної пари мають регульований «мертвий час».

Додаткові ШІМ канали – використовуються для керування ключем клампера.

АЦП – використовується для перетворення аналогової інформації, яка надходить від датчиків у форму можливу для обробки контролером.

Цифро-аналоговий перетворювач (ЦФП) – зазвичай необхідний для організації аналогового виходу з перетворювача частоти.

Підсистема дискретного вводу/виводу – ряд дискретних входів/виходів для реалізації необхідних функцій автоматизації, як внутрішніх так і зовнішніх.

Послідовні комунікаційні порти – забезпечують апаратну підтримку інтерфейсних функцій керуючого контролера.

Для того щоб виконати розрахунок елементів перетворювача частоти потрібно мати значення таких параметрів: потужність двигуна, напруга та кількість фаз мережі живлення, номінальний струм двигуна, ККД двигуна.

Виконаємо розрахунок силової частини перетворювача частоти для двигуна 4AA63A4Y3 з параметрами, наведеними у Таблиці 2.10 , який приводить в рух вентилятор.

Таблиця 2.10 – Паспортні дані двигуна 4AA63A4Y3

Номінальна потужність	$P_{2n} = 0.25 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380 \text{ В}$
Номінальний струм двигуна	$I = 0.8 \text{ А}$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.68$
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0.65$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$

Номінальні значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = 219 \text{ В},$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3U_n \eta \cos(\varphi)} = \frac{250}{3 \cdot 219 \cdot 0.68 \cdot 0.65} = 0.86 \text{ А}$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2}U_n = \sqrt{2} \cdot 219 = 309.7,$$

$$I_{na} = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 0.86 = 1.22 \text{ А}$$

Максимальне значення струму в фазі двигуна визначається перевантажувальною здатністю електроприводу k_{ov1} , яка, в загальному випадку залежить від конкретного типу механізму і дорівнює $k_{ov1} = (1.1 \div 1.3)$ для турбомеханізмів, $k_{ov1} = (1.4 \div 2)$ – для екструдерів, конвеєрів, підйомно-транспортних механізмів, $k_{ov1} = (2 \div 3)$ – для високо-динамічних застосувань, таких як роботи, приводи подачі та інші.

Обравши перевантажувальну здатність для приводу вентилятора $k_{ov1} = 1.2$, розрахуємо максимальний струм на виході перетворювача :

$$I_{\max} = k_{ov1} I_{na} = 1.2 \cdot 1.22 = 1.46 \text{ А}$$

При живленні перетворювача від однофазної мережі живлення $U_{\text{grid}} = 220 \text{ В}$, напруга в ланці постійного струму при ідеальній фільтрації буде рівною:

$$U_{dcn} = \sqrt{2}U_{grid} = 311 \text{ В}$$

При виборі IGBT-транзисторів для автономних інверторів напруги їх максимально допустима напруга колектор-емітер має бути мінімум в 1.5 разів вищою, ніж максимальна напруга в ланці постійного струму, тобто:

$$U_{ce} > 1.5U_{dc \max}$$

Максимальна напруга в ланці постійного струму актуальних перетворювачів частоти визначається допустимою напругою електролітичних конденсаторів, і складає приблизно 375 В для перетворювачів з однофазним живленням $U_{grid} = 220\text{В}$

$$U_{ce} = 1.5 \cdot 375 = 562.5 \text{ В}$$

IGBT-транзистори, що виготовляються сучасними підприємствами, мають стандартний ряд максимальних напруг колектор-емітер: 250, 600, 1200, 1700, 3300, 4500, 6500 В.

$$I_c > I_{\max}, U_{ce \max} > U_{ce},$$

Де I_c та $U_{ce \max}$ – відповідно тривалий струм колектора та напруги колектор-емітер, що вказані в паспорті IGBT. Необхідною умовою є наявність антипаралельного діода, що в багатьох випадках вбудований в єдиний корпус із транзистором і його не потрібно розраховувати.

Щоб виконати побудову силової частини перетворювача частоти можна використовувати IGBT-модулі, вони містять в одному корпусі до 6 або 7 транзисторів з антипаралельними діодами та вбудованим випрямлячем.

Оберемо по каталогу [13] IGBT-модуль типу SK 9 BGD 065 ET з параметрами $U_{ce} = 600 \text{ В}$, $I_c = 6 \text{ А}$.

Ємність випрямляча можна визначити за формулою:

$$C = \frac{1}{2\pi k_p m f R_0}$$

Де k_p – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги, який для перетворювачів частоти вибирають в діапазоні $(0.02 \div 0.05)$, m – число фаз випрямляча, f – частота напруги мережі живлення, R_0 – еквівалентний опір навантаження ланки постійного струму.

Для визначення R_0 потрібно розрахувати значення струму ланки постійного струму з врахуванням перевантаження:

$$I_{dc} = \frac{k_{ovl} P_n}{U_{dc} \mu_{inv}} = \frac{1.2 \cdot 250}{311 \cdot 0.68 \cdot 0.96} = 1.47 \text{ А}$$

Де $\mu_{inv} = (0.97 \div 0.97)$ – коефіцієнт корисної дії інвертора напруги.

Тепер розрахуємо еквівалентний опір навантаження:

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}} = \frac{311}{1.47} = 211.56 \text{ Ом}$$

Тоді розрахункове значення ємності фільтра для $k_p = 0.04$ буде дорівнювати:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 0.04 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 211.56} = 125 \text{ мкФ}$$

Обираємо по каталогу конденсатор типу [14] E81D551VSN131MQ50T ємністю

$C = 130 \text{ мкФ}$ та максимальною напругою 550 В.

Вибір датчиків струму здійснюється за максимальним струмом, але його необхідно виміряти, а саме щоб вимірювальний діапазон датчика був більшим ніж максимально допустимий струм. Для того щоб вимірювати струми на виході перетворювача частоти необхідно використати значення максимального струму.

Щоб керувати координатами двигунами використовують методи, що не вимагають організації зворотних зв'язків, а вимірювання струму відбувається лише для того щоб захистити систему, тому для зниження вартості перетворювача частоти, датчики на вході інвертора можна не встановлювати і обмежитись лише датчиком струму на ланці постійного струму.

Обрати датчик струму можна по значенню I_{dc} . Обираємо датчик струму [15] типу Epistar MIS-345, номінальний струм якого складає 5А, діапазон вимірювань $0 \div 5\text{А}$.

Канал для вимірювання напруги ланки постійного струму можна побудувати з використанням датчика [16] типу LV 100-400, схема підключення якого показана на рис.2.4. Також потрібно обрати резистор для обмеження струму первинного кола. Але обраний датчик напруги вже має вбудований резистор, тому підбирати нічого не потрібно.

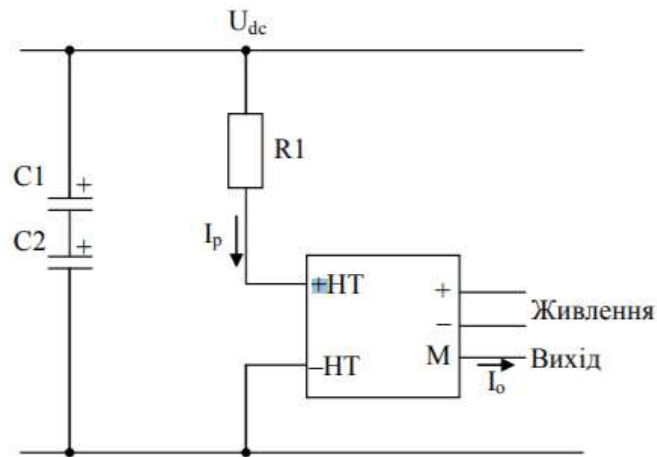


Рисунок 2.4 – Схема підключення датчика напруги

2.4. Обґрунтування та вибір ПЛК

Для виконання поставленого завдання необхідно обрати ПЛК для автоматизації всіх процесів. Зробити це можна визначивши кількість необхідних входів/виходів. Відповідно для нашої системи необхідно 12 аналогових входів для підключення: 4 датчиків температури, 1 датчику тиску та 1 датчика рівня палива в бункері та 6 кнопок.

Для керування нам необхідно 14 дискретних (релейних виходів) напругою 24 V DC, для підключення: проміжних реле та магнітних контакторів для керування циркуляційним насосом, димососом, приводом шнека, 6 приводів для 3-ходових клапанів, 6 сигнальних лампочок та сигнального порту для підключення до ПЧ. Для виконання поставлених умов ідеально підходить [17] ПЛК Modicon TM221C40R. Обраний ПЛК має необхідну кількість входів/виходів, та необхідну напругу 24 VDC для керування 3-ходовими клапанами.

Детальні характеристики наведені в табл.2.11

Таблиця 2.11 – ПЛК Modicon TM221C40R

Напруга живлення, В	24
Кількість аналогових входів	23
Кількість дискретних виходів	16
Аналоговий діапазон вводу, В	0...24
Гранично допустима напруга, В	30

2.5. Розрахунок параметрів двигуна вентилятора

В даному пункті виконано розрахунок параметрів [18] схеми заміщення асинхронного двигуна R_1, R_2, L_1, L_2, L_m , а також визначення параметрів номінального режиму.

Необхідні паспортні дані для розрахунку двигуна [19] нагнітаючого вентилятора зображені в табл.2.12

Таблиця 2.12 – Паспортні дані двигуна 4AA63A4Y3

Номінальна потужність	$P_{2n} = 0.25 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 2$
Момент інерції	$J_d = 0.0012 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.68$
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0.65$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.2$
Номінальне ковзання	$s_n = 0.08$
Критичне ковзання	$s_k = 0.48$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\bar{X}'_1 = 0.082$

Активний опір статора	$\bar{R}'_1 = 0.15$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\bar{X}''_2 = 0.17$
Приведений активний опір ротора	$\bar{R}''_2 = 0.14$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\bar{X}_\mu = 1.4$

2.5.1. Розрахунок номінальних даних двигуна

Розрахуємо кутову частоту напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.16 \text{ рад/с}$$

Визначимо ідеальну швидкість холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314.16}{2} = 157.08 \text{ рад/с}$$

Розрахуємо номінальну швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - s_n) = 144.5 \text{ рад/с}$$

Розрахуємо номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = 1.73 \text{ Н·м.}$$

Визначимо критичний момент двигуна:

$$M_k = \lambda M_n = 3.8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Розрахуємо номінальне діюче значення фазної напруги та струм статора:

$$U_n = U_{ln} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 219.39$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3U_n \eta \cos(\varphi)} = 0.86$$

Розрахуємо амплітудне значення фазної напруги та струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2}U_n = \sqrt{2} \cdot 219.39 = 310.27$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = 1.22$$

Розрахуємо амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу при $R_1 = 0$:

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{310.27}{314.16} = 0.9876 \text{ Вб}.$$

2.5.2. Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

Математична модель асинхронного двигуна визначена для Т-подібної схеми заміщення, яка зображена на рисунку 2.6, відповідно приведені параметри відповідають Г-подібній схемі заміщення, рисунок 2.7 Для перерахунку параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну використаємо методику наведену нижче.

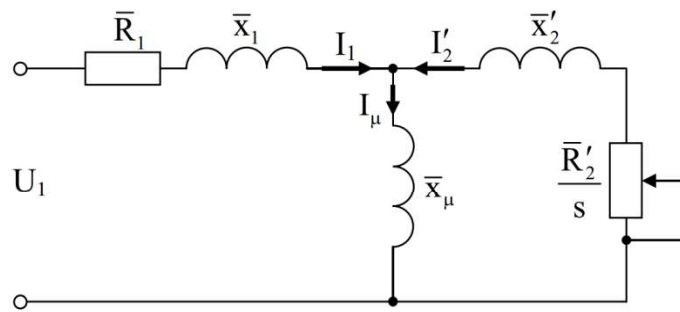


Рисунок 2.6 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

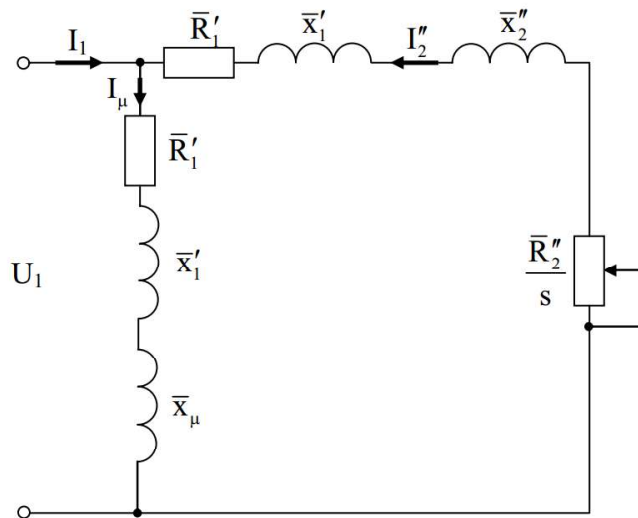


Рисунок 2.7 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Розрахуємо коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення:

$$C_1 = \frac{\bar{X}_\eta + \sqrt{\bar{X}_\eta + 4\bar{X}_1\bar{X}_\eta}}{2\bar{X}_\eta} = 1.055$$

Визначимо параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\bar{X}_1 = \frac{\bar{X}_1'}{C_1} = 0.0777$$

$$\bar{X}_2 = 0.1526$$

$$\bar{R}_1 = \frac{\bar{R}_1'}{C_1} = 0.1421$$

$$\bar{R}_2 = 0.1257$$

Визначимо параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях:

$$X_1 = \bar{X}_1 \frac{U_n}{I_n} = 19.83$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \frac{U_n}{I_n} = 36.28$$

$$R_2 = \bar{R}_2 \frac{U_n}{I_n} = 59.79$$

$$X_2 = \bar{X}_2 \frac{U_n}{I_n} = 38.95$$

$$X_\eta = \bar{X}_\mu \frac{U_n}{I_n} = 357.41$$

Розрахуємо індуктивність розсіювання ротора та статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_0} = 0.0631$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2}{\omega_0} = 0.1240$$

Розрахуємо індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{X_\eta}{\omega_0} = 1.1377$$

Розрахуємо індуктивності ротора та статора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 1.2008$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 1.2617$$

На основі попередніх обчислень визначимо значення параметрів $\alpha_1, \alpha, \beta, \gamma, \sigma, \mu$

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2}; \quad \sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}; \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}; \quad \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m$$

Таблиця 2.13 – Параметри двигуна 4AA63A4Y3

P_{2n} , кВт	0.250	R_1 , Ом	0.1421
ω_{xx} , рад/с	157.08	R_2 , Ом	0.1257
ω_n , рад/с	144.5	L_1 , Гн	1.2008
M_n , Нм	1.73	L_2 , Гн	1.2617
M_k , Нм	3.8	L_m , Гн	1.1377
λ	2.2	α_1 , Ом/Гн	30.2136
I_{na} , А	1.22	α , Ом/Гн	25.4279
Ψ_{1xx} , Вб	0.9876	β , 1/Гн	5.1541
η	0.68	γ , Ом/Гн	356.4868
$\cos\varphi$	0.65	σ , Гн	0.1750

3. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ ТА ШАФИ КЕРУВАННЯ

До схеми [16] підходить живлення від розподільчого щита на автоматичний вимикач QF1, далі через блок живлення G1, який перетворює напругу зі змінної 220 V у постійну 24 V живлення, яка надходить до програмованого логічного контролера DD1.

Пуск схеми керування здійснюються кнопкою SB1. Робота кожного з циклів відображається на лампочках HL1-HL5, які відповідно позначають:

1. HL1 – система готова до роботи, або працює.
2. HL2 – активний режим розпалення котла.
3. HL3 – активний режим опалення системи ГВП.
4. HL4 – активний режим енергозбереження.
5. HL5 – аварія, помилка або зупинка системи.

Кнопкою з фіксацією SB6 перемикається режими автоматичний або ручний. У ручному режимі кнопками SB3-SB5 включається режими розпалення котла, робочий режим та режим енергозбереження відповідно. Вмикання насосів M2, M3, M4 здійснюється через контактори KM1-KM3.

Також в схемі присутній перетворювач частоти UZ для частотного керування двигуном вентилятора. У будь-який момент часу кнопкою SB2 можна припинити процес опалення, після натиснення система повністю зупиниться і буде очікувати на вибір режиму.

При ввімкненні вимикача QF1 система вмикається, запускається програма ПЛК, і система очікує натиснення кнопки SB1. Після натиснення кнопки SB1 загоряється лампочка HL1, яка сигналізує, що система функціонує. В залежності від того чи ввімкнена чи вимкнена кнопка SB6, система або запуститься в автоматичному режимі або чекатиме на вибір режиму роботи.

При виборі автоматичного режиму система аналізує який режим потрібно застосувати. Якщо температура нижче 20°C, вмикається процес розпалювання котла. Підчас якого вхідний та вихідний клапан ГВП котла закриті, тобто вода

циркулює по «малому» колу для того щоб насамперед нагріти котел. Це потрібно для того щоб в котел не досягнув так званої точки «роси», тобто коли в котлі виступає конденсат, що погано впливає на довговічність котла. Також циркуляція по малому колу дозволяє швидко нагріти котел, а коли котел нагрітий, то система теж нагрівається швидше, порівняно з випадком якщо під час розпалювання буде вода буде циркулювати по всій системі повністю, і відповідно вода буде грітись довше.

Коли котел нагрівся до температури 50°C вхідний та вихідний крани ГВП відкриваються, і циркуляція теплоносія відбувається по великому колу, але в саму першу чергу відбувається циркуляція через батареї для обігріву будинку. Коли будинок обігрітий, відкриваються крани для нагріву води в бойлері та теплоакумуляторі. Максимальна робоча температура системи складає 80°C. Бажану температуру в приміщенні та бойлері можна виставити на пульті керування, система контролюватиме їхню температуру так як в них встановлені електричні датчики температури.

Коли паливо в котлі закінчилось, гаряча вода береться з акумуляуючої ємності, що забезпечить обігрів приміщення на певний час, звісно в залежності від температури навколишнього середовища. Також акумуляуюча ємність потрібна для того, щоб котел працював постійно на усталеній потужності. Це потрібно для того щоб підвищити ККД котла. Тобто коли котел нагрів воду в системі, він починає гріти воду в акумуляуючій ємності, коли вода в ємності нагріта, котел гріє воду в системі, і так по циклу. Адже набагато більше витрачається палива якщо нагрівати теплоносії наприклад від 20°C до 50°C, ніж підтримувати температуру.

В системі наявний циркуляційний насос який забезпечує рух теплообмінника по системі ГВП. Приводу шнеку [20] в бункері забезпечує автоматичну подачу палива в камеру згоряння.

4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ПІРОЛІЗНОГО КОТЛА

4.1. Розробка алгоритму керування асинхронним двигуном

4.1.1. Математична модель асинхронного двигуна

Під час розробки та аналізу електромеханічної системи на основі асинхронного двигуна найпоширенішою є математична модель асинхронного двигуна, яка записана через вектори струму статора та потокозчеплення ротора, що в стаціонарній системі координат $(a - b)$ задається наступними рівняннями:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(M - M_c), \quad M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}),$$

$$\dot{i}_{1a} = -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a},$$

$$\dot{i}_{1b} = -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b},$$

$$\dot{\psi}_{2a} = -\alpha \psi_{2a} - \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a},$$

$$\dot{\psi}_{2b} = -\alpha \psi_{2b} + \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b},$$

де $(i_{1a}, i_{1b}), (\psi_{2a}, \psi_{2b}), (u_{1a}, u_{1b})$ – компоненти векторів струму статора, потокозчеплень ротора і напруг статора в стаціонарній системі координат $(a - b)$; ω – кутова швидкість ротора, M – момент двигуна, M_c – момент навантаження, $\alpha = \frac{R_2}{L_2}$; $\sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}$; $\beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}$; $\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m$, R_1, R_2 і L_1, L_2 – активні опори та індуктивності статора і ротора, L_m – індуктивність намагнічуючого контуру, J – сумарний момент інерції. В моделі було прийнято одну пару полюсів.

Сигнали струмів, напруг та потокозчеплень в моделі мають синусоїдальний характер при ненульовій частоті напруги живлення, що ускладнює їх аналіз. Тому для синтезу алгоритмів векторного керування прийнято використовувати математичну модель АД, представлену в синхронній системі координат $(d-q)$ у відповідності з наступними рівняннями:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c), M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}) \\ \dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta \omega \psi_{2q} + \frac{1}{\sigma} u_{1d} \\ \dot{i}_{1q} &= -\gamma i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2q} - \beta \omega \psi_{2d} + \frac{1}{\sigma} u_{1q} \\ \dot{\psi}_{2d} &= -\alpha \psi_{2d} + (\omega_0 - \omega) \psi_{2q} + \alpha L_m i_{1d} \\ \dot{\psi}_{2q} &= -\alpha \psi_{2q} - (\omega_0 - \omega) \psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q} \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0,\end{aligned}$$

де (i_{1d}, i_{1q}) , (ψ_{2d}, ψ_{2q}) – компоненти векторів струму статора та вектора потокозчеплення ротора, ω_0 і ε_0 – кутова швидкість та кутове положення синхронної системи координат $(d-q)$ відносно стаціонарної системи координат $(a-b)$. В математичній моделі напруги, струми та потокозчеплення мають характеристику постійних сигналів, що дозволяє спростити їх аналіз.

Перетворення змінних між системами координат $(a-b)$ та $(d-q)$ здійснюється за допомогою використання виразів:

$$x^{(d-q)} = e^{-j\varepsilon_0} x^{(a-b)}, x^{(a-b)} = e^{j\varepsilon_0} x^{(d-q)}, e^{-j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}$$

де $x^{(y-z)}$ – визначає двовимірні вектори напруг, струмів та потокозчеплень.

4.1.2. Частотне керування кутовою швидкістю

Алгоритм частотного [21] керування в системі координат (d-q) записується у вигляді:

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \alpha_1 \psi_1^*, \\ u_{1q} &= \omega_0^* \psi_1^*. \end{aligned}$$

Напруги, що прикладаються до обмоток асинхронного двигуна дорівнюють:

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0(t) & -\sin \varepsilon_0(t) \\ \sin \varepsilon_0(t) & \cos \varepsilon_0(t) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \psi_1^* \\ \omega^* \psi_1^* \end{pmatrix},$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega^*.$$

Для того щоб практично застосувати, потрібно знати параметр $\alpha_1 = R_1/L_1$, що можна визначити за допомогою стандартних тестів.

Запишемо вираз для залежності модуля напруги статора від швидкості:

$$U_{1m} = (u_{1d}^2 + u_{1q}^2)^{\frac{1}{2}} = \psi_1^* \sqrt{\alpha_1^2 + (\omega^*)^2}.$$

Залежність $U_{1m} = f(\omega^*, \psi^*)$ представлена на рисунку 4.1 непереривною лінією. Коли досягається задана швидкість номінального значення $\omega_n^* = 2\pi f_n$, модуль напруги статора обмежується інвертором на рівні $\sqrt{2}U_n$, де f_n і U_n - номінальна частота і фазна напруга статора.

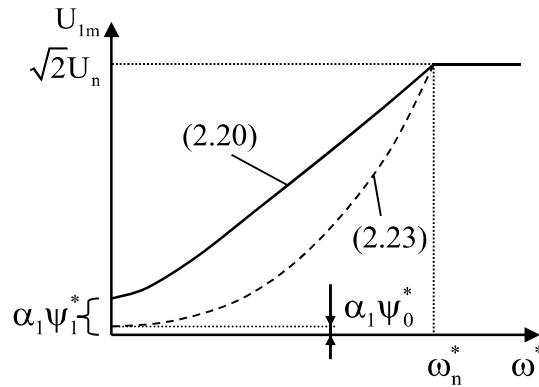


Рис.4.1 Залежності модуля напруги статора від заданої швидкості при квазівекторному керуванні

Рівняння алгоритму частково [22] співпадають з тими, які були використані при стандартному частотному керуванні: модуль напруги статора розраховується як $U_{lm} = u_0 + k_{uf} \omega^*$, а кутова частота обертання дорівнює $\omega_0 = \omega^*$.

Якщо ми сформуємо закон зміни заданого потокозчеплення у вигляді:

$$\psi_1^* = \psi_0^* + \psi_{11}^* (\omega^*),$$

то звідси можливо отримати різні регульовальні характеристики U/f .

Структурна схема алгоритму квазівекторного керування показана на рисунку 4.2.

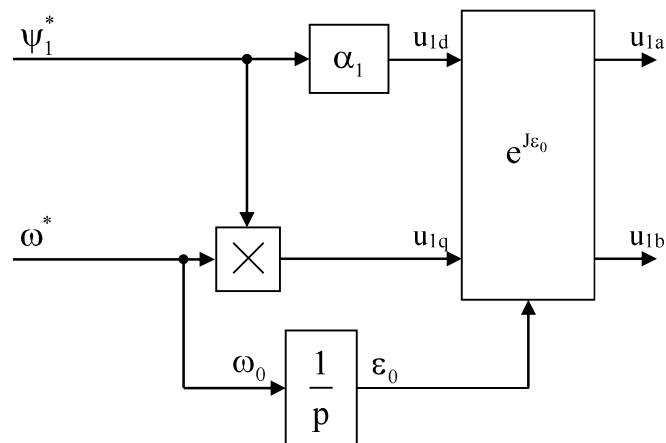


Рис. 4.2 Структурна схема алгоритму частотного керування

Для приведення в рух турбомеханізмів, зокрема і вентиляторів часто використовують квадратичну залежність напруги від частоти $U/f^2 = \text{const}$ для того щоб понизити активні втрати при не повному навантаженні. Для того щоб це реалізувати вирази записуються у вигляді:

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \alpha_1 \psi_1^*, \\ u_{1q} &= \omega^* \psi_1^*, \\ \psi_1^* &= \psi_0^* + (\psi_n^* - \psi_0^*) \frac{|\omega^*|}{\omega_{0n}}, \end{aligned}$$

де $\psi_n^* = \psi_{1XX}$ – номінальне потокозчеплення статора на холостому ходу, $\psi_0^* < \psi_n^*$, $\psi_{1XX} = \sqrt{2}U_n / 2\pi f_n$, $\omega_{0n} = 2\pi f_n$ – номінальна кутова швидкість вектора напруги статора.

При використанні алгоритму керування [23] модуль напруги статора в залежності від заданої швидкості отримує вигляду:

$$U_{1m} = \left(\psi_0^* + (\psi_n^* - \psi_0^*) |\omega^*| / \omega_{0n} \right) \sqrt{\alpha_1^2 + (\omega^*)^2}.$$

Залежність зображена на рисунку 4.1 пунктирною лінією. Структурну схему алгоритму керування зображено на рисунку 4.3.

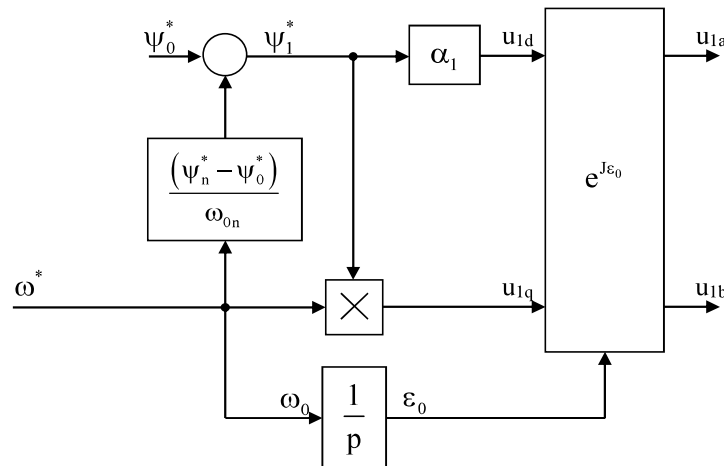


Рис. 4.3 Структурна схема алгоритму квазівекторного керування з квадратичною залежністю напруги від частоти

Під час формування характеристик в зоні заданих швидкостей вище номінальної потрібно виконати обмеження напруги на номінальному рівні, яке реалізовується за рахунок обмеження складової вектора напруги по осі (q) у відповідності з наступними виразами:

$$u_{ld} = \alpha_1 \psi_1^*,$$

$$u_{lq} = \begin{cases} \psi_1^* \omega^*, & \forall (\psi_1^* \omega^*) < \sqrt{2U_n^2 - u_{ld}^2} \\ \sqrt{2U_n^2 - u_{ld}^2}, & \forall (\psi_1^* \omega^*) \geq \sqrt{2U_n^2 - u_{ld}^2} \end{cases}$$

Для системи було обрано розімкнене частотне керування тому, що для вентилятора не потрібне точне керування положення та високого моменту при пуску. Тому для керування достатньо найпростішого частотного керування, яке не потребує датчиків і тому є найбільш дешевим.

Далі виконаємо порівняння енергетичних характеристик електромеханічної системи при використанні двох алгоритмів частотного керування методом математичного моделювання.

4.2. Спрощена математична модель нагріву

Математична модель піролізного котла є досить складною, потребує знання багатьох параметрів, тому в рамках бакалаврської роботи було спрощено модель піролізу та апроксимовано процес нагріву у вигляді аперіодичної ланки 1-го порядку. Математична модель піролізного котла побудована за такими умовами, що при максимальних обертах нагнітаючого вентилятора (157 рад/с), температура котла в 80°C досягається за 10-15 хвилин, що відповідає дійсності. Для того щоб скоротити час на моделювання, в роботі для перевірки коректності технічних рішень припустимо, що стала часу нагріву складає $\tau = 60$ с., тому усталений режим досягається за 3-4 τ , тобто 3-4 хвилини.

В даній моделі потік залежить від заданої швидкості, відповідно чим більша швидкість двигуна, тим більша величина потоку буде задана. При завданні швидкості 157 рад/с, потік в обох моделях буде аналогічним, але при зменшенні швидкості потік буде зменшуватись, а з ним і струм збудження також зменшується.

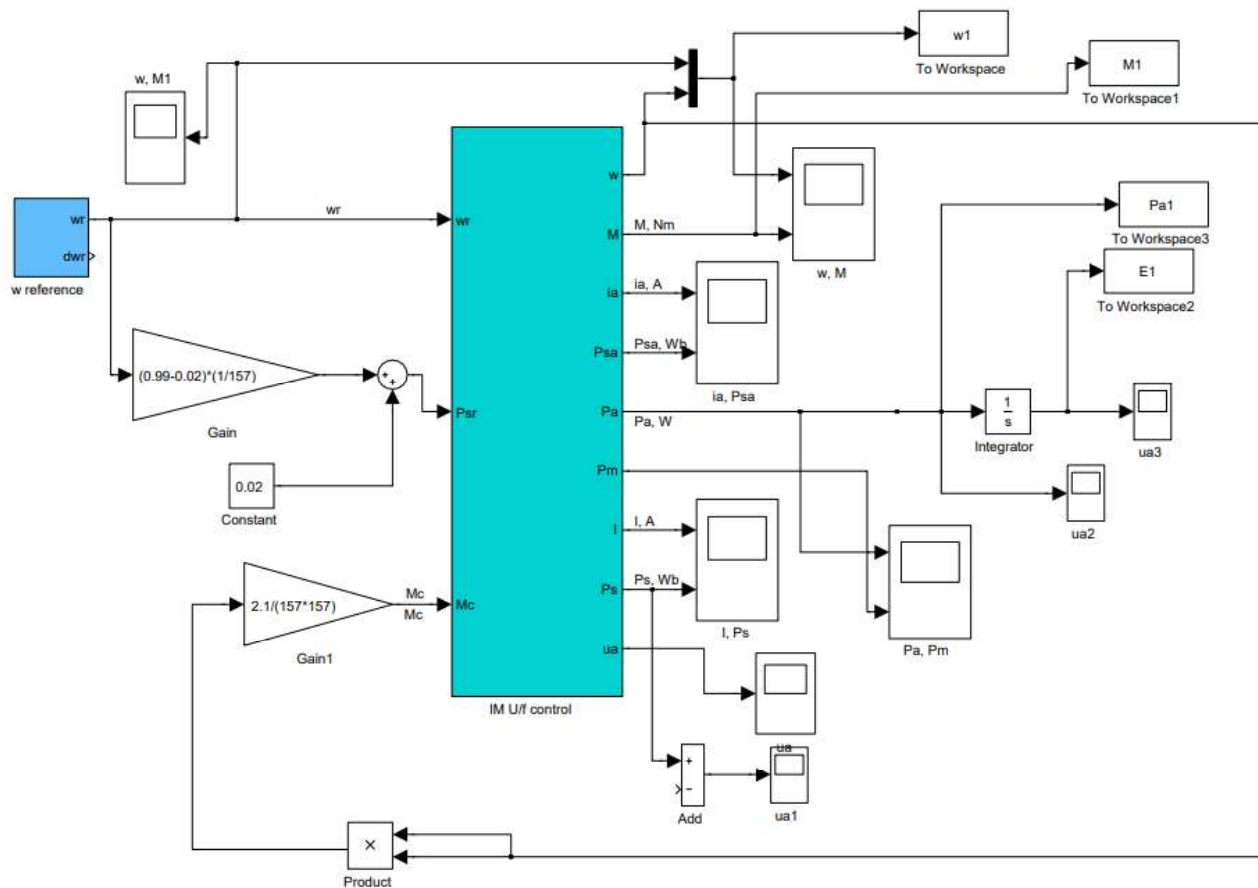


Рисунок 4.5 – Математична модель двигуна вентилятора за законом

$$U/f^2 = const$$

При зменшенні струму втрати в міді які залежать від струму квадратично, також зменшуються, саме за рахунок цього досягається економія енергії.

4.3. Дослідження динамічних характеристик методом математичного моделювання

Виконаємо тест обох систем, спроектованих в попередньому пункті, на номінальній швидкості, результати тесту зображені на рис.4.6

З результатів можна зробити висновок, що в обох системах ми потрапили в одну точку і обидва алгоритми дають схожі показники швидкості, моменту та спожитої потужності та енергії, тобто особливої переваги поки що не видно.

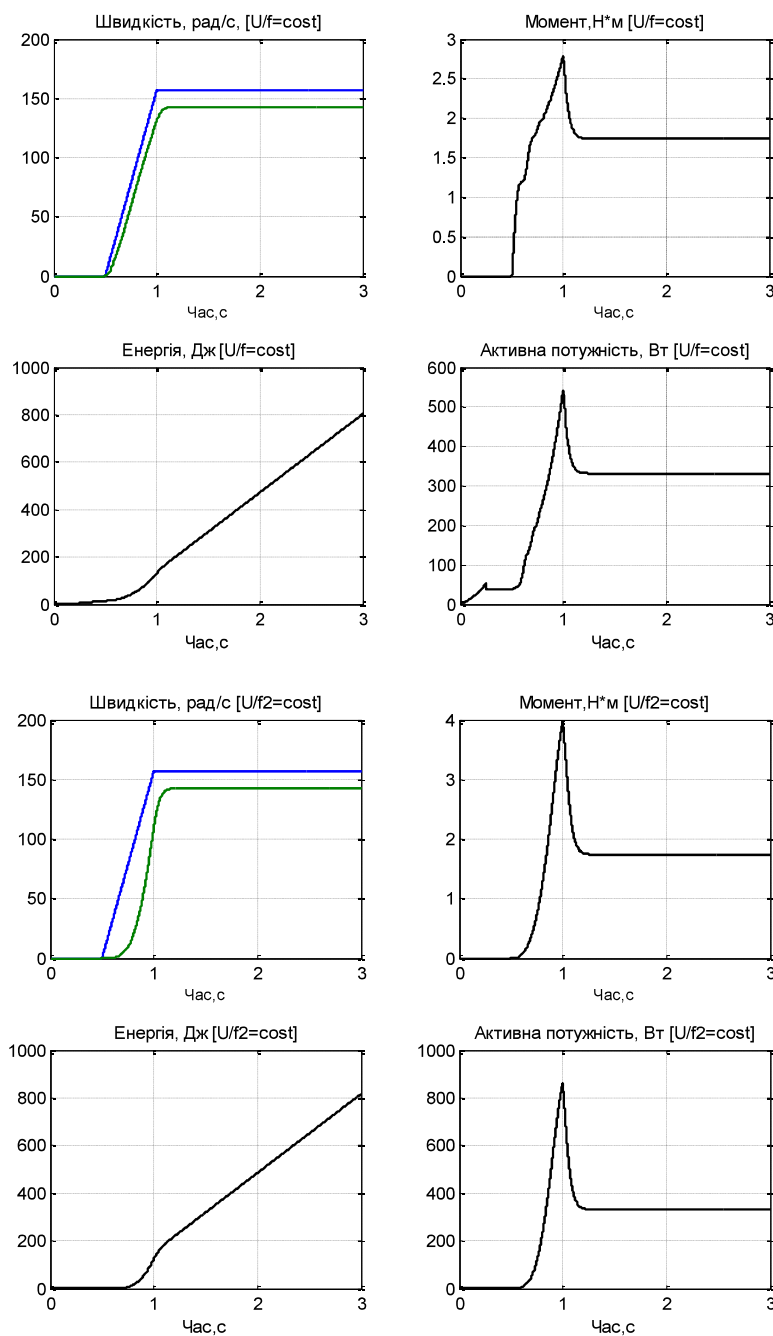


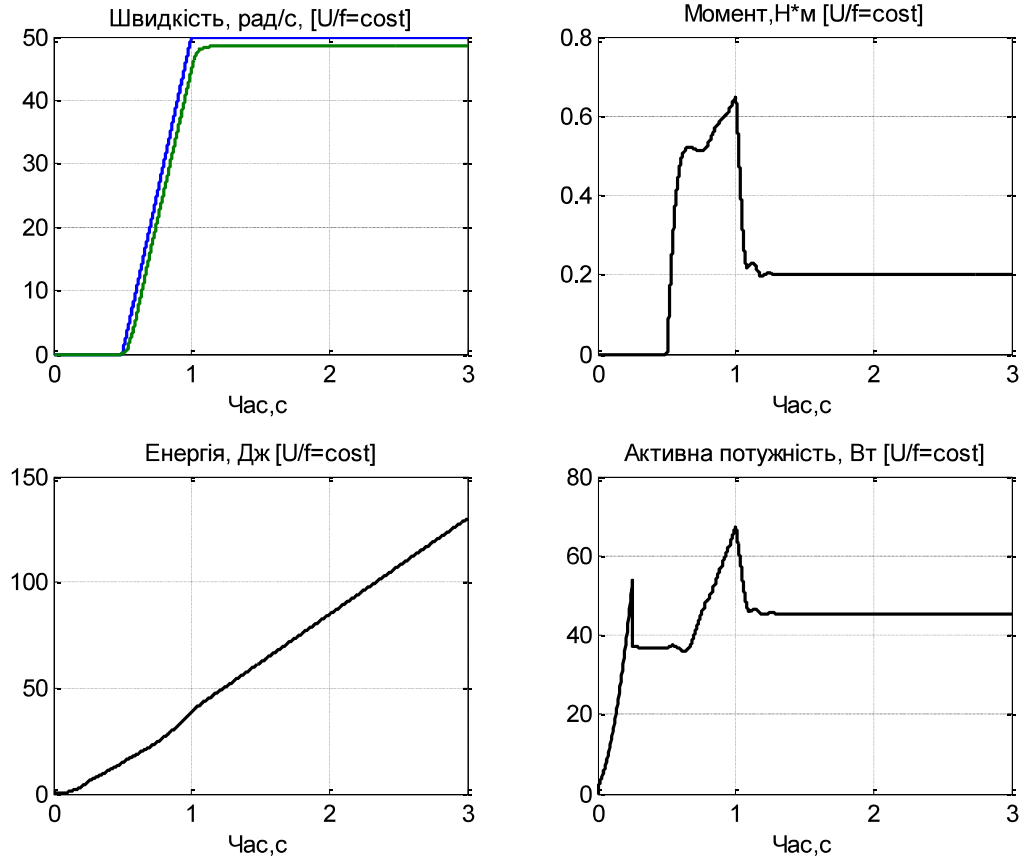
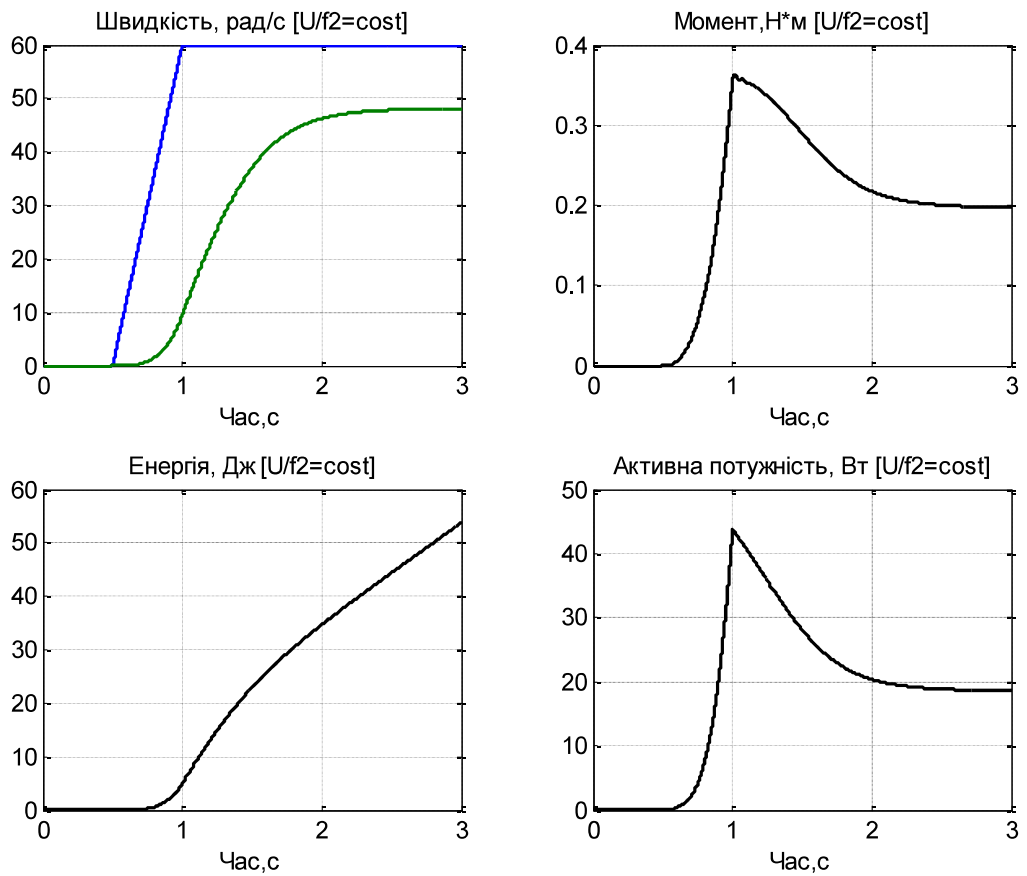
Рисунок 4.6 – Графіки порівняння двох систем на швидкості 157 рад/с

Виконаємо наступний тест, в якому приймемо умову, що вентилятор працює не постійно на повну потужність, а в випадку регулювання обертів ми можемо знижувати величину обертів. Виконаємо тест зі зменшенням обертів в 3 рази. Графіки перехідних процесів при роботі двигуна на швидкості близько 50 рад/с показано на рис.4.7 та рис.4.8

Для того щоб обидві системи потрапили в одну робочу точку приблизно в 50 рад/с нам довелось підняти завдання швидкості для закону $U/f^2 = const$ до значення 60 рад/с. Це пояснюється тим, що характеристики двигуна при керуванні $U/f^2 = const$ є м'якшими, ніж при керуванні з постійним потокозчепленням, тому виникає більша статична похибка, яку в умовах тесту компенсовано за рахунок підвищення рівня завдання так, щоб вивести двигун в одну і ту ж робочу точку по кутовій швидкості та моменту, з метою оцінки енергетичних показників обох систем.

Проаналізувавши графіки перехідних процесів, представлених на рис.4.7, 4.8, можна зробити висновок, що швидкість та момент при керуванні за законом $U/f^2 = const$, мають більш плавний характер. Але це ще не всі переваги даного методу. Адже проаналізувавши графіки спожитої потужності та енергії можна зробити висновок, що економія при використанні закону керування $U/f^2 = const$, дійсно присутня і двигун за час тесту споживає на 69 % менше енергії (53 Дж при $U/f^2 = const$ і 130 Дж при $U/f = const$), що в тривалому використанні дає значну економію та приріст ККД всієї системи.

Так як вентилятор нагнітання повітря в більшості режимів роботи котла працює на швидкостях менших за номінальну, то для підвищення енергетичної ефективності доцільно застосовувати закон частотного керування $U/f^2 = const$.

Рисунок 4.7 – Перехідні процеси при $U/f = \text{const}$ Рисунок 4.8 – Перехідні процеси при $U/f^2 = \text{const}$

4.4. Розробка регулятора технологічного процесу

Для керування об'єктом першого порядку, яким апроксимовано технологічний процес, приймемо припущення, що процеси керування кутовою швидкістю приводного двигуна вентилятора є набагато швидшими за процеси регулювання температури.

Для синтезу регулятора запишемо передатну функцію (4.1) у вигляді диференціального рівняння прийнявши, що входом є задана швидкість ω^* , а виходом перевищення температури теплоносія. Тоді:

$$W(p) = \frac{0.5}{\tau p + 1}$$

$$T\tau_p + T = 0.5 \cdot \omega^* \quad (4.2)$$

$$\dot{T} = -\frac{1}{\tau}T + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\tau} \omega^*,$$

де T - температура теплоносія;

τ - стала часу;

ω^* - фактично є керуючою дією, припустивши, що $\omega^* = \omega$;

Визначимо похибку регулювання температури як:

$$\tilde{T} = T - T^*$$

де T^* - задана температура.

Тоді в похибках регулювання рівняння (4.2) запишеться як:

$$\dot{\tilde{T}} = \frac{1}{\tau} \dot{T} - \frac{1}{\tau} T^* + \frac{1}{2} \omega^* - \dot{T}^* \quad (4.3)$$

З рівняння (4.3) сформуємо ПІ-регулятор технологічного параметру у вигляді:

$$\begin{aligned}\omega^* &= 2\left(\frac{1}{\tau}T^* - k_p T - x_L + \dot{T}^*\right) \\ \dot{x}_T^* &= k_i \tilde{T}\end{aligned}\tag{4.4}$$

Підставивши (4.4) в (4.3) отримаємо:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{T}} &= -\left(k_p + \frac{1}{\tau}\right) \cdot \tilde{T} - x_T \\ \dot{x}_T &= k_i \cdot \tilde{T}\end{aligned}\tag{4.5}$$

Система є лінійною стійкою системою 2-го порядку.

Припустивши, що $\dot{T}^* = \text{const}$, та також враховуючи, що $\tau \gg 1$, ПІ-регулятор (4.4) може бути спрощеним до виду:

$$\begin{aligned}\omega^* &= -k_p \tilde{T} - x_T \\ \dot{x}_T &= k_i \cdot \tilde{T}\end{aligned}\tag{4.6}$$

Дослідимо роботу системи стабілізації технологічного параметру з врахуванням досліджуваних алгоритмів частотного керування та регулятор (4.6)

Завдання на швидкість задає ПІ-регулятор, пропорційна складова якого $k_p = 5$, а інтегральна $k_i = 0.1$. Також задане перевищення теплоносія на виході порівняно з входом складає 20°C . Відповідно, регулятор дає завдання швидкості двигуну вентилятора (рис.4.11)

Проаналізувавши графік (рис.4.11) можна зробити висновок, що регулятор в момент від 3 секунд дає підвищене завдання швидкості двигуна вентилятора, це можна пояснити тим, що на графіку, що на рис.4.12 в момент від 3 секунд падає температура. Тобто при падінні температури регулятор змінює завдання швидкості вентилятора для подачі більшої кількості повітря в камеру згоряння, що підвищує кількість тепла, яке виділяється в котлі при згоранні палива і тим самим компенсує значення температури, отже можна зробити висновок, що розроблена

електромеханічна система забезпечує стабілізацію необхідної температури теплоносія на виході котла.

Далі ми буде досліджувати обидві системи з розробленим регулятором технологічного процесу для порівняння та визначення більш економічної системи.

Удосконалені моделюючі програми з регулятором технологічного процесу зображені на рис.4.9 та рис.4.10

На рис.4.12 зображено графік завдання швидкості двигуна нагнітаючого вентилятора за допомогою регулятора технологічного процесу. З графіків які зображені на рис.4.11 та рис.4.12 можна зробити висновок, що регулятор 0 з 10 хвилин задає вентилятору великі оберти задля досягнення температури. Коли встановлена температура встановлена, регулятор дає завдання на зменшення обертів для економії електроенергії та для підтримання тепла.

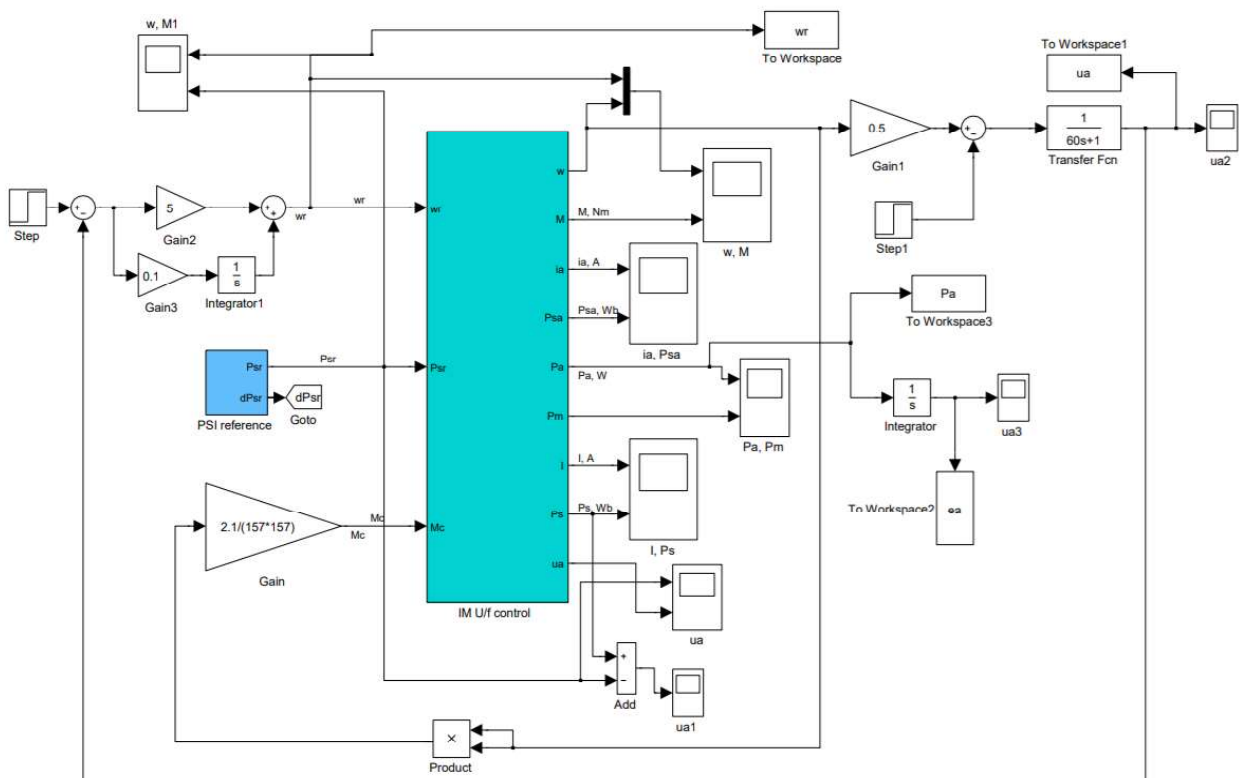


Рисунок 4.9 – Математична модель піролізного котла з регулятором та частотним керуванням за законом $U/f = const$

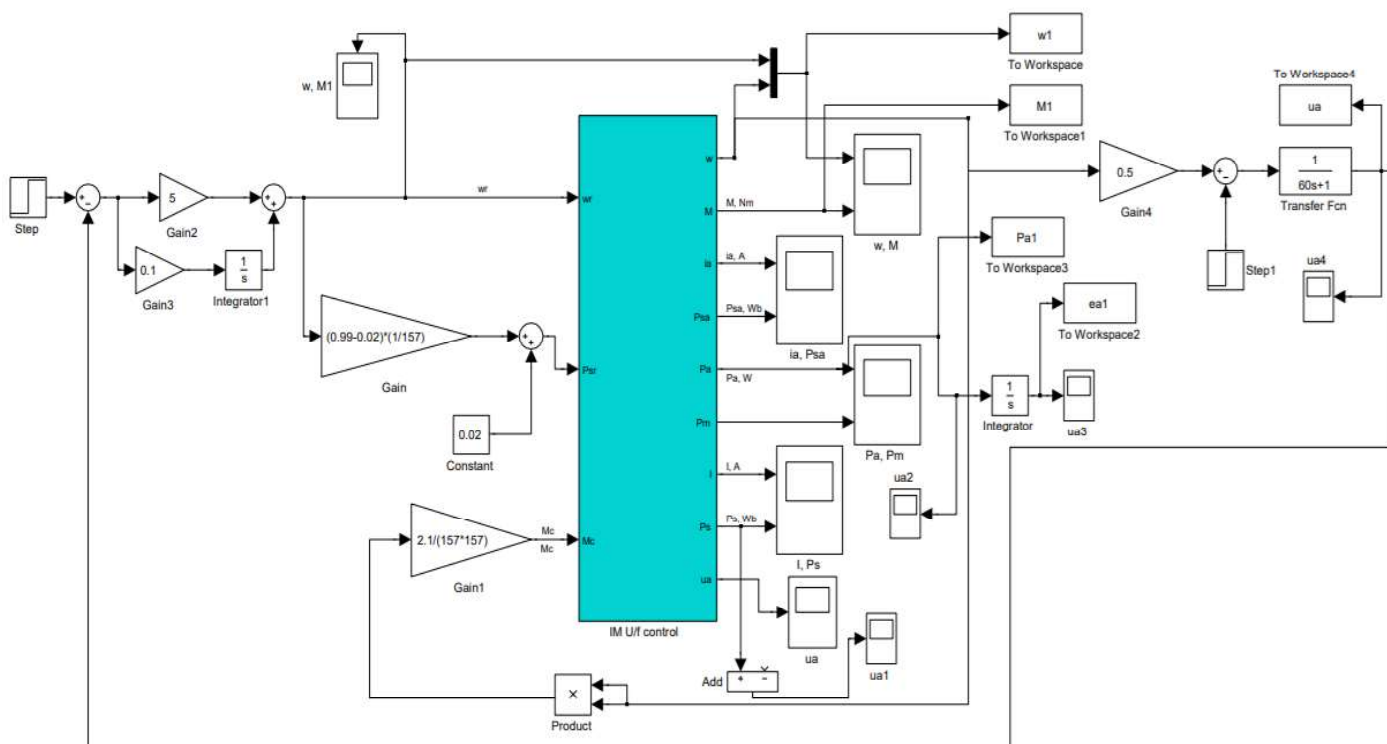


Рисунок 4.10 – Математична модель піролізного котла з регулятором та частотним керуванням за законом $U/f^2 = const$

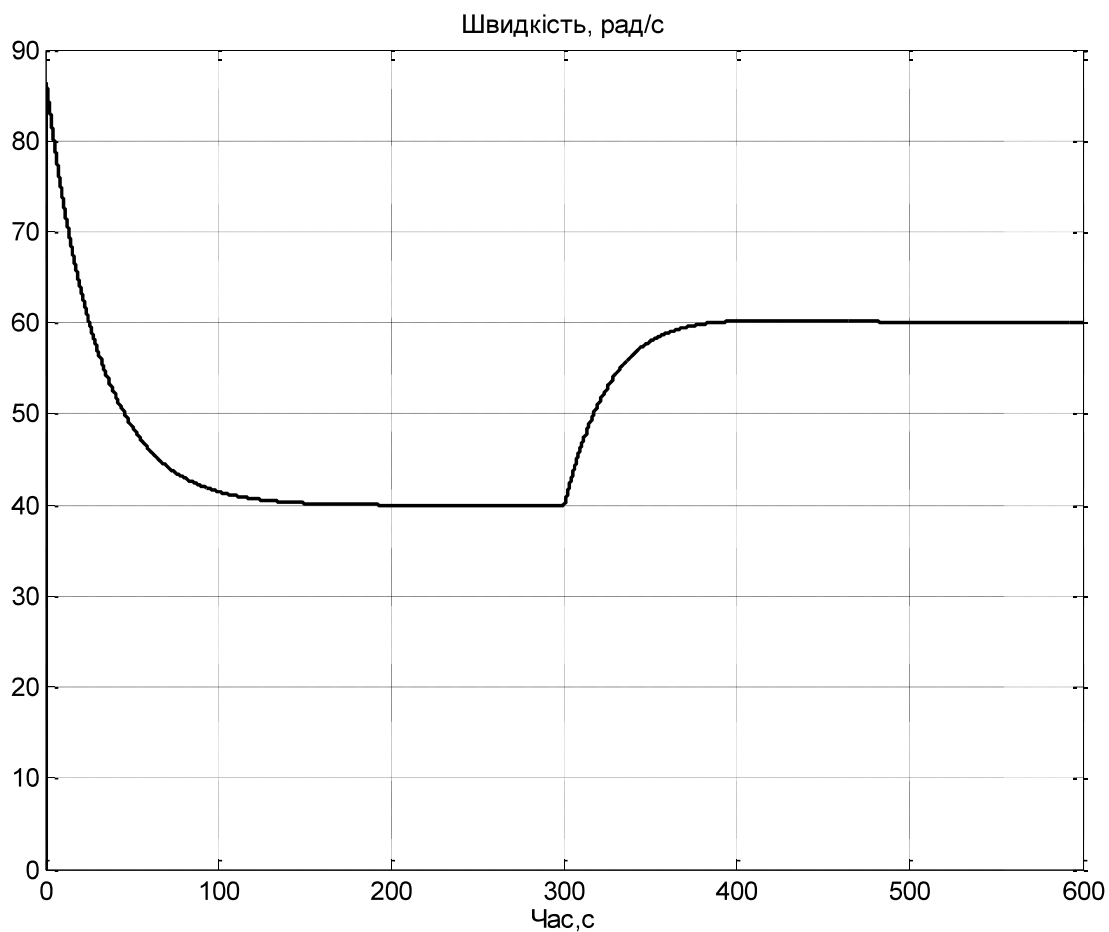


Рисунок 4.11 – Завдання швидкості двигуну вентилятора

В результаті маємо наступний графік (рис.4.12) на якому зображено перехідні процеси нагріву

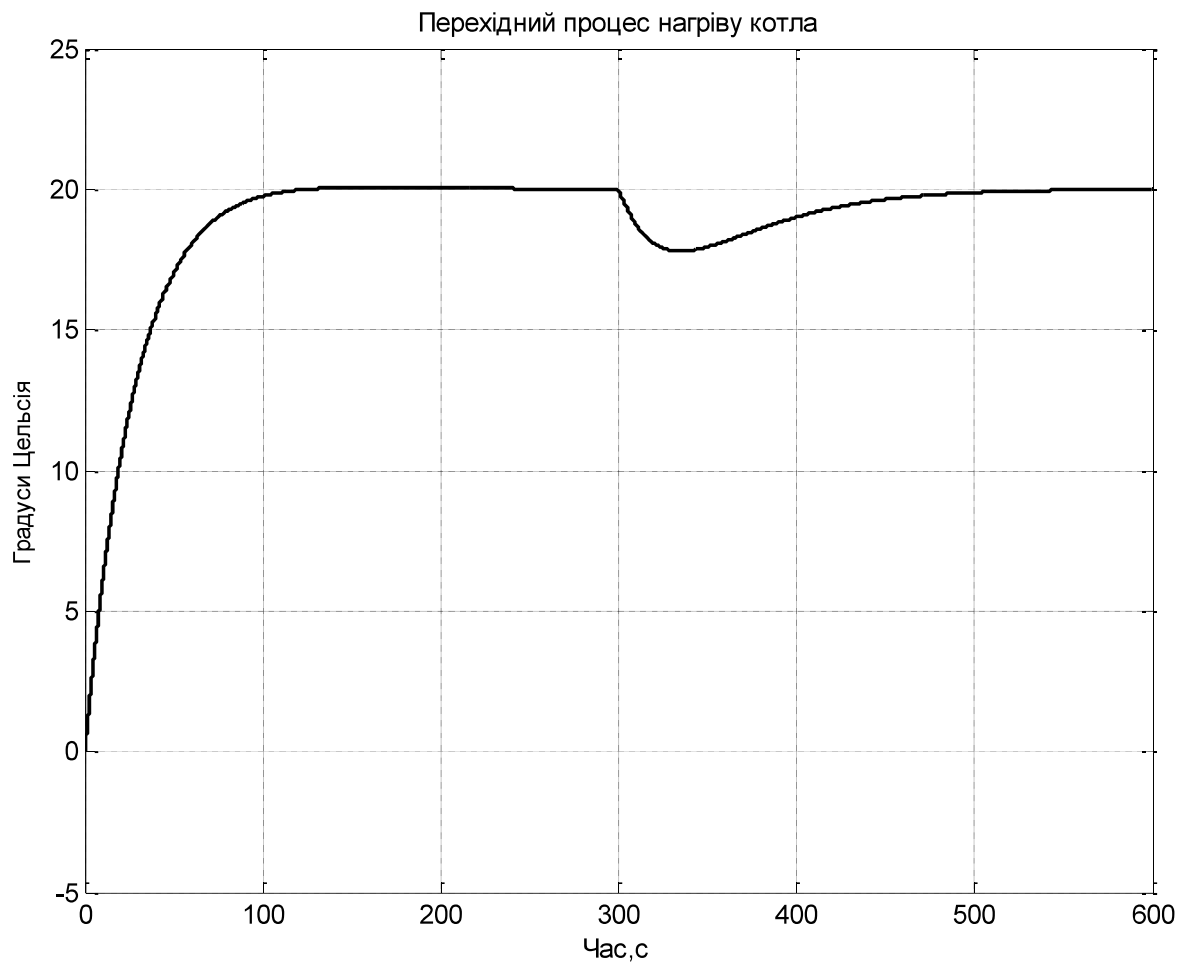


Рисунок 4.12 – Перехідний процес нагріву котла

Проведемо тест обох систем з регуляторами для того щоб порівняти їх енергоспоживання. Результати дослідження наведено на рис.4.13

Переглянувши графіки на рис. 4.13 можна зробити висновок, що система з частотним керуванням за законом $U/f^2 = const$ значно економніша за систему з частотним керуванням за законом $U/f = const$. Це видно з графіку спожитої потужності двигуном, в момент 600 секунд, тобто 10 хвилин, споживання електричної енергії двигуном $U/f = const$ становить 55 Вт, а при $U/f^2 = const$ становить 33 Вт.

За час тесту, тобто за 10 хвилин, система з постійним поточозчепленням спожила 24 кДж енергій, а система з квадратичною залежністю спожила 9 кДж енергії, що приблизно в три рази менше.

Економія по потужності в розглянутому тесті при усталеному режимі складає $55-33=22$ Вт. Тобто за годину економиться 0.022 кВт/год, за добу 0.528 кВт/год, а за рік 192 кВт/год електроенергії, що в грошовому еквіваленті складає близько 400 грн.

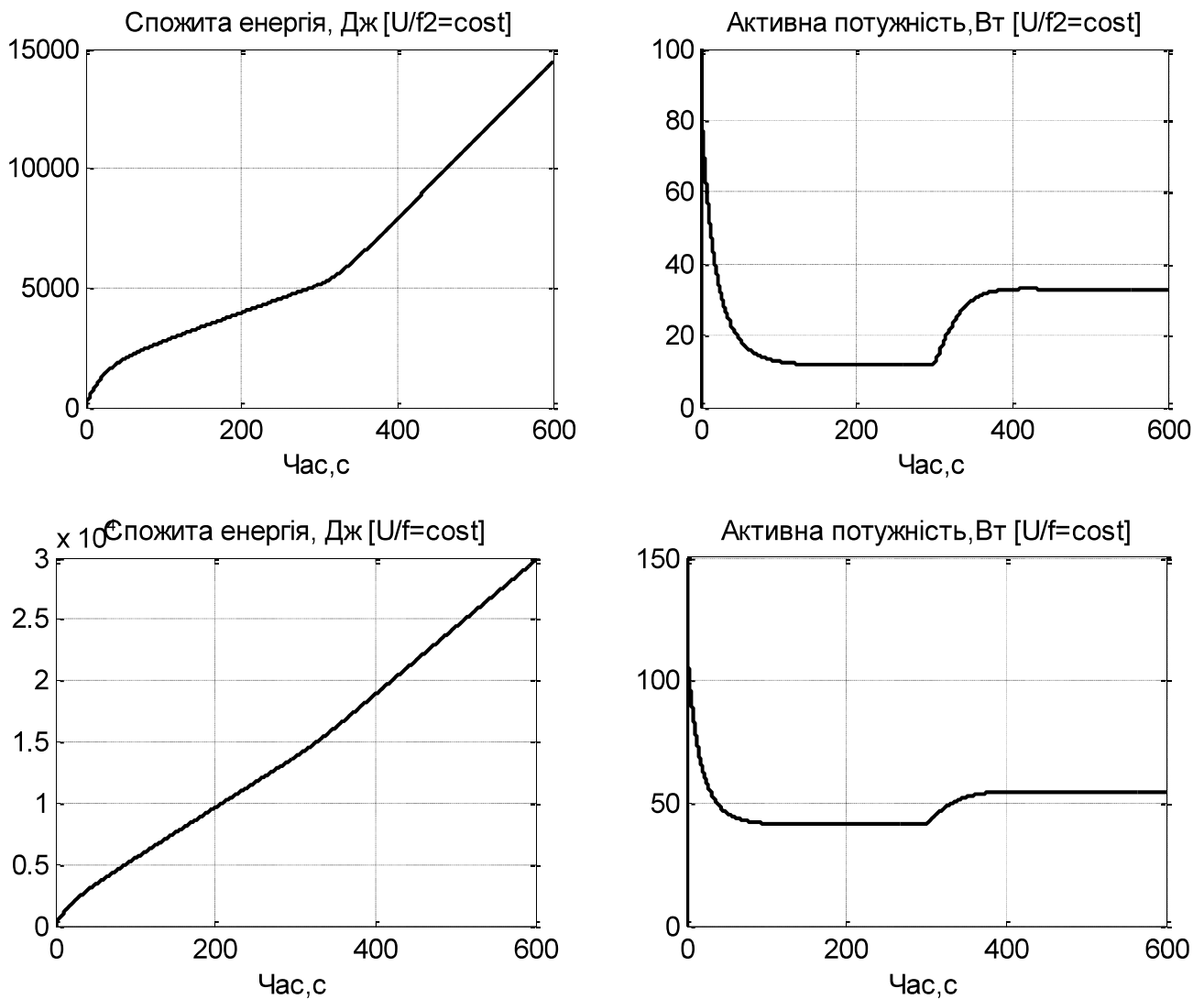


Рисунок 4.13 – Порівняння двох систем керування за енергоспоживанням

ВИСНОВКИ

У даному дипломному проекті було розроблено електромеханічну систему опалення з використанням піролізного котла. Завданням даної роботи було автоматизувати процес опалення житлового будинку площею 200 кв.м. Також для підвищення ККД системи було додано бойлер для нагріву води, що буде використовуватись в санітарних цілях, акамулююча ємність для забезпечення безперервної роботи котла, та підвищення його ККД. Також ця ємність забезпечує додатковим режим, в якому при закінченні палива, система опалення буде функціонувати певний час в залежності від температури навколишнього середовища.

Під час проектування системи було обрано ряд технічних засобів які задовольняють поставлені умови, а саме: циркуляційний насос – розрахований і обраний з розрахунку на площу будинку, кількість батарей опалення, довжини трубопроводу і його поперечного перерізу; димосос – обраний з розрахунку потужності котла, його технічних особливостей та аеродинамічного опору; нагнітаючий вентилятор – був підібраний згідно параметрів котла, та режиму роботи опалювальної системи, а саме по кількості прокачаного повітря було підібрано вентилятор та двигун який ми досліджували та тестували за допомогою математичного моделювання.

Для автоматичного функціонування певних частин схеми були обрані такі елементи: 3-ходові клапани – для змішування або розділення потоку гарячого водопостачання; привод для 3-ходових клапанів – повністю сумісний з клапанами; термодатчики – вимірюють температуру в системі та потрібні для реалізації зворотних зв'язків регулятора технологічного процесу; розширювальний бак – потрібний для захисту системи від надмірного тиску або нетривалого розширення об'єму теплоносія; сітчастий фільтр – захищає циркуляційний насос від забруднення.

Також було розроблено схеми: електричну принципову з підключенням всіх апаратних органів системи до ПЛК; креслення щита з розміщенням обраних компонентів автоматизації.

Для дослідження системи було розроблено та порівняно 2 системи частотного керування, які працюють за законами $U/f^2 = \text{const}$ та $U/f = \text{const}$, також вони були модифіковані регулятором технологічного процесу, який забезпечує регулювання температури в опалювальній системі керуючи обертами нагнітаючого вентилятора.

В ході досліджень було виявлено, що на номінальній швидкості в 157 рад/с обидві системи працюють в одній точці, та особливих розбіжностей не мають. Але так як вентилятор працює не постійно на номінальних обертах, то було зроблено дослідження на швидкості в 3 рази нижчій від номінальної. На графіках цих досліджень було видно, що двигун вентилятора споживає менше потужності з частотним управлінням за законом $U/f^2 = \text{const}$, а саме різниця сягає 22 Вт, тобто це означає, що спроектована система є енергоефективною та рентабельним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Піролізний котел URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Jetstream_furnace (дата звернення: 07.04.2020).
2. Циркуляційний насос URL : <https://www.teplomir-nsk.ru/informatsiya/26-kak-podobrat-tsirkulyatsionnyj-nasos-bystro-prosto-pravilno> (дата звернення: 11.04.2020).
3. Підбір циркуляційного насосу URL : <https://nasosvdom.com.ua/-/info/kak-podobrat-cirkulyacionnyj-nasos> (дата звернення: 11.04.2020).
4. Інформація про циркуляційний насос URL : <http://www.ktto.com.ua/water/nms/1> (дата звернення: 11.04.2020).
5. Інформація про циркуляційний насос URL : <http://www.ktto.com.ua/uploads/nms-1-2013-08-26-22-10-50.pdf> (дата звернення: 12.04.2020).
6. Розрахунок вентилятора та димососу URL : https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/stepanov_kotelniustanov/p8-3.html (дата звернення: 13.04.2020).
7. Інформація про димосос URL : https://kotelzip.com.ua/p632765513-ventilyator-dymososg2e.html?gclid=CjwKCAjwwYP2BRBGEiwAkoBpAl8WILMIDyGE5J551O_tn2qSaTFXPpRw4Tvif1pk-iNyN76ZfdsGJRoCIAgQAvD_BwE (дата звернення: 15.04.2020).
8. Вибір вентилятора URL : <https://kotla.com.ua/stati-obzoryi-novosti/vyibor-ventilyatora-dlya-tvyordotoplivnogo-kotla> (дата звернення: 15.04.2020).
9. Datasheets для нагнітаючого вентилятора URL : <http://allvent.in.ua/shop/252/desc/centrobezhnyj-ventiljator-vents-vcun#tab5> (дата звернення: 15.04.2020).
10. 3-ходовий клапан URL : <https://ecohata.ua/zonalnyj-3-khodovoj-klapan-honeywell-vczmp6000u-1> (дата звернення: 17.04.2020).

11. Привід 3-ходового клапану URL : <https://voltar.com.ua/ua/shop/honeywell-vc-24v-spst-privod-dlia-2-3-hodovyh-klapanov.html> (дата звернення: 17.04.2020).
12. Силові перетворювачі електроприводів: Методичні вказівки до домашньої-контрольної роботи для студентів напряму підготовки бакалавра спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, спеціалізації "Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність" / Уклад: С.М. Ковбаса, І.А. Шаповал – К.: “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2019 р. 25 с.
13. Datasheets модуль IGBT URL : <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbt-modules/detail/sk-9-bgd-065-et-24912000.html> (дата звернення: 20.04.2020).
14. Datasheets конденсатор URL : <https://www.compel.ru/infosheet/TDK-EPC/B25655P4707K031> (дата звернення: 20.04.2020).
15. Datasheets датчик струму URL : <https://domovichok.com.ua/cvetodiody-led-i-radioelektronika/elektronnye-moduli-i-sborki-dlya-arduino-i-tp/modul-datchik-peremennogo-toka-0-5a-s-transformatorom-toka.html> (дата звернення: 21.04.2020).
16. Datasheets датчик напруги URL : <http://www.comsol.ru/katalog/avtomatizaciya/lem/kat.pdf> (дата звернення: 21.04.2020).
17. Datasheets ПЛК URL : <https://www.se.com/ua/ru/product/TM221C40R/%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9-%D0%B1%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9-%D0%B1%D0%BB%D0%BE%D0%BA-m221-40io-%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5/?range=62128-%D0%BF%D0%BB%D0%BA-modicon-m221> (дата звернення: 24.04.2020).
18. Теорія мехатронних систем – 1: Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання напряму підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності

- "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. –К.: НТУУ “КПІ”, 2011 р. –96 с.
- 19.А. Э. Кравчик. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э.Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504с.
- 20.Інформація для проектування креслень URL :
<http://ua.nauchebe.net/2012/10/yak-chitati-sxemi-radioelektronnix-pristro%D1%97v-poznachennya-radiodetalej/> (дата звернення: 05.05.2020).
- 21.Інформація про шнек URL :
<https://portal.tpu.ru/SHARED/a/AKANTAEV/Training/Tab4/Snack.pdf> (дата звернення: 08.05.2020).
- 22.Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием/ Учебник для ВУЗов. М.: – АCADEMIA, 2006. – 272 с.
- 23.Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями /Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с.