

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розрахунок електроприводу системи вентиляції котельні

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи ЕТ-41

спеціальності 141 – Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Долішній Т. І.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Наконечний М. С.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л. Т.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Тарасенко М. Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Микулик П. М.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)  
Кафедра електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)                      \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)  
«    »                      20\_\_ р.

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
(назва освітнього ступеня)  
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)  
студенту Долішньому Тарасу Ігоровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розрахунок електроприводу системи вентиляції котельні

Керівник роботи Наконечний Мирослав Степанович, к.т.н.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «20» січня 2023\_ року № 4/7-29

2. Термін подання студентом завершеної роботи червень 2023 року

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Аналітичний розділ

2 Розрахунково-дослідницький розділ

3 Проектно-конструкторський розділ

4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності та основи охорони праці			
Нормоконтроль			

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ		
2	Аналітичний розділ		
3	Розрахунково-дослідницький розділ		
4	Проектно-конструкторський розділ		
5	Проектно-конструкторський розділ		
6	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях		
7	Оформлення пояснювальної записки		
8	Оформлення графічного матеріалу		

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Долішній Т. І.  
\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Наконечний М. С.  
\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–41. - Т. : ТНТУ, 2023.

Стор. 59; рис. 37; табл. 7;; джерел 15; додатків 1.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Розрахунок електроприводу системи вентиляції котельні».

Метою роботи є розробка автоматизованої енергоефективної системи вентиляції котельні.

У випускній кваліфікаційній роботі було спроектовано автоматичну систему вентиляції приміщення котельні на базі асинхронного частотно-регульованого електроприводу, що відповідає високим вимогам щодо надійності роботи. Автоматичне управління системою здійснюється програмованим логічним контролером відповідно до розробленого алгоритму роботи.

В програмному середовищі Matlab Simulink була розроблена імітаційна модель частотно-регульованого електроприводу зі скалярною системою управління та додатним зворотним зв'язком по статорному струму.

Імітаційна модель містить регулятор обмеження струму, блоки IR-компенсації та компенсації ковзання. Регулятор обмеження струму обмежує максимально допустимий струм електроприводу на рівні 20 А.

Ключові слова:

ЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЕР, РЕГУЛЯТОР ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ .

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	7
1.1 Призначення вентиляційних установок	7
1.2 Регулювання швидкості асинхронних машин	9
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	16
2.1 Характеристика об'єкту	16
2.2. Вибір вентилятора	16
2.3. Попередній вибір двигуна та розрахунок його параметрів	20
2.4 Розрахункові параметри T-подібної схеми заміщення	22
2.5 Вибір пристрою для системи регульованого електроприводу	25
2.6 Вибір кабелів та апаратури захисту	28
2.7 Вибір програмованого логічного контролера	30
2.8 Вибір датчика температури	31
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	33
3.1 Розрахунок параметрів і моделювання системи скалярного частотного управління у середовищі Matlab	33
3.2 Імітаційна модель регульованого електроприводу	35
3.3 Алгоритм роботи автоматичної системи вентиляції	46
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	48
4.1 Заходи безпеки під час експлуатації електродвигунів	48
4.2 Засоби захисту від ураження електричним струмом	50
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	54
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	55
ДОДАТКИ	57

## ВСТУП

Для регулювання і оптимізації функціонування котлових агрегатів технічні засоби стали застосовуватися ще на початкових етапах автоматизації промисловості і виробництва. Сьогоднішній рівень розвитку цього напрямку дозволяє значно підвищити рентабельність і надійність котельного обладнання, забезпечити безпеку і інтелектуалізацію праці обслуговуючого персоналу.

Енергозбереження з кожним роком стає дедалі актуальнішою проблемою. Обмеженість енергетичних ресурсів, висока вартість енергії, негативний вплив на довкілля. Зменшення споживання електроенергії можна досягти за рахунок зниження втрат енергії, які з'являються внаслідок неякісного електропостачання, аварійних ситуацій тощо. До 90% всіх втрат в електроприводі припадає саме на сферу електроспоживання, 10% електроенергії, що залишилися, втрачається при передачі електроенергії. З цього твердження випливає, що для найбільшого енергозбереження слід розглядати саме сферу енергоспоживання як найбільш енерговитратну. Одним із шляхів вирішення цього питання є застосування енергозберігаючих електроприводів, які забезпечують виконання вимог технологічного процесу та покращення енергетичних показників електроприводу.

Особливу увагу слід приділити енергозбереженню в електроприводах механізмів, до яких відносяться системи вентиляції. Створення енергозберігаючих електроприводів здійснюється застосуванням ШІМ-перетворювачів у областях, де потрібно регулювати частоту обертання електродвигуна у процесі роботи. Даний спосіб енергозбереження є перспективним напрямом зменшення споживання електроенергії з поліпшенням енергетичних характеристик електроприводу.

При автоматизації котельні автоматизуються всі без винятку основні та супутні технологічні процеси. Це веде до звільнення обслуговуючого персоналу від необхідності регулювати їх вручну. Введення спеціальних

автоматичних пристроїв та приладів сприяє безаварійній роботі обладнання, за винятком випадків отримання травми на виробництві, застерігаючи забруднення атмосферного повітря. В останні роки все більше уваги приділяється проблемам та питанням комплексної автоматизації промислових котелень.

Метою роботи є розробка автоматизованої енергоефективної системи вентиляції котельні.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Призначення вентиляційних установок

Вентилятори призначені для підтримки якісного складу повітря у виробничих та адміністративних приміщеннях за рахунок забезпечення притоку чистого та видалення відпрацьованого повітря, відсмоктування газів, підтримки мікроклімату, а також подачі кисню або газу до камери електropечі, котельних та інших установках. Вентилятори здатні створювати перепад тиску в діапазоні  $(0,01 \dots 0,1) \cdot 10^5$  Па.

Найбільший негативний вплив на фізіологічний стан біологічних об'єктів та їх продуктивність надають два основні фактори – температура та вологість повітря у приміщенні.

Розрізняють вентиляційні установки з природною тягою, механічним спонуканням повітрообміну та комбінованої дії. Вентиляційні системи поділяються на припливні, витяжні та змішані, з підігрівом та без підігріву повітряних мас. Припливні системи вентиляції з природною тягою працюють за рахунок швидкісного тиску вітру, а витяжні - за рахунок різниці температур усередині будівлі та зовні.

За конструкцією вентилятори діляться на відцентрові та осьові. Установки знаходять широке застосування у промисловості, АПК та у побутовій сфері.[1,2]

Відцентрові вентилятори випускаються низького (не більше 1000 Па), середнього (1000...3000 Па) та високого (3000...12000 Па) тиску серій ВР, ВЦ, ЦП та Ц. На рисунку 1.1 представлені принципові конструкції відцентрових вентиляторів.





Рисунок 1.1 – Відцентрові вентилятори: а – низького та середнього тиску; б – високого тиску

Робоче колесо відцентрового вентилятора обертається у кожусі. Повітря засмоктується через бічне отвір і викидається в систему повітроводів через верхній вихідний розтруб. Конструктивно відцентрові вентиляційні установки низького та середнього тиску випускаються без передавального механізму, а агрегати високого тиску виготовляються з ремінною передачею.

Осьові вентилятори випускаються наступних марок: ВО, ВОЕ, ЕСW, АR, АW. На рисунку 1.2 дано конструкції осьових вентиляторів.

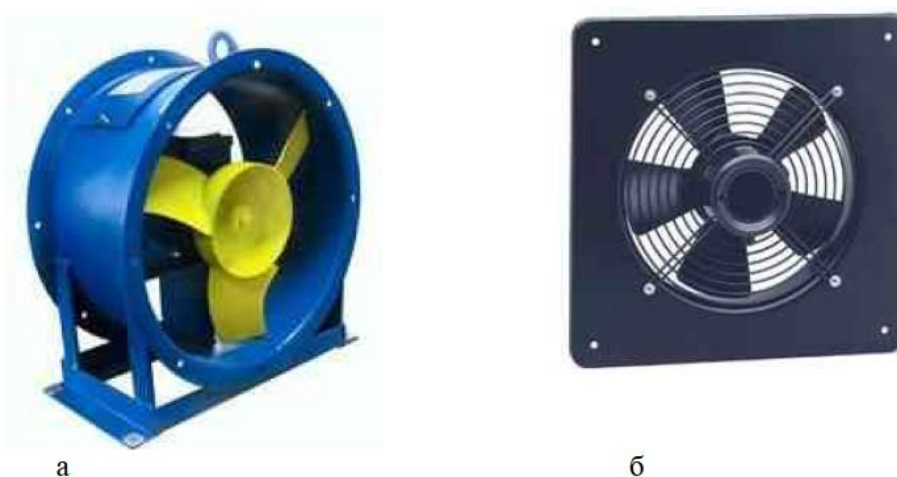


Рисунок 1.2 – Конструкції осьових вентиляторів: а – вентилятор осьовий для охолодження промислового обладнання; б – вентилятор витяжний настінний

Осьовий вентилятор має робоче колесо з кількома лопатками. Крильчатка обертається електродвигуном, укріпленим усередині корпусу, у результаті створюється тяга повітря через розтруб вентилятора. Осьові вентилятори є складовою припливно-витяжних установок і встановлюються на стінах та дахах виробничих приміщень. У комплекті з різними нагрівальними пристроями вони застосовуються для обігріву та сушіння приміщень та в механізмах теплових завіс.

## 1.2 Регулювання швидкості асинхронних машин

Для асинхронних індукційних машин швидкість обертання ротора, частота напруги живлення, кількість полюсів та ковзання пов'язані наступним виразом:

$$n = \frac{120f_1(1-s)}{p}$$

де,  $n$  - механічна швидкість (про/хв),  $f_1$  - частота напруги живлення (Гц),  $p$  - кількість полюсів,  $s$  - ковзання

Аналіз вищенаведеної формули показує, що механічна швидкість двигуна є функцією трьох параметрів. Так, зміна будь-якого з цих параметрів буде призводити до зміни швидкості двигуна, як зазначено в наступній таблиці.[3]

Таблиця 1.1 Зміна швидкості

Параметр	Характеристика
Кількість полюсів	Дискретне регулювання
	Збільшення габариту
Ковзання	Плавне регулювання
	Втрати в роторі
	Обмежений діапазон швидкостей
Частота напруги	Плавне регулювання
	Використання перетворювача частоти

Використання перетворювачів частоти нині є найефективнішим методом регулювання швидкості обертання електродвигунів. На виході перетворювача з напруги постійної частоти та постійної амплітуди формується напруга, змінна по частоті та амплітуді. Зміна частоти напруги, що подається на затискачі електродвигуна, призводить до зміни частоти магнітного поля, що обертається, яке в свою чергу змінює механічну швидкість обертання валу електродвигуна.

Момент на валу, що розвивається електродвигуном, розраховується за такою формулою:

$$M = k_1 \cdot \varphi_m \cdot I_2$$

Нехтуючи падінням напруги, обумовленої опором статора, потік намагнічування розраховується за формулою:

$$\varphi_m = k_2 \cdot \frac{V_1}{f_1}$$

де,  $M$  - момент на валу, Нм;

$\varphi_m$  - потік намагнічування, Вб;

$I_2$  - струм ротора, А;

$k_1$ ,  $k_2$  - константи – залежать від матеріалу та виконання електричної машини.

Враховуючи, сталість моменту навантаження та допускаючи, що струм залежить від навантаження, отримуємо, що зміна напруги живлення яка подається на електродвигун з амплітудою пропорційною частоті призводить до сталості потоку намагнічування і, отже, постійному крутному моменту, в той час як струм залишається незмінним.[4-5]

Таким чином, двигун забезпечує постійне коригування швидкості і крутного моменту щодо механічного навантаження. Втрати при цьому можуть бути зведені до мінімуму відповідно до умов навантаження шляхом підтримки постійного ковзання на будь-якій швидкості для заданого навантаження.

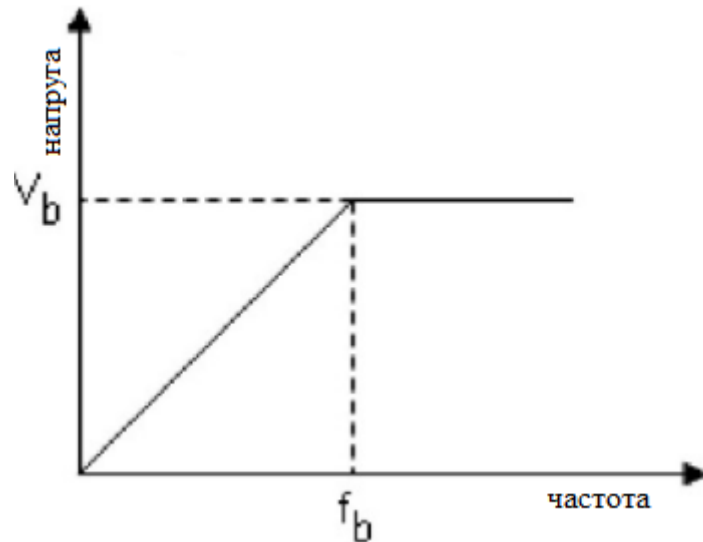


Рисунок 1.3 – Залежність напруги від частоти

Співвідношення  $V/f$  залишається постійним до базової (номінальної) швидкості двигуна. Вище цієї частоти значення напруги залишається незмінним, тоді як частота може збільшуватися, як показано на рисунку 1.3.

Область вище базової частоти називається областю ослаблення поля, в якій потік зменшується в результаті збільшення частоти, і як наслідок зменшується крутний момент двигуна.[6] Типова залежність крутного моменту, від швидкості асинхронного двигуна при керуванні від перетворювача частоти зображена на рисунку 1.4.

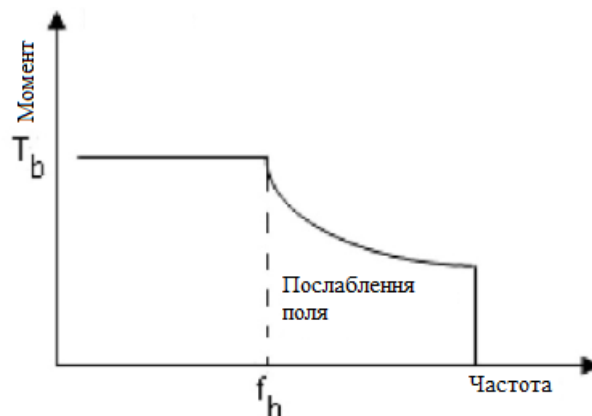


Рисунок 1.4 – Залежність крутного моменту від частоти

Виходить, що крутний момент, залишається постійним до базової частоти і вище цієї частоти він падає (ослаблення поля). Оскільки вихідна потужність пропорційна моменту, помноженому на швидкість, вона зростає лінійно до базової частоти, а вище цієї частоти залишається постійною. Це показано на рисунку 1.5.

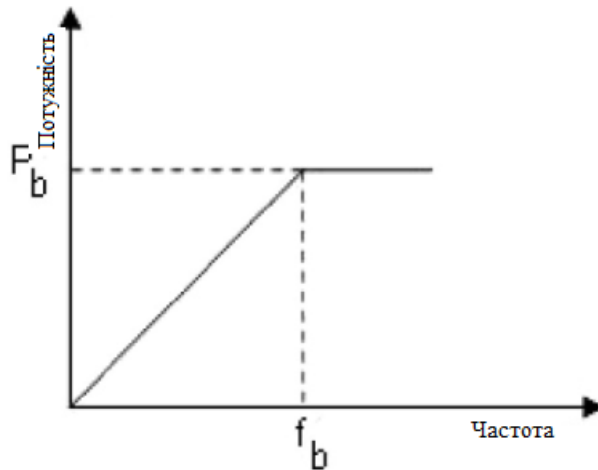


Рисунок 1.5 – Залежність потужності від частоти

За останні роки значно збільшилася кількість застосування електродвигунів з регулюванням швидкості обертання перетворювачем частоти. Це пояснюється багатьма перевагами таких застосувань:

- З боку управління – управління може бути встановлене віддалено у відповідному місці, залишаючи в зоні обробки тільки електродвигун – на противагу гідравлічним та механічним системам регулювання швидкості.

- Зниження витрат - прямий запуск електродвигуна викликає кидки струму, що може нашкодити електродвигуну та інше електричне устаткування. Перетворювач частоти забезпечує м'який запуск електродвигуна, і як наслідок зменшення витрат на обслуговування обладнання.

- Збільшення продуктивності – промислові системи часто робляться «із запасом» через очікування збільшення продуктивності у майбутньому.

Перетворювачі частоти дозволяють регулювати робочу швидкість залежно від обладнання та виробничих потреб.

- Енергоефективність – загальний ККД системи залежить як від використовуваного електродвигуна, а й від використовуваного способу управління. Перетворювачі частоти зазвичай мають високий ККД, що досягає 97% і вище. Асинхронні електродвигуни мають високий рівень ККД, що досягає 95% і вище у великих силових електричних машинах, що працюють в номінальних режимах.

- Універсальність – статичні перетворювачі частоти використовуються як для застосувань із постійним моментом навантаження, так і зі змінним. У застосуваннях зі змінним моментом напруга на затискачах електродвигуна зменшується. У застосуваннях з постійним моментом (або постійною потужністю) покращення ефективності системи відбувається завдяки можливості плавного регулювання швидкості, без необхідності використання кількох електродвигунів та механічних систем для зміни швидкості (наприклад, шківів та шестерні), які вводять додаткові втрати.

### **1.3 Характеристики перетворювачів частоти**

Для регулювання швидкості електродвигуна використовується ШІМ напруга на виході частоти перетворювача. Перетворювачі працюють як інтерфейс між джерелом енергії (лінії електроживлення) і асинхронним електродвигуном.[7]

Для того щоб отримати вихідний сигнал необхідної напруги та частоти, вхідний сигнал повинен пройти три етапи:

Діодний міст - Випрямлення вхідної напруги змінного струму до постійної амплітуди та частоти.

Ланка постійного струму або фільтр – регулювання/згладжування випрямленої напруги з використанням конденсаторів.

Інвертор на IGBT транзисторах – перетворення напруги, після ланки постійного струму в змінну напругу, змінної амплітуди і частоти. Рисунок 1.6 показує три основні ланки перетворювача частоти.

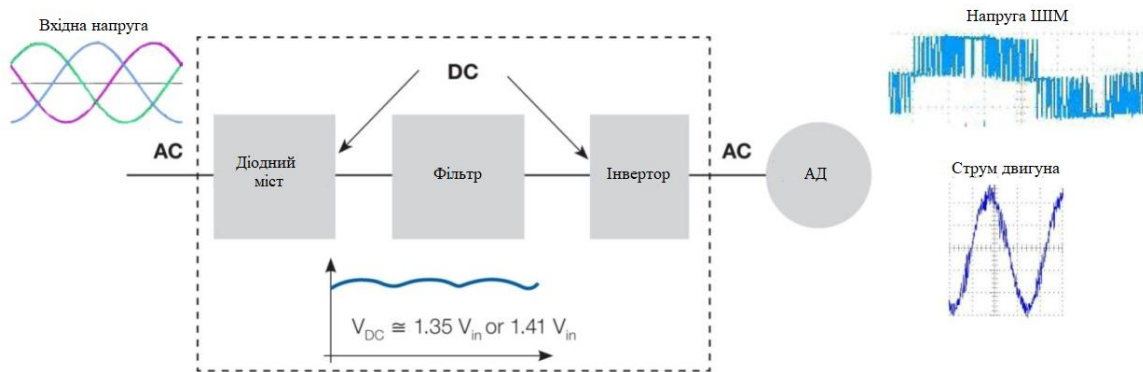


Рисунок 1.6 – Основні ланки перетворювача частоти

Є два базові типи управління: скалярне управління (без зворотного зв'язку) і векторне управління (з або без зворотного зв'язку).[8-9]

Скалярне управління базується на оригінальній концепції перетворювачів частоти: сигнал певного співвідношення напруга/частота подається на клеми електродвигуна і це співвідношення зберігається постійним у всьому діапазоні частот, щоб зберегти постійним потік намагнічування електродвигуна. Скалярне управління зазвичай використовується, коли немає необхідності швидкого реагування на зміни крутного моменту та швидкості, і особливо цікаво, коли одним перетворювачем регулюється швидкість обертання кількох підключених до нього електродвигунів.

Управління здійснюється без зворотного зв'язку, і точність підтримки швидкості є функцією ковзання двигуна, яке залежить від навантаження, оскільки частота накладається на статорі обмотці. Для того, щоб поліпшити продуктивність двигуна на низьких швидкостях, деякі приводи використовують спеціальні функції, такі як компенсація ковзання (послаблення зміни швидкості як функції навантаження) та підвищення

крутного моменту (збільшення коефіцієнта  $V/F$  для компенсації падіння напруги на статорі), так що крутний момент двигуна підтримується незмінним. Це найбільш широко використовуваний тип управління завдяки своїй простоті, а також тому, що більшість задач не потребують високої точності або швидкої зміни швидкості.

Векторне керування забезпечує високу швидкодію та точність управління швидкістю електродвигуна та крутного моменту. По суті, струм двигуна поділяють на два вектори, один з них виробляє потік намагнічування, а інший утворює крутний момент, кожен із яких регулюється окремо. Векторне керування може бути з розімкненим контуром (без датчиків зворотного зв'язку) або замкнутим контуром (з датчиками зворотного зв'язку).

Зворотний зв'язок швидкості - датчик швидкості (наприклад, інкрементальний енкодер), встановлюється на електродвигуні. Цей режим забезпечує високу точність управління, як крутним моментом, так і швидкістю двигуна навіть при дуже низьких (і нульових) швидкостях.

Бездатчикове управління - простіше, ніж регулювання із замкнутим контуром, але його дія обмежена особливо на дуже низьких швидкостях. На більш високих швидкостях даний режим практично такий самий, як і векторне управління зі зворотним зв'язком.

Основна відмінність між цими двома типами керування полягає в тому, що скалярне управління враховує тільки величини миттєвих електричних величин (магнітного потоку, струму та напруги), прикладених до статора, з рівняннями на основі еквівалентного електричного кола електродвигуна, тобто рівняння стаціонарного стану. З іншого боку, при векторному управлінні розраховуються миттєві електричні величини, що впливають на потокозчеплення ротора як вектори та його рівняння ґрунтуються на просторовій динамічній моделі двигуна. Асинхронний двигун при векторному управлінні розглядається як двигун постійного струму з окремо керованим моментом і потоком.



## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Характеристика об'єкту

Котельня представляє собою одноповерхову будівлю в якій розташовано установку, що складається з котла та допоміжного технологічного обладнання (машини для створення тяги, пристрої управління, димова труба), для гарячої води та пари за рахунок згоряння палива. Основним пристроєм котельні є водогрійний котел, в якому відбувається нагрівання води.

Обладнання котельні є відповідальними споживачами, неправильне функціонування або несправність будь-якого агрегату можуть призвести до загрози життю та здоров'ю персоналу. Однією з причин виникнення таких ситуацій є порушення умов експлуатації обладнання, до яких належать кліматичні умови.

Об'єм повітря, що потрібний для видалення теплоти, подається вентилятором, який безпосередньо з'єднаний з асинхронним електродвигуном. Залежно від конструкції та принципу дії виділяють осьові та радіальні вентилятори.

Детальний план приміщення котельні показано в додатку А.

### 2.2. Вибір вентилятора

Вентилятори працюють на мережу без протитиску, внаслідок чого залежність моменту статичного опору на валу привідного двигуна від швидкості носить квадратичний характер, а потужність, що підводиться до вентилятора без урахування втрат на тертя в підшипниках, пропорційна кубу швидкості [2]. Вентилятори мають великий момент інерції, іноді на порядок більший інерції привідного двигуна, що ускладнює їх пуск, а в деяких випадках вимагає застосування електричного гальмування для швидкої зупинки робочого колеса. Необхідний діапазон регулювання швидкості для

вентиляторів зазвичай не перевищує 2:1. Теплота від обладнання машинного відділення визначаються [1]:

$$Q = N_y \cdot k_i \cdot k_z \cdot k_o = 750000 \cdot 0.8 \cdot 0.5 \cdot 0.5 = 150 \text{ кВт} \quad (2.1)$$

де  $N_y = 750 \text{ кВт}$  - прийняте значення сумарної потужності обладнання;

$k_i = 0,8$  - коефіцієнт використання настановної потужності (приймається від 0,7 до 0,9);

$k_z = 0,5$  - коефіцієнт завантаження (приймається від 0,5 до 0,8);

$k_o = 0,5$  - коефіцієнт одночасності роботи електродвигунів (приймається від 0,5 до 1).

Необхідний об'єм повітря, який повинен подавати вентилятор, визначається з рівняння теплового балансу [6]:

$$L = \frac{3600 \cdot Q}{C \cdot \rho (t_{in} - t_{out})} = \frac{3600 \cdot 150000}{1004 \cdot 1.2 \cdot (40 - 20)} = 22410.39 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.2)$$

де  $C = 1004 \text{ Дж/кг} \cdot \text{°C}$  – теплоємність повітря;

$\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$  – густина повітря;

$t_{in} = 40 \text{ °C}$  – температура повітря, що відходить;

$t_{out} = 20 \text{ °C}$  – температура повітря, що приходить.

За розрахованим значенням необхідного повітрообміну (продуктивність вентилятора) було обрано радіальний вентилятор низького тиску ВР 80-75, зовнішній вигляд якого наведено на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд радіального вентилятора ВР 80-75

Робоче колесо вентиляторів містить 12 загнутих назад лопаток. Лопатки спеціальної нециліндричної форми з поверхнею, виконані зі змінними по ширині колеса кутами входу. Конічний вхідний патрубок має тороїдальну вихідну ділянку, що забезпечує рівномірне навантаження на лопатки по всій ширині та високий максимальний ККД вентиляторів. Технічні характеристики вентилятора представлені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики вентилятора

Продуктивність, $10^3 \cdot \text{м}^3/\text{год}$ .	15,9 – 31,5
Тиск, Па	860 - 550
Потужність, кВт	7,5
Частота обертання робочого колеса, об/хв	725
Маса, кг	600

Область застосування:

- у системах вентиляції виробничих, громадських та житлових будівель;
- у системах кондиціонування повітря;
- у технологічних установках, призначених для переміщення повітря та газопароповітряних сумішей з вмістом пилу та твердих домішок не більше  $0,1 \text{ г}/\text{м}^3$ , що не містять липких та волокнистих матеріалів.

Вентилятори експлуатуються в умовах помірного та тропічного клімату. Допустима температура навколишнього середовища від мінус  $40^\circ\text{C}$  до плюс  $40^\circ\text{C}$ .

Аеродинамічна характеристика вентилятора представлена на рисунку 2.2.

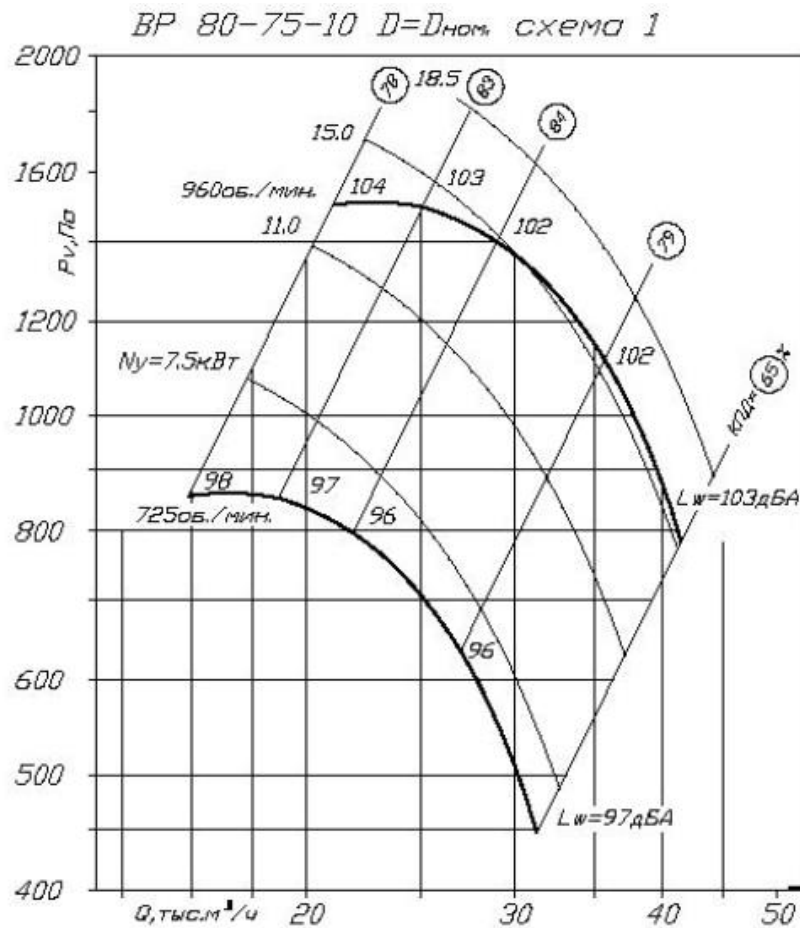


Рисунок 2.2 – Аеродинамічна характеристика вентилятора ВР 80-75

Режим роботи вентилятора, що відповідає максимальному значенню ККД, є номінальним [7]. Максимальне значення ККД визначається за аеродинамічною характеристикою вентилятора і чисельно рівне 84%.

Визначимо повну та корисну потужність та повний та корисний момент на валу вентилятора за номінального режиму.

Номінальна швидкість обертання привідного двигуна:

$$\omega_n = 725 \text{ об/хв} = 75.9 \text{ рад/с}$$

Повна потужність на валу вентилятора:

$$N_{вал} = N_{баз} \frac{Q_i}{Q_{баз}} \cdot \frac{p_i}{p_{баз}} \cdot \frac{\eta_{баз}}{\eta_i} = 7.5 \frac{23000}{22000} \cdot \frac{800}{900} \cdot \frac{0.84}{0.84} = 6.97 \text{ кВт} \quad (2.3)$$

Корисна потужність на валу вентилятора:

$$N_{кор} = N_{вал} \cdot \eta_i = 6.97 \cdot 0.84 = 5.85 \text{ кВт} \quad (2.4)$$

Повний момент навантаження на валу вентилятора:

$$M_{вал} = \frac{M_{вал}}{\omega_n} \cdot 1000 = \frac{6.97}{75.9} \cdot 1000 = 91.8 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.5)$$

Корисний момент навантаження на валу вентилятора:

$$M_{кор} = \frac{N_{коор}}{\omega_n} \cdot 1000 = \frac{5.85}{75.9} \cdot 1000 = 77.05 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.6)$$

### 2.3. Попередній вибір двигуна та розрахунок його параметрів

Номінальна потужність приводного двигуна повинна дорівнювати або трохи більше потужності на валу вентилятора. Відповідно до цієї умови для синхронної швидкості 750 об/хв був обраний асинхронний електродвигун АІР160S8 з номінальною потужністю  $P_H = 7,5 \text{ кВт} \geq 6,97 \text{ кВт}$ .

Зовнішній вигляд двигуна представлений рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд асинхронного двигуна

Технічні характеристики електродвигуна АІР160S8 наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики електродвигуна

$P_H$ , кВт	$U_{1H}$ , В	$n$ , об/хв	$\eta_H$ , в.о.	$\cos \varphi$ , в.о.	$k_{I,ДВ} = \frac{I_{пуск}}{I_H}$	$k_{II} = \frac{M_{пуск}}{M_H}$	$k_{max} = \frac{M_{max}}{M_H}$	$J_{ДВ}$ , кг·м <sup>2</sup>
7,5	220	750	0,85	0,73	6	1,9	2	0,08

Число пар полюсів двигуна:  $p = 4$ .

Ступінь захисту, що забезпечується оболонкою – IP54

Синхронна швидкість обертання двигуна:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_{1n}}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ об/хв} \quad (2.7)$$

де  $f_{1n}$  - частота мережі;

$p$  - число пар полюсів.

Синхронна кутова швидкість обертання двигуна:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 750}{30} = 78.5 \text{ рад/с} \quad (2.8)$$

Номінальне ковзання:

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{750 - 725}{750} = 0.033 \text{ в.о.} \quad (2.9)$$

Номінальна кутова швидкість обертання двигуна:

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - s_n) \cdot \omega_0 = (1 - 0.033) \cdot 78.5 = 75.9 \text{ рад/с} \quad (2.10)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{7500}{75.9} = 98.752 \text{ Н·м} \quad (2.11)$$

Номінальний струм статора двигуна:

$$I_H = \frac{P}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_H} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0.73 \cdot 0.85} = 18.314 \text{ А} \quad (2.12)$$

Струм статора двигуна при частковому завантаженні:

$$I_{11} = \frac{p_3 \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_3 \cdot \eta_3} = \frac{0.75 \cdot 7500}{3 \cdot 220 \cdot 0.73 \cdot 0.85} = 14.272 \text{ А} \quad (2.13)$$

де  $p_3 = 0,75$  - коефіцієнт завантаження двигуна;

$$\cos \varphi_3 = 0,73;$$

$$\eta_3 = \eta_H = 0,85.$$

Струм холостого ходу двигуна

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left( p_3 \cdot I_{1H} \cdot \frac{1-s_n}{1-p_3 \cdot s_n} \right)^2}{1 - \left( p_3 \cdot \frac{1-s_n}{1-p_3 \cdot s_n} \right)^2}} \quad (2.14)$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{14.272 - \left( 0.75 \cdot 18.314 \cdot \frac{1-0.033}{1-0.75 \cdot 0.033} \right)^2}{1 - \left( 0.75 \cdot \frac{1-0.033}{1-0.75 \cdot 0.033} \right)^2}} = 6.385 \text{ A}$$

Максимальний струм двигуна при прямому пуску:

$$I_{1\max} = k_{i\text{дв}} \cdot I_{1H} = 6 \cdot 18.314 = 109.882 \text{ A} \quad (2.15)$$

Критичний момент двигуна:

$$M_k = k_{\max} \cdot M_{\text{дв.н}} = 2 \cdot 98.8 = 197.6 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.16)$$

Пусковий момент двигуна при прямому пуску:

$$M_{\text{дв.пуск}} = k_n \cdot M_{\text{дв.н}} = 1.6 \cdot 98.8 = 158.08 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.17)$$

## 2.4 Розрахункові параметри Т-подібної схеми заміщення

Для розрахунку електромеханічних та механічних характеристик асинхронного двигуна необхідно скористатися його математичною моделлю, яка у випадку представляється різними схемами заміщення. Найбільш простою та зручною для розрахунків асинхронного двигуна є Т-подібна схема заміщення, представлена показана на рисунку 2.4, де [10]:

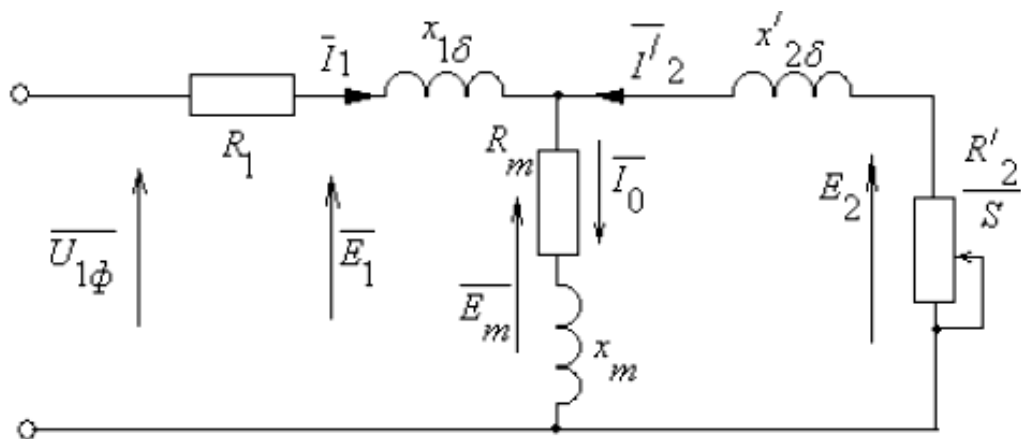


Рисунок 2.4 – Т-подібна схема заміщення двигуна

$U_{1\phi}$  – фазна напруга що підводиться до обмотки статора двигуна;

$I_1$  – струм обмотки статора;

$R_1$  – активний опір статора обмотки;

$X_{1\sigma}$  – індуктивний опір розсіювання обмотки статора;

$I'_2$  – наведений струм обмотки ротора до статорної обмотки;

$R'_2$  – наведений активний опір гілки обмотки ротора до гілки обмотки статора;

$X'_{2\sigma}$  – наведений індуктивний опір розсіювання гілки обмотки ротора до гілки обмотки статора;

$I_0$  – струм холостого ходу (намагнічування);

$X_m$  – індуктивний опір контуру намагнічування.

Для знаходження значень наведеного активного опору обмотки ротора та активного опору статора визначимо коефіцієнти:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{6.385}{2 \cdot 6 \cdot 18.314} = 1.029; \quad (2.18)$$

$$A_1 = m \cdot U_{1H}^2 \cdot \frac{1 - s_n}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = 3 \cdot 220^2 \cdot \frac{1 - 0.033}{2 \cdot 1.029 \cdot 2 \cdot 7500} = 4.548, \quad (2.19)$$

де  $m = 3$  – число фаз,

$I_0$  – струм холостого ходу.

Активний опір ротора, наведений до обмотки статора:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k}\right) \cdot C_1} = \frac{4.548}{\left(1 + \frac{1}{0.133}\right) \cdot 1.029} = 0.517 \text{ Ом} \quad (2.20)$$

де  $\beta = 1$ ;

$s_k$  – критичне ковзання, яке визначається за формулою Клосса:

$$s_k = s_n \cdot \frac{k_{\max} \cdot \sqrt{k_{\max}^2 - [1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} \quad (2.21)$$



$$s_k = 0.033 \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2^2 - [1 - 2 \cdot 0.033 \cdot 1 \cdot (2 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0.033 \cdot 2 \cdot (2 - 1)} = 0.133 \text{ в.о.}$$

Активний опір статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1.029 \cdot 0.517 \cdot 1 = 0.532 \text{ Ом} \quad (2.22)$$

Індуктивний опір короткого замикання:

$$X_{кз} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 7.479 \cdot 1.029 \cdot 0.517 = 3.98 \quad (2.23)$$

$$\text{де } \gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0.133^2} - 1^2} = 7.479$$

Індуктивний опір роторної обмотки, наведений до статорного:

$$X'_{2n} = 0.58 \cdot \frac{X_{кз}}{C_1} = 0.58 \cdot \frac{3.98}{1.029} = 2.243 \text{ Ом} \quad (2.24)$$

Індуктивний опір обмотки статора:

$$X_{1H} = 0.42 \cdot X_{кз} = 0.42 \cdot 3.98 = 1.672 \text{ Ом} \quad (2.25)$$

За знайденими значення визначимо критичне ковзання:

$$s_{k1} = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{кз}^2}} = \frac{1.029 \cdot 0.517}{\sqrt{0.532^2 + 3.98^2}} = 0.133 \text{ в.о.} \quad (2.26)$$

Отримані значення  $s_k$  та  $s_{k1}$  збігаються.

ЕРС гілки намагнічування, наведена магнітним потоком повітряного зазору в обмотці статора в номінальному режимі:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi - R_1 \cdot I_{1H})^2 + ((U_{1H} \cdot \sin \varphi - X_{1H} \cdot I_{1H}))^2} \quad (2.27)$$

$$\text{де } \varphi = \arccos(\cos \varphi) = 0.752$$

$$\sin \varphi = 0.683$$

$$E_1 = \sqrt{(220 \cdot 0.73 - 0.532 \cdot 18.314)^2 + ((220 \cdot 0.683 - 1.672 \cdot 18.314))^2} = 235.603 \text{ В}$$

Індуктивний опір контуру намагнічування:

$$X_{\mu H} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{235.603}{6.385} = 36.899 \text{ Ом} \quad (2.28)$$

Індуктивність обмотки статора, обумовлена потоком розсіювання:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1.672}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 5.324 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (2.29)$$

Наведене значення індуктивності обмотки ротора, обумовленої потоком розсіювання:

$$L_{2\sigma} = \frac{X'_{2H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{2.243}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 7.145 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (2.30)$$

Результуюча індуктивність, обумовлена магнітним потоком у повітряному зазорі, що створюється сумарною дією струмів статора (індуктивність контуру намагнічування):

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{36.899}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.118 \text{ Гн} \quad (2.31)$$

Параметри схеми заміщення представлені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. - Параметри схеми заміщення

$R_1$ , Ом	$X_1$ , Ом	$L_1$ , мГн	$X_{\mu}$ , Ом	$L_{\mu}$ , Гн	$R'_2$ , Ом	$X'_2$ , Ом	$L'_2$ , мГн	$X_{кз}$ , Ом
0,532	1,672	5,324	36,899	0,118	0,517	2,243	7,145	3,98

## 2.5 Вибір пристрою для системи регульованого електроприводу

Для плавного пуску та регулювання швидкості асинхронного електродвигуна застосовується перетворювач частоти. За номінальною потужністю двигуна та відповідно до умови:  $I_{H.нч} \geq I_{H.дв} = 20 \text{ А} \geq 18,314 \text{ А}$ , було обрано перетворювач частоти VFD075E43A виробництва компанії Delta Electronics.

Зовнішній вигляд перетворювача наведено на рисунку 2.5. Даний перетворювач частоти може застосовуватися в системи кондиціонування будівель, каналізаційні системи, циркуляційні системи з постійним тиском, насоси для водопостачання будівель, сільськогосподарські насоси, керування температурою в печах, компресори вентилятори для теплообміну, насоси для

фонтанів, сушильні камери та ін. Охолодження елементів електричної схеми перетворювача здійснюється за допомогою радіатора, що знаходиться всередині корпусу, додаткове охолодження радіатора забезпечують два вентилятори.[11]



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд перетворювача частоти VFD075E43A

Основні технічні характеристики перетворювача наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 Основні технічні характеристики перетворювача частоти

Параметр, одиниці вимірювання	Значення
Номінальна потужність електродвигуна, кВт	7,5
Діапазон вхідної напруги, В	380-480
Діапазон частоти вхідної напруги, Гц	50 ±5%
Номінальний вихідний струм, А	18
Вихідна частота, Гц	0,1-600
Мага. кг	4,2

До основних функцій відносяться; вбудований ПЛК, AVR, S-крива розгону/уповільнення, обмеження напруги та струму, запис 5 відмов, блокування реверсу, перезапуск при зникненні живлення, гальм. пост. струмом, автоматична компенсація моменту/ковзання, автотестування

двигуна, обмеж. вихідної частоти, блокування зміни параметрів, ПІД-регулятор, лічильник імпульсів, MODBUS, скидання аварії, авторестарт після аварії, режим автоматичного енергозбереження, режим сну, імпульсний вихід, управління вбудованим вентилятором, основна/додаткова частота, перемикання між двома джерелами завдання частоти та їх комбінація, NPN/PNP входи.

Вихідний каскад інвертора виконується на основі IGBT-модулів із вбудованими зворотними діодами. Методом високочастотної широтно-імпульсної модуляції здійснюється перетворення напруги постійного струму в систему трифазних змінних напруг. Схема підключення перетворювача частоти наведена на рисунку 2.6.

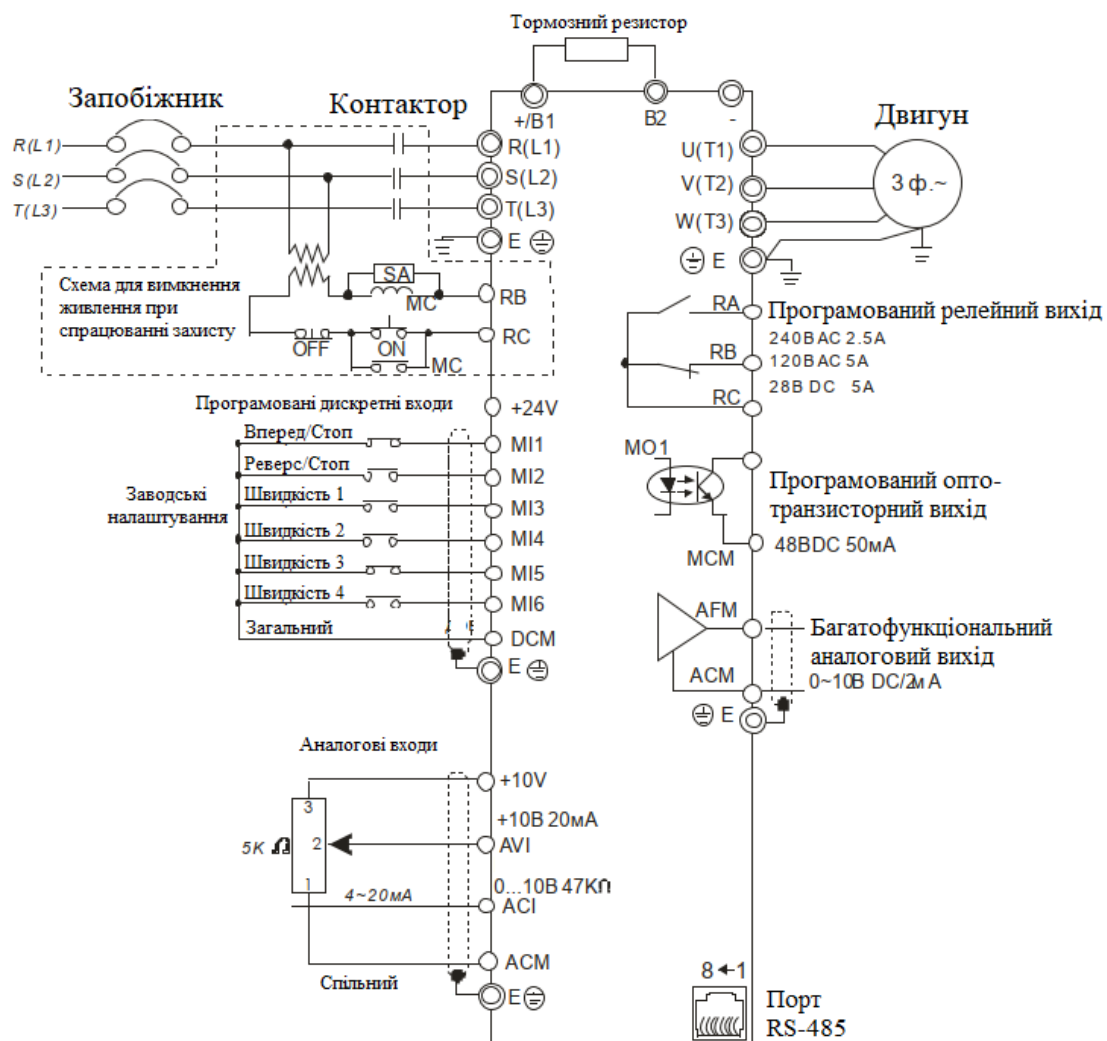


Рисунок 2.6 – Схема підключення перетворювача частоти

Всі ланки управління мають гальванічну розв'язку від силових високовольтних напруг. Напряга ізоляції – 1,5 кВ. Дискретні входи/виходи мають оптронну розв'язку від мікроконтролера та ізольовані від усіх інших ланок перетворювача. Релейні виходи мають "сухі" контакти і можуть бути підключені до потенціалу будь-яких ланок вводу/виводу або включені до схем управління силовими колами. Напряга ізоляції між котушкою та контактами – 1,5 кВ.

## 2.6 Вибір кабелів та апаратури захисту

Підключення мережі, електродвигуна та модуля резистивного гальмування виконується кабелями з ізоляцією, що відповідає напрузі мережі живлення і нагрівостійкістю не менше 70 °С. Підключення до мережі виконується через автоматичний захисний вимикач, вибраний виходячи з номінального струму перетворювача і з відповідною характеристикою. Переріз проводів кабелів виконуються згідно з таблицею 2.5.

Таблиця 2.5. Рекомендації щодо вибору перерізу проводів кабелів

Переріз проводів підключення мережі $S$ , мм <sup>2</sup>	Переріз проводів підключення електродвигуна $S$ , мм <sup>2</sup>	Переріз захисного провідника $S$ , мм <sup>2</sup> , не менше
Клеми R, S, T	Клеми U, V, W	РЕ
2,5-4,0	2,5-4,0	4

Кабель підключення електродвигуна необхідно розміщувати по можливості окремо від інших кабелів та уникати паралельного прокладання його з іншими кабелями. При паралельній прокладці дотримуватися мінімальних відстаней між кабелями:

- 0,3 м – при довжині кабелю до 50 м;
- 1,0 м – при довжині кабелю до 200 м.

Максимальна довжина кабелю підключення електродвигуна без фільтрів не має перевищувати 15 м. Кабелі управління повинні прокладатися окремо від силових. Силові кабелі повинні перетинати кабелі керування під кутом  $90^\circ$ .

При підключенні кабелів сигналів керування потрібно виконувати такі рекомендації:

- підключення проводити гнучкими екранованими багатожильними кабелями;
- переріз проводів кабелів повинен відповідати характеристикам клем підключення;
- сигнали з напругою постійного струму 24 В та 110/220 В змінного струму рекомендується підключати окремими кабелями;
- сигнали послідовного інтерфейсу RS-485 та перетворювача кутових переміщень необхідно підключати екранованими кабелями з витотою парою;

Для захисту перетворювачів частоти та асинхронних електродвигунів у разі короткого замикання встановлюються автоматичні вимикачі [12].

Струм теплового розчеплення автоматичного вимикача  $I_{T.P.}$  повинен бути більшим за номінальний струм навантаження  $I_{H.nч}$ . Відповідно до цієї умови було обрано автоматичний вимикач ВА 47-29 з  $I_{T.P.} = 20$  А.

Зовнішній вигляд автоматичного вимикача представлений рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 – Автоматичний вимикач ВА 47-29 (20 А)

## 2.7 Вибір програмованого логічного контролера

У проектованій автоматичній системі вентиляції використовується програмований логічний контролер ОВЕН ПЛК110.

Основне призначення програмованих контролерів з дискретними входами/виходами на борту для автоматизації середніх систем. Оптимальні для побудови систем автоматизації середнього рівня та розподілених систем керування. Застосовується для керування харчопереробними та пакувальними апаратами, кліматичним обладнанням, автоматизацією торгівельного обладнання, у виробництві будівельних матеріалів.[13]

Технічні характеристики контролера наведено у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 Технічні характеристики контролера ОВЕН ПЛК110

Кількість входів	18
Швидких входів	2
Кількість виходів	12
Швидких виходів	4
Живлення 5 В у RS-232	+
Процесор	300 МГц
ОЗП	128 кБайт + 4 МБ (розмір heap варіюється)
Інтерфейси	RS-232, RS-232 Debug, RS-485 (1 або 2), Ethernet, USB Device
Швидкі входи	до 100 кГц
Швидкі виходи	100 кГц
Температурний діапазон експлуатування	-40. +55 °С

Зовнішній вигляд контролера та схема розташування та призначення клем наведено на рисунку 2.8, та 2.9.

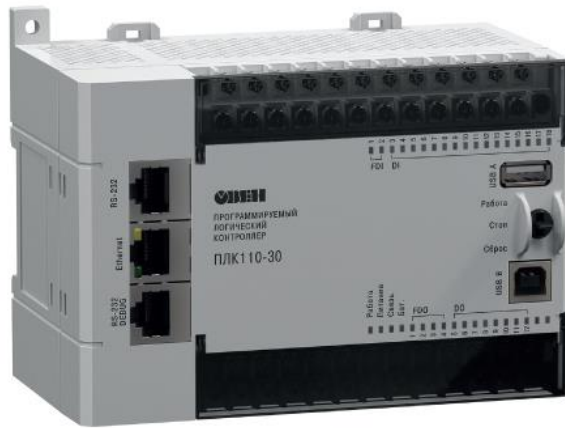


Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд контролера ОВЕН ПЛК110

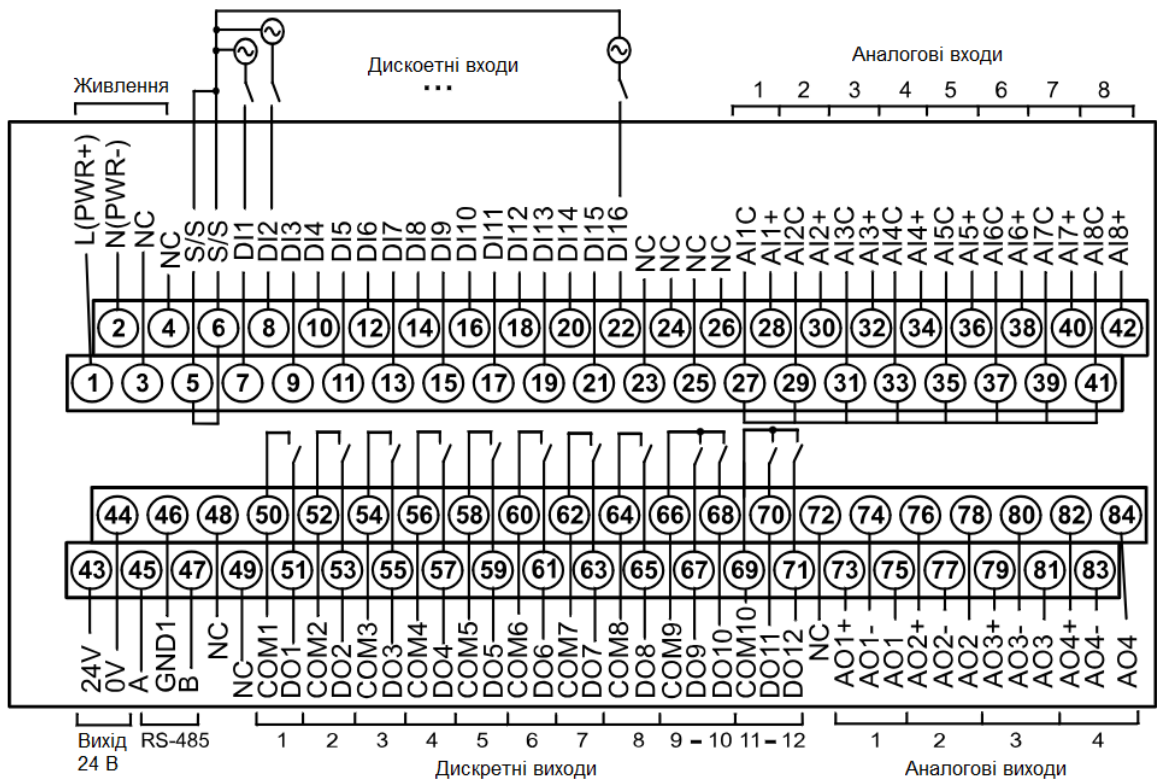


Рисунок 2.9 – Схема розташування та призначення клем

## 2.8 Вибір датчика температури

В якості датчика температури використовується трипровідний аналоговий перетворювач температури WKA T91.10.104, вихідний сигнал



якого становить 0...10 В, що відповідає діапазону температур від 0 °С до плюс 100 °С. Напряга живлення - постійна 24В.

Трипровідна схема датчика представлена на рисунку 2.10. На цій схемі плюсовий провід термопару приєднується до клемми «ТС+», а негативний – до клемми «ТС-» перетворювача.

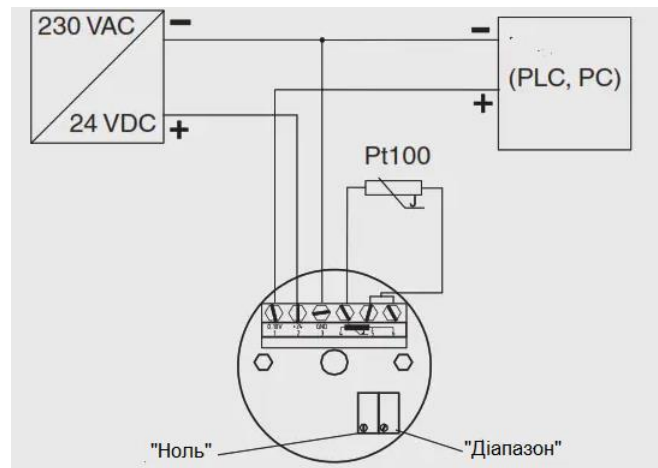


Рисунок 2.10 – Схема підключення датчика температури

Зовнішній вигляд датчика температури представлений рисунку 2.11.



Рисунок 2.11 – Зовнішній вигляд датчика температури WIKAI T19.10.104

## 3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Розрахунок параметрів і моделювання системи скалярного частотного управління у середовищі Matlab

Прямий пуск електродвигуна характеризується значними коливаннями електромагнітного моменту та великими значеннями пускового струму. Такі навантаження негативно позначаються на двигуні, перетворювачі та механізмі вентилятора і призводять до скорочення терміну їх служби. Фактичні перевантаження при прямому пуску можуть бути ще більшими, так як у методиці розрахунку моделі асинхронного електродвигуна та її параметрів не були враховані ефекти витіснення струму в обмотці ротора та насичення магнітної системи двигуна.

Плавний пуск вентилятора з обмеженням величини динамічного моменту електроприводу досягається задатчиком інтенсивності. Лінійний задатчик інтенсивності забезпечує постійне значення темпу наростання (спадання при гальмуванні) швидкості.

Задатчик інтенсивності з S-подібною характеристикою дозволяє додатково обмежити другу похідну швидкості (темп наростання динамічного моменту електроприводу) і цим підвищити плавність перехідних процесів в електроприводі [14].

Базова функціональна схема асинхронного електроприводу з частотним скалярним керуванням та моделлю двофазного двигуна наведено на рисунку 3.1.

Структурна схема еквівалентного двофазного асинхронного електродвигуна в нерухомій системі координат наведено на рисунку 3.2.

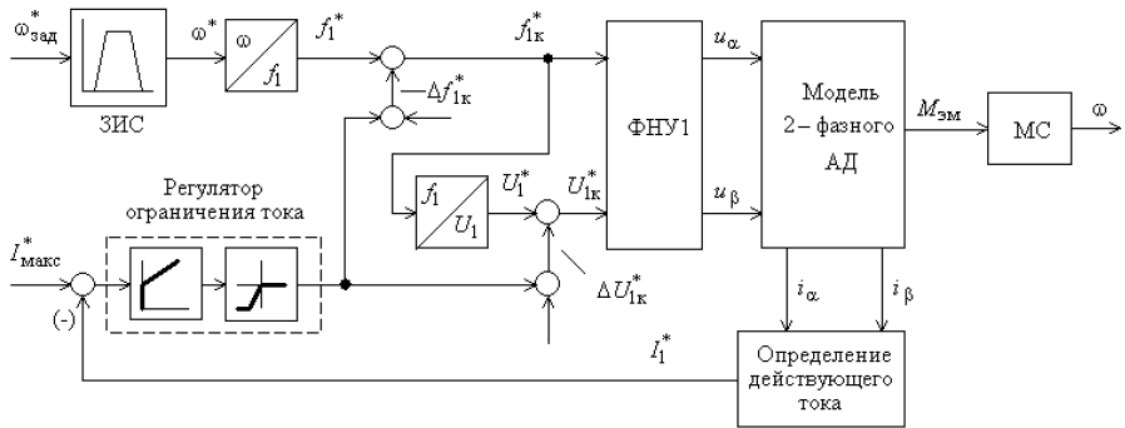


Рисунок 3.1 – Функціональна схема асинхронного електроприводу з частотним скалярним керуванням

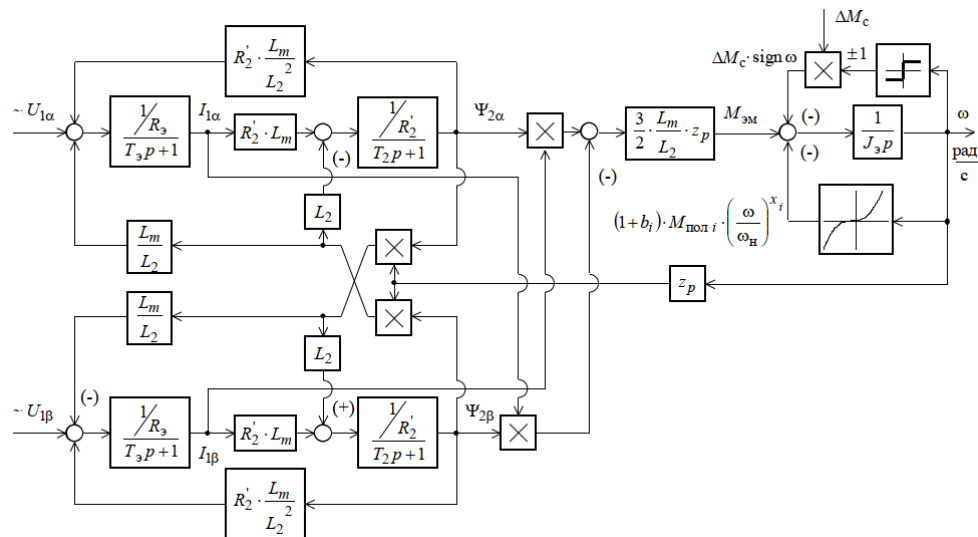


Рисунок 3.2 – Структурна схема асинхронного електродвигуна в нерухомій системі координат

Еквівалентні індуктивності обмоток:

- статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_\mu = 5.324 \cdot 10^{-3} + 0.118 = 0.123 \text{ Гн} \quad (3.1)$$

- ротора

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_\mu = 7.14 \cdot 10^{-3} + 0.118 = 0.125 \text{ Гн} \quad (3.2)$$

коефіцієнт розсіювання:

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 \cdot L_2'} = 1 - \frac{0.118^2}{0.123 \cdot 0.125} = 0.098 \quad (3.3)$$

еквівалентний опір:

$$R_e = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_\mu^2}{L_2^2} = 0.532 + 0.517 \frac{0.188^2}{0.125^2} = 0.992 \text{ Ом} \quad (3.4)$$

електромагнітні постійні часу:

$$T_e = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_e} = \frac{0.098 \cdot 0.123}{0.922} = 0.012 \text{ с} \quad (3.5)$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2'} = \frac{0.125}{0.517} = 0.241 \text{ с} \quad (3.6)$$

Для імітаційних досліджень системи частотно-регульованого електроприводу використовується програма Matlab Simulink R2016a.

### 3.2 Імітаційна модель регульованого електроприводу

Імітаційна модель регульованого електроприводу з частотним скалярним керуванням, що містить регулятор обмеження струму, IR-компенсацію та компенсацію ковзання складена відповідно до структурної схеми, наведеної на рисунку 3.1 і структурної схеми частотного управління/ Імітаційна модель представлена на рисунку 3.3.

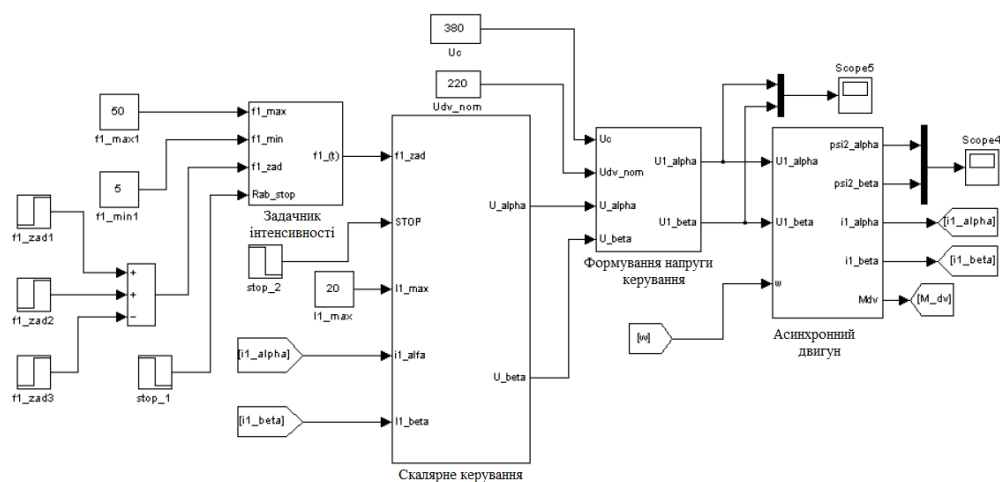


Рисунок 3.3 – Імітаційна модель електроприводу з частотним скалярним керуванням

Модель вентиляторного навантаження та інерційної маси з урахуванням змінного моменту інерції  $J$  і змінного моменту опору реактивного характеру  $M_{cP}$  наведено на рисунках 3.5 і 3.6.

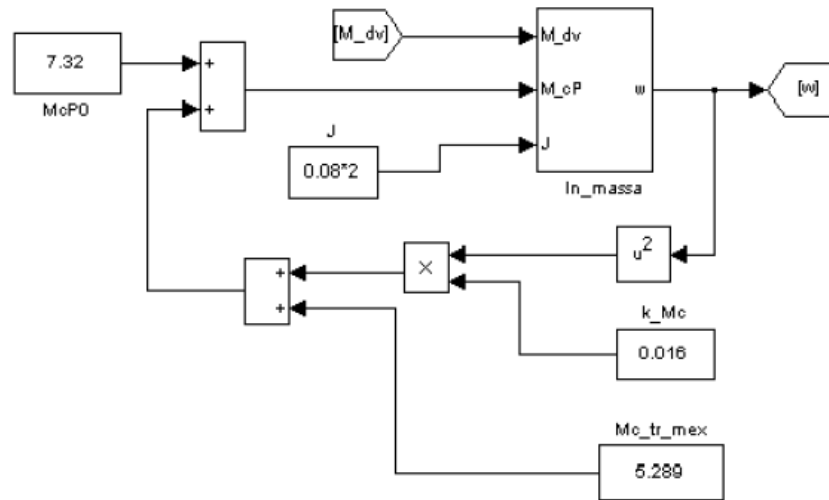


Рисунок 3.5 – Імітаційна модель вентиляторного навантаження

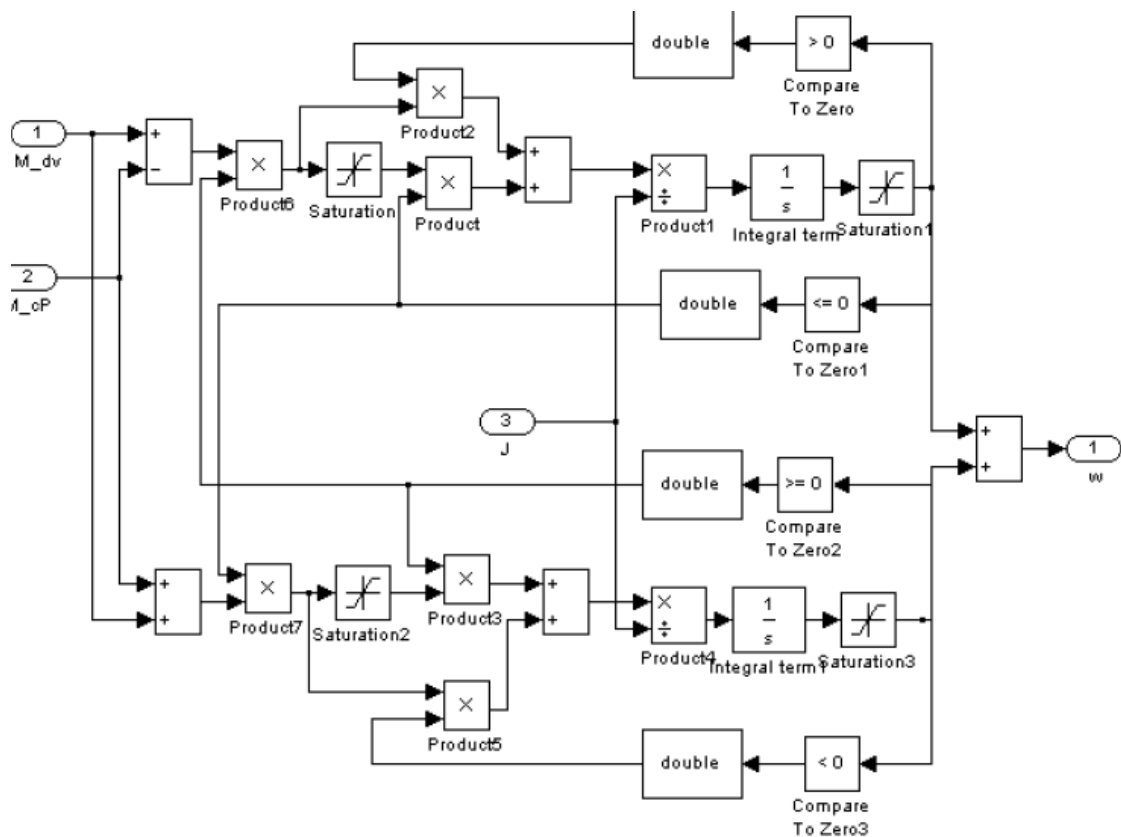


Рисунок 3.6 – Імітаційна модель інерційної маси

Імітаційна модель задатчика інтенсивності приведена на рисунку 3.7.

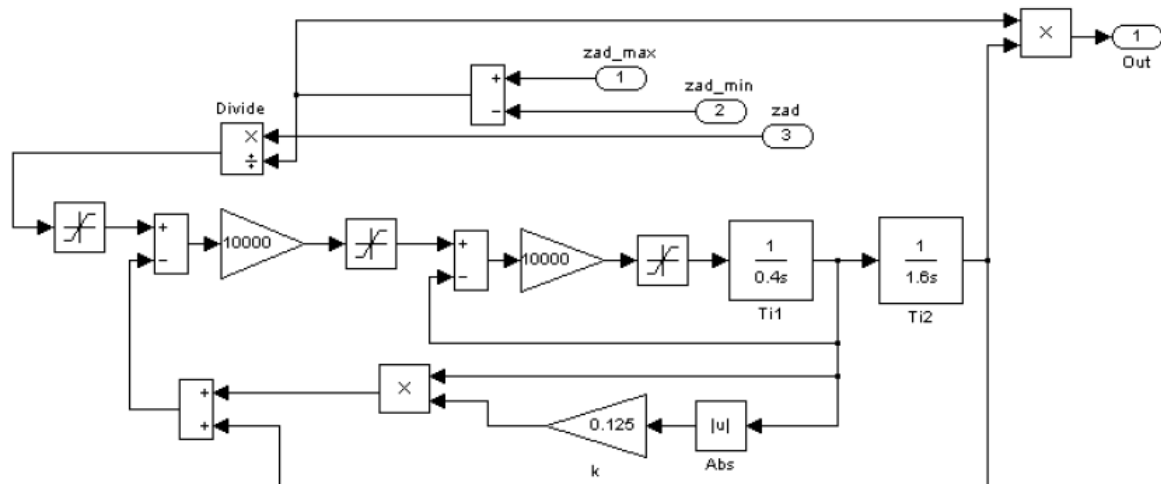


Рисунок 3.7 – Імітаційна модель S-подібного задатчика інтенсивності

Постійна часу задатчика інтенсивності складає:  $T_i = 2t_1 + t_2 = 2.4$  с, де  $t_1 = 0,4$  с,  $t_2 = 1,6$  с.

Структура підсистеми «скалярне управління» наведено на рисунку 3.8.

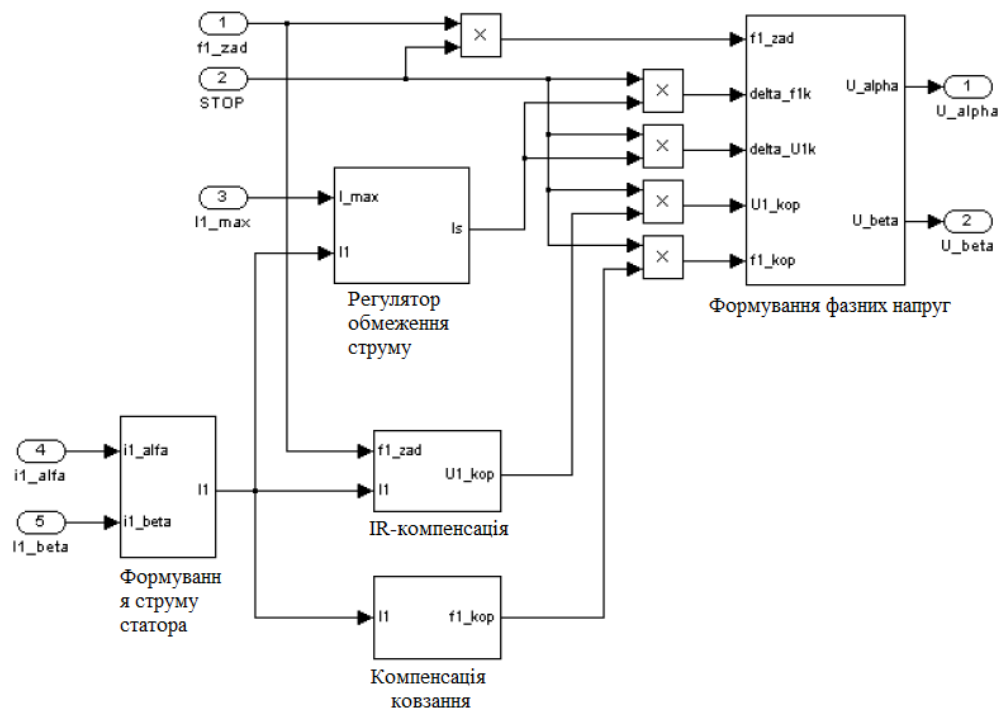


Рисунок 3.8 – Структура підсистеми «Скалярне управління»

Блок «Формувач струму статора» містить аналогові датчики струму та блок, що обчислює справжнє значення струму. Структура наведена на рисунку 3.9.

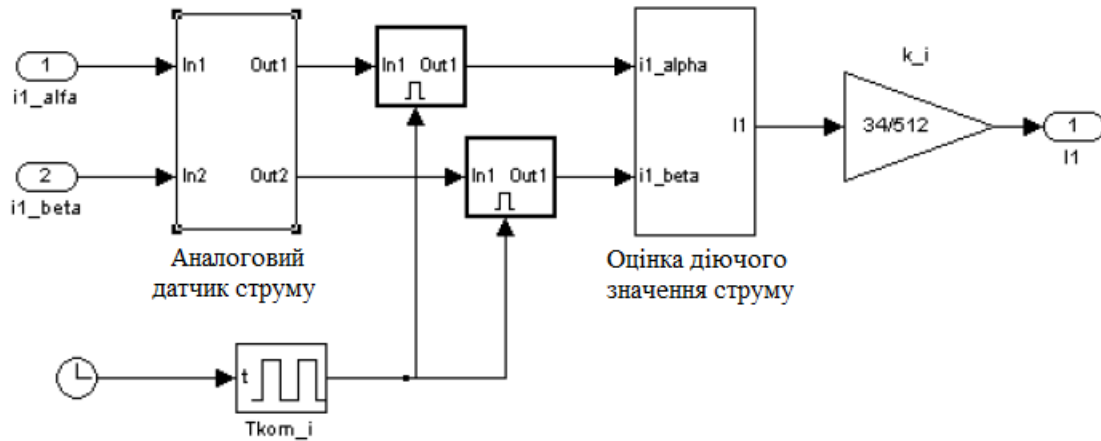


Рисунок 3.9 – Структура блоку «Формувальник струму статора»

Структура блоку "Аналогові датчики струму" представлена на рисунку 3.10.

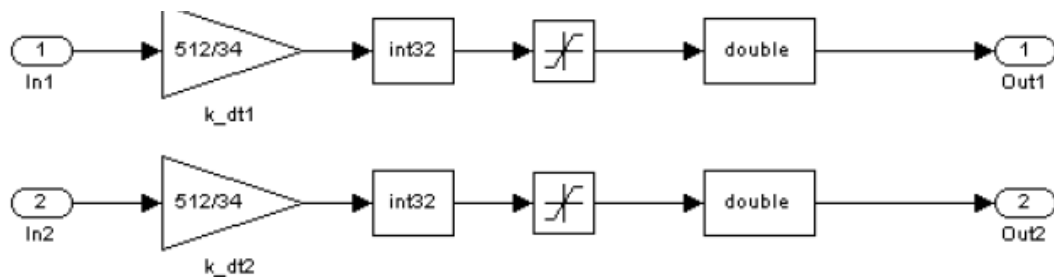


Рисунок 3.10 – Імітаційна модель аналогових датчиків струму

Коефіцієнт передачі датчика струму:

$$k_{dt} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{adc.dt}}}{\sigma_T \cdot (\sqrt{2} \cdot I_{EP.max})} = \frac{0.5 \cdot 2^{10}}{1.2 \cdot (\sqrt{2} \cdot 20)} = 15.06 \quad (3.7)$$

де  $n_{adc.dt} = 10$  - розрядність АЦП датчика струму перетворювача,

$\sigma_T = 1,2$  - коефіцієнт, що враховує можливе перерегулювання струму.

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом:

$$k_{зз} = \frac{1}{k_{dt}} = 0.00664 \quad (3.8)$$

Структура блоку "Обчислювач справжнього значення струму" представлена рисунку 3.11.

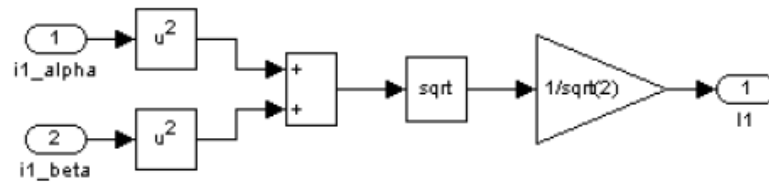


Рисунок 3.11 – Модель обчислювача істинного значення статора струму

Структуру блоку «регулятор обмеження струму» наведено рисунку 3.12.

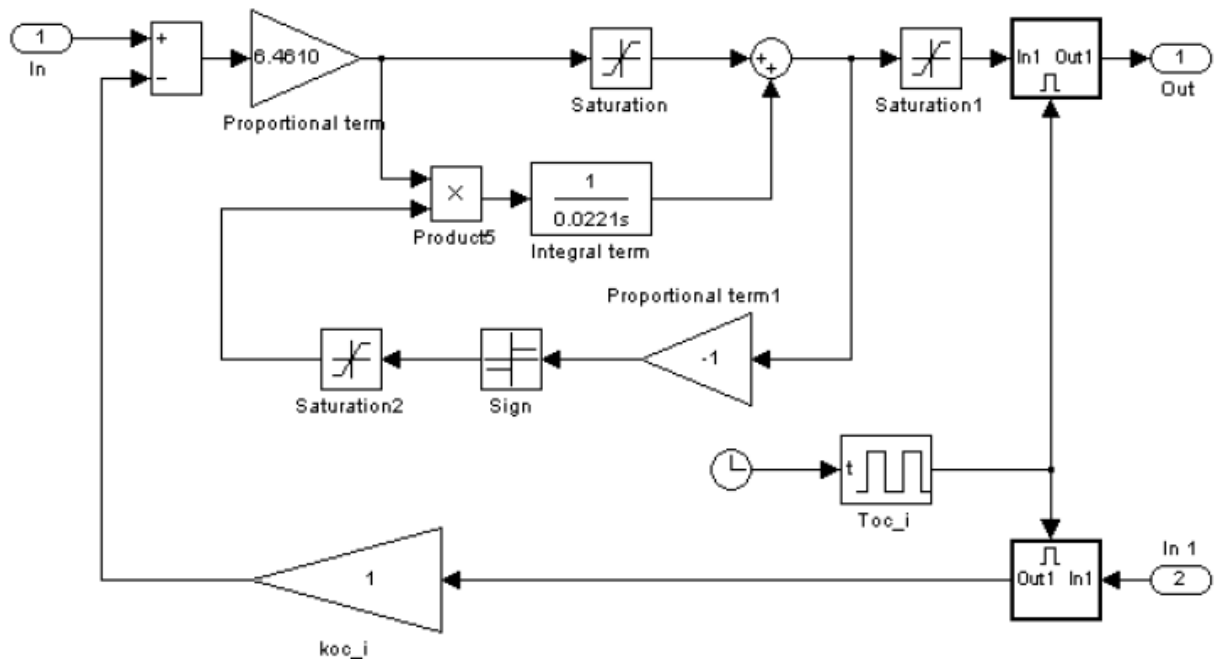


Рисунок 3.12 – Імітаційна модель ПІ-регулятора обмеження струму

Передатна функція ПІ-регулятора обмеження струму:

$$W(p) = k_{PT} \frac{T_{PT} \cdot p + 1}{T_{PT} \cdot p} \quad (3.9)$$

Постійна часу регулятора струму:

$$T_{PT} = T_{le} = 0.0221 \text{ c} \quad (3.10)$$

Коефіцієнт посилення регулятора струму:



$$k_{PT} = \frac{T_{1e} \cdot R_{1e}}{k_i \cdot k_T \cdot a_T \cdot T_{\mu Te}} = \frac{0.0221 \cdot 0.9917}{4.437 \cdot 0.7071 \cdot 2 \cdot 0.0003} = 11.6426 \quad (3.11)$$

де  $k_i$  - коефіцієнт передачі по каналу частоти:

$$k_i = \frac{U_{1H}}{f_{1H} \cdot R_{1e}} = \frac{220}{50 \cdot 0.9917} = 4.437 \text{ А/Гц}$$

$k_T$  - коефіцієнта зворотного зв'язку по струму:

$$k_T = 1 / \sqrt{2} = 0.7071 \text{ 1/А}$$

$a_T = 2$  – коефіцієнт типового налаштування контуру струму на модульний оптимум;

$T_{\mu Te}$  – еквівалентна постійна часу оптимізованого контуру струму:

$$T_{\mu Te} = \frac{T_{OC.T}}{n_T} + T_{ded.i} = \frac{0.0002}{2} + 0.0002 = 0.0003 \text{ с}$$

де  $T_{OC.T} = T_{PWM} = 0,0002 \text{ с}$  - інтервал квантування сигналів в ланці зворотного зв'язку контуру струму;

$n_T = 2$  – коефіцієнт апроксимації ланки чистого запізнення аперіодичною ланкою;

$T_{ded.i} = T_{PWM} = 0,0002 \text{ с}$  – інтервал часу затримки подачі керування регулятора струму до ключів інвертора.

Структура блоку IR-компенсації наведена на рисунку 3.13.[13]

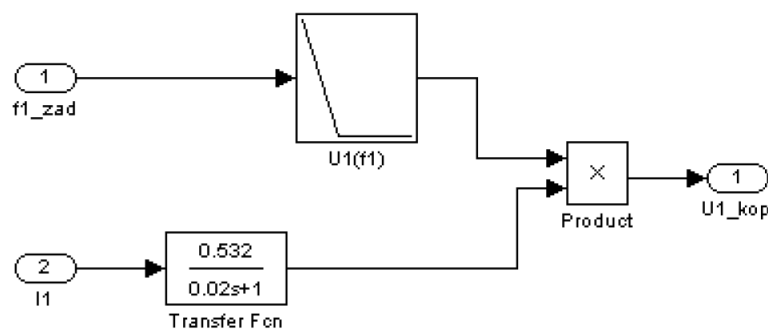


Рисунок 3.13 – Реалізація скалярної IR-компенсації

Передатна функція ланцюга позитивного зворотного зв'язку каналом регулювання напруги [7]:

$$W(p) = \frac{k_{iR} \cdot R_1}{T_{iR} \cdot p + 1}, \quad (3.12)$$

де  $T_{iR} = 0,02$  с - постійна часу затримки компенсації моменту,

$k_{iR} = 0,1$  - коефіцієнт компенсації моменту.

Значення коефіцієнта зворотного зв'язку  $k_{iR}$  задається як функція  $k_{iR}(f_1)$  і зменшується в міру збільшення частоти перетворювача.

Структура блоку «Формувальник фазної напруги» наведена на рисунку 3.14.

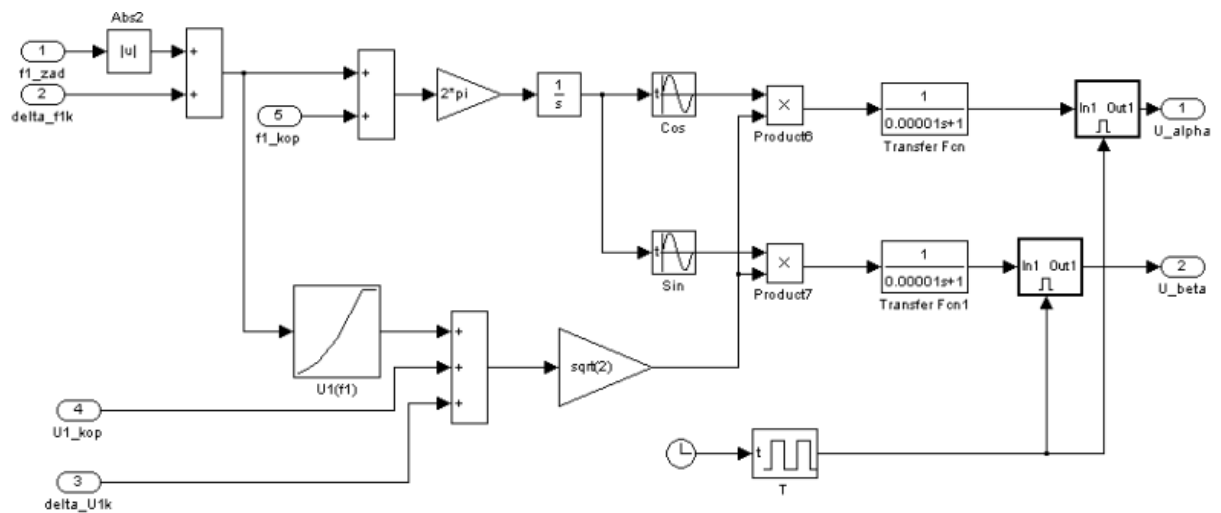


Рисунок 3.14 – Структура підсистеми «Формувальник фазної напруги»

Вольт-частотна характеристика задається такими точками:

$$f = 5 \text{ Гц}, U = 11 \text{ В};$$

$$f = 15 \text{ Гц}, U = 29 \text{ В};$$

$$f = 30 \text{ Гц}, U = 86 \text{ В};$$

$$f = 50 \text{ Гц}, U = 220 \text{ В};$$

Інвертор напруги представлений аперіодичною ланкою першого порядку з передавальною функцією [13]:

$$W_{in}(p) = \frac{k_{in}}{1 + T_{in} \cdot p}, \quad (3.13)$$

де  $k_{in} = 1$  - коефіцієнт передачі інвертора;

$T_{in} = 0,00001$  с – стала часу інвертора.

Структура блоку «Формувальник напруги управління» представлена рисунку 3.15.

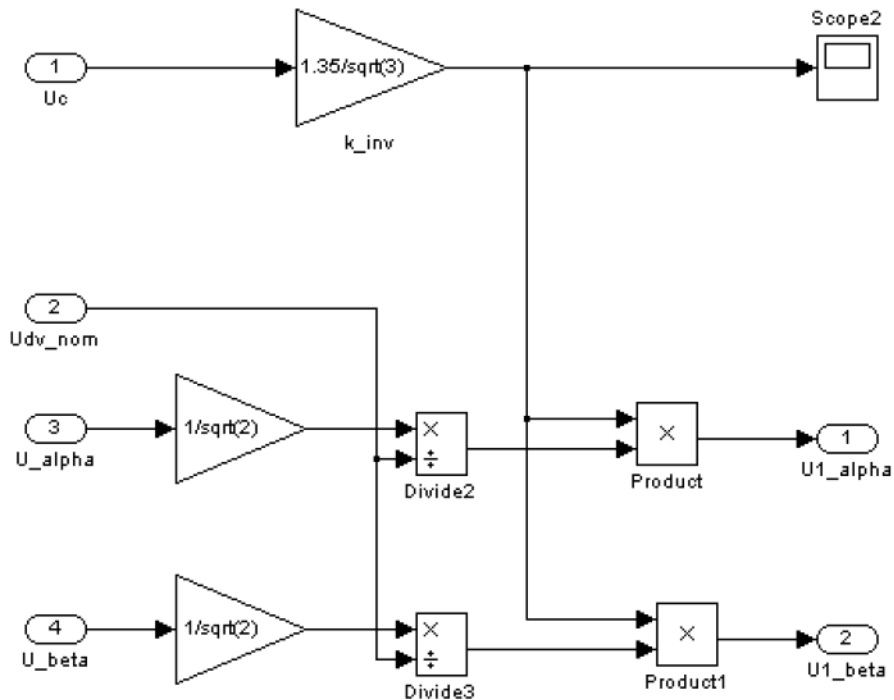


Рисунок 3.15 – Структура блоку «Формувальник напруг управління»

Даний блок формує керуючу напругу від інвертора на асинхронний двигун. Напруга ланки постійного струму перетворювача [7]:

$$U_{d0} = 1.53 \cdot U_c = 1.35 \cdot 380 = 513 \text{ В} \quad (3.14)$$

де  $U_c = 380$  В – лінійна напруга джерела живлення перетворювача.

Коефіцієнт посилення інвертора:

$$k_{in} = \frac{U_{d0}}{\sqrt{3}} = \frac{513}{\sqrt{3}} = 296.18$$

У процесі імітаційних досліджень розглядаються такі режими роботи системи електропривод – вентилятор [7]:

- пуск електроприводу на мінімальну робочу швидкість;
- пуск електроприводу на максимальну робочу швидкість;

- пуск електроприводу з мінімальної робочої швидкості до максимальної;
- гальмування електроприводу з максимальною швидкістю до мінімальної;
- зупинка електроприводу.

При пуску частотно-регульованих асинхронних електроприводів проводиться початковий прямий пуск двигуна на мінімальну частоту  $f_{i.min}$ , а потім по закінченні перехідного процесу, коли потокозчеплення досягнуть усталених значень, здійснюється подальший розгін приводу від задатчика інтенсивності до значення заданої швидкості.

Перехідні процеси швидкості  $\omega = f(t)$ , моменту  $M = f(t)$  та струму статора  $I = f(t)$  при пуску на мінімальну робочу швидкість вентилятора наведено на рисунку 3.16, при пуску на максимальну робочу швидкість на рисунку 3.17.

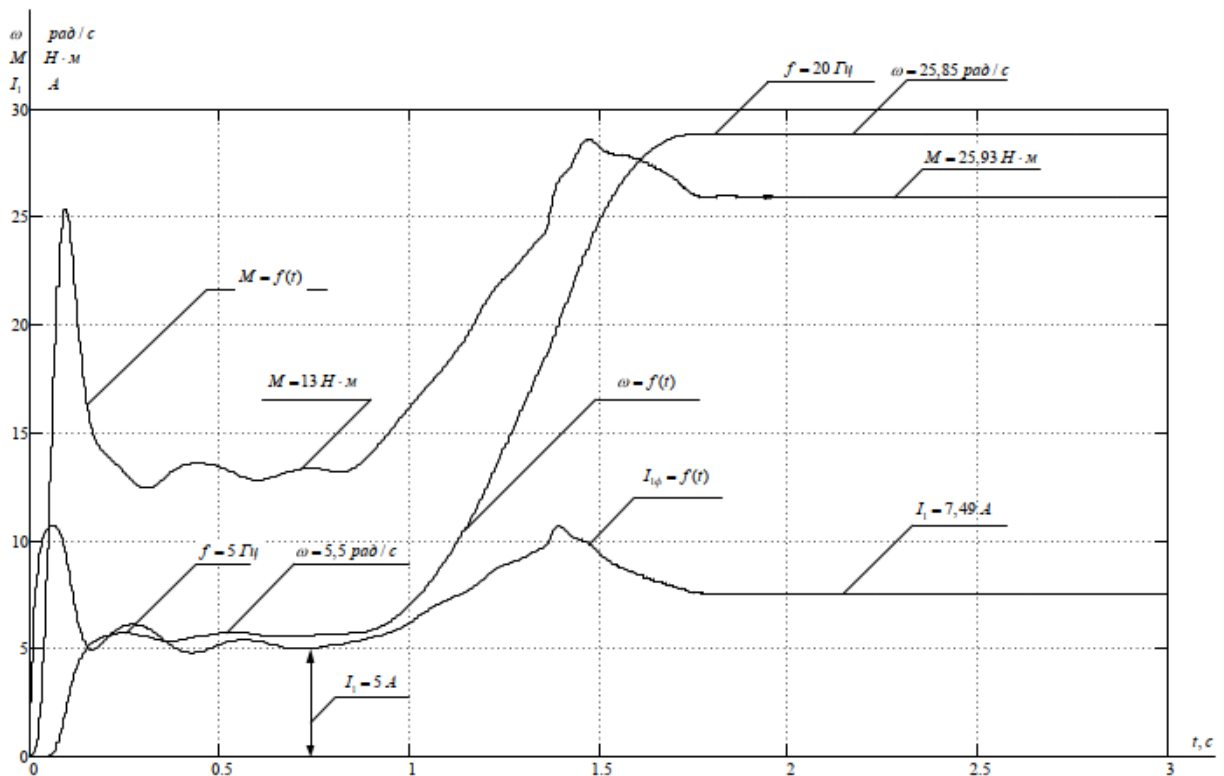


Рисунок 3.16 – Перехідні процеси  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  при пуску на мінімальну робочу швидкість вентилятора

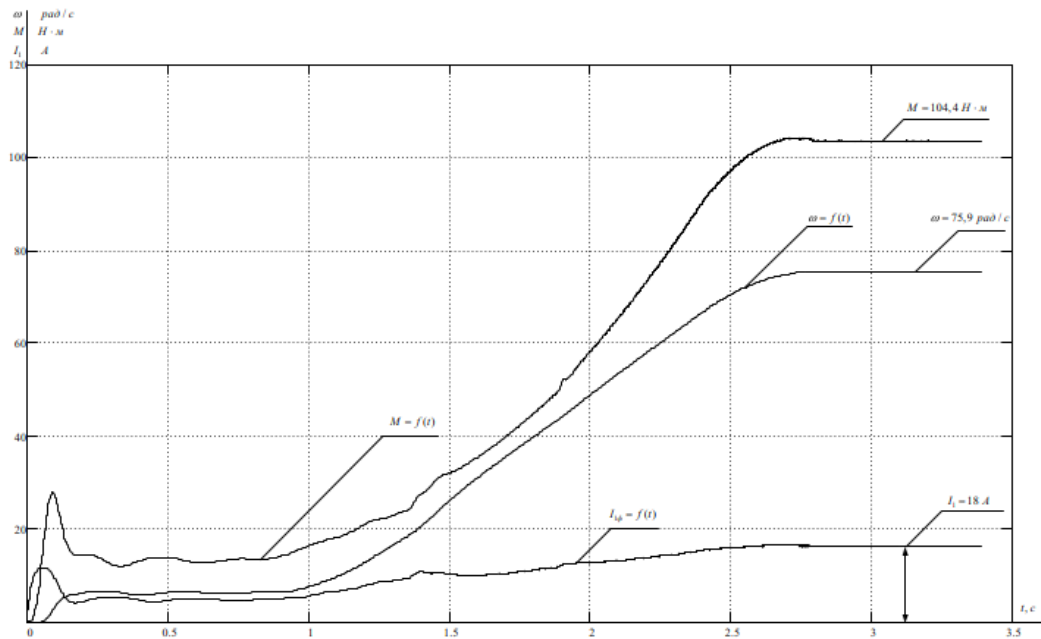


Рисунок 3.17 – Перехідні процеси  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  при пуску на максимальну робочу швидкість вентилятора

На рисунку 3.18 наведено перехідні процеси при відпрацюванні вентилятором наступного циклу роботи:

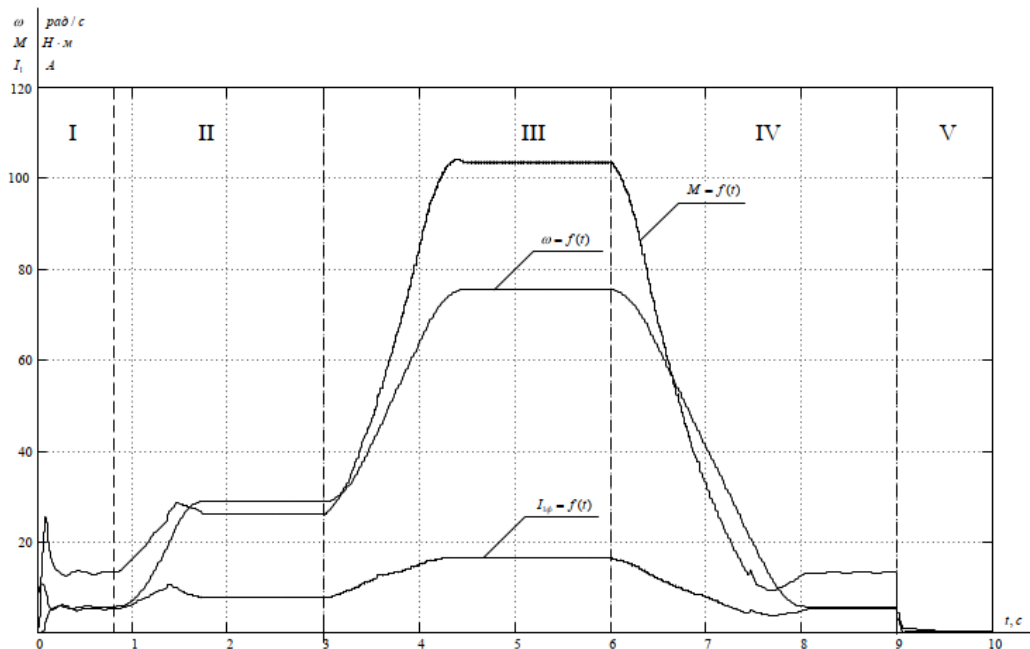


Рисунок 3.18 – Перехідні процеси  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  при відпрацюванні вентилятором заданого циклу роботи

- пуск на мінімальну частоту

$$(f_{i.min} = 5 \text{ Гц});$$

-перехід на мінімальну робочу швидкість вентилятора

$$(f_{p.min} = 20 \text{ Гц});$$

– перехід на максимальну робочу швидкість вентилятора (

$$(f_{p.max} = 500 \text{ Гц});$$

- Перехід на мінімальну частоту (

$$(f_{i.min} = 5 \text{ Гц});$$

- зупинка електроприводу;

На рисунку 3.19 наведено перехідні процеси  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  при пуску двигуна з струмовим відсіканням у каналі регулювання частоти.

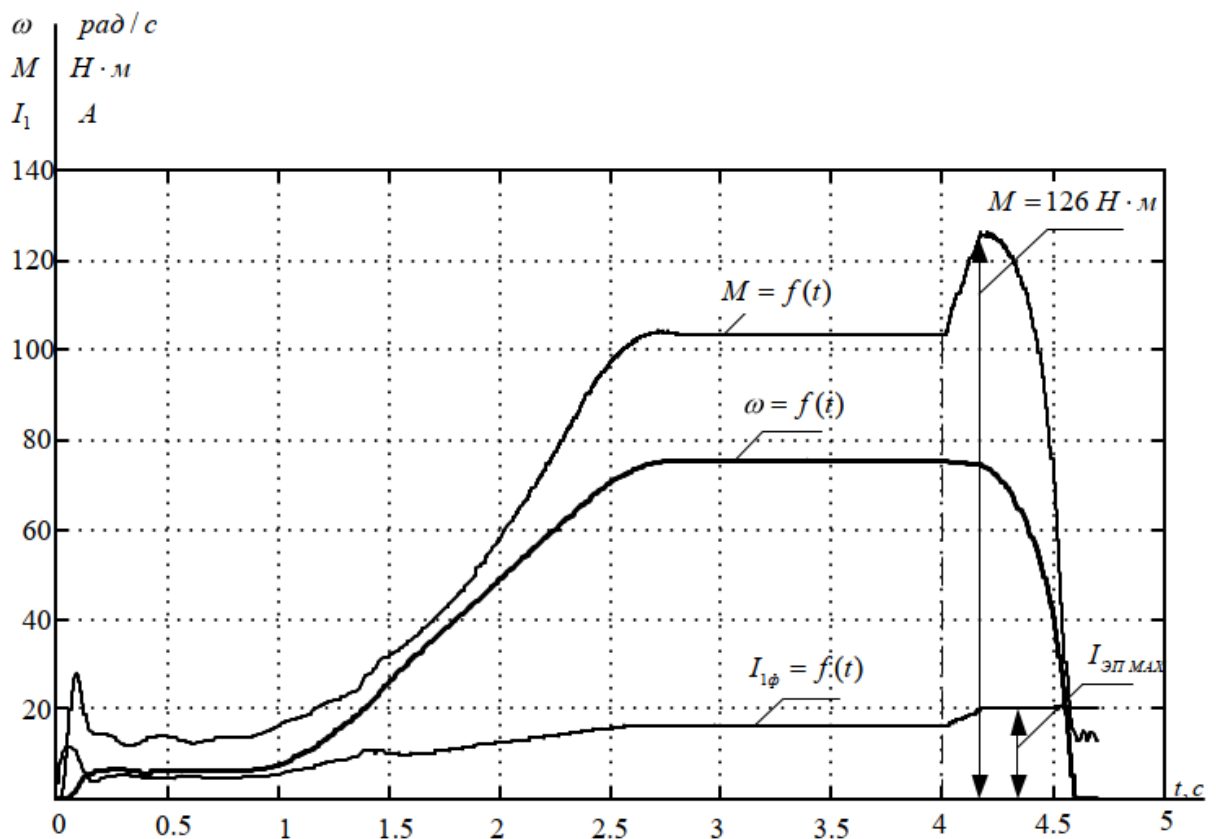


Рисунок 3.19 – перехідні процеси  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  при пуску двигуна з струмовим відсіканням у каналі регулювання частоти

Час перехідних процесів визначається постійним часом задатчика інтенсивності та становить: 2 с при пуску на максимальну робочу швидкість; 1 с при пуску на мінімальну робочу швидкість. Використання задатчика інтенсивності збільшує плавність перехідних процесів. Перерегулювання швидкості відсутнє.

Струм статора в режимі обмеження підтримується на заданому значенні 20 А. У момент часу  $t = 4$  з почалося плавне збільшення моменту опору на валу асинхронного двигуна до його зупинки. При дії струмового відсікання електромагнітний момент обмежився на рівні 126 Н·м. Остаточне вимкнення електроприводу відбувається при спрацьовуванні тимчасового захисту [13].

### 3.3 Алгоритм роботи автоматичної системи вентиляції

Розроблений алгоритм роботи автоматичної системи вентиляції представлено малюнку 3.20.

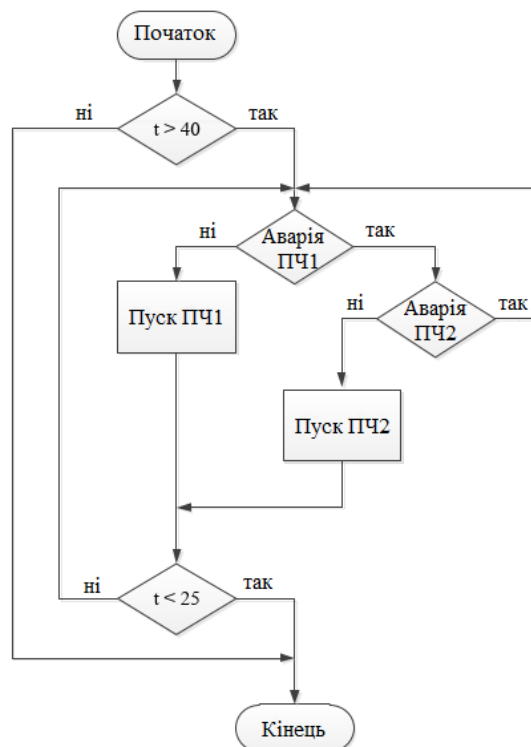


Рисунок 3.20 – Алгоритм роботи автоматичної системи вентиляції

Відповідно до даного алгоритму можна виділити такі основні режими роботи системи:

1. запуск основного перетворювача частоти (ПЧ1) при перевищенні температури плюс 40 °С;
2. запуск резервного перетворювача (ПЧ2) за наявності аварії на основному та умови перевищення температури;
3. зупинка перетворювача частоти при досягненні температури плюс 25 °С і нижче.



## **4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ**

### **4.1 Заходи безпеки під час експлуатації електродвигунів**

Особливості організації охорони праці на підприємстві відіграють важливу роль. Простої та зниження ефективності праці, викликані аваріями, нещасними випадками на виробництві, професійними захворюваннями, не тільки уповільнюють виробничі процеси, а й стають причиною високих додаткових витрат для підприємства. Крім того, ці явища значною мірою негативно впливають на безпеку виробництва, якість продукції та ставлення до роботи працюючих.

Установки власних потреб є важливим елементом електростанцій і підстанцій. Пошкодження в системі власних потреб неодноразово приводили до порушення роботи електростанцій і до аварійного стану енергосистем. Основним механізмом власних потреб є асинхронні електродвигуни різного виконання. Двигун перетворює електричну енергію(якою живиться із мережі, або генератора)в механічну.

Зараз промисловість випускає електродвигуни 380 В потужністю до 400 кВт, а електродвигуни 3 - 6 кВ, починаючи з потужності 160 - 200 кВт. На КЕС, ТЕЦ, а також АЕС висока напруга системи власних потреб, як правило, приймається рівною 6 кВ. На КЕС з агрегатами потужністю 800 - 1200 МВт і відповідно з великими механізмами власних потреб доцільно застосування напруги 10 кВ. На ГЕС електродвигуни основних механізмів живляться від мережі 380/220 В, а електродвигуни великих механізмів - від мережі 6 (10) кВ.

Під час експлуатації асинхронних двигунів власних потреб 0,4 кВ небезпечним чинником є можливість ураження працівників електричним струмом при дотику до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою. Також небезпечним фактором є електрична дуга, що виникає при коротких замиканнях і наявність у двигунів обертових частин.

Профілактичні заходи захисту від шкідливих та небезпечних факторів:

- Для захисту від електричної дуги застосовуються засоби максимального струмового захисту.
- Для захисту обертових частин електродвигуна застосовуються кожухи під якими і знаходяться обертові частини, зняття кожухів під час роботи двигуна забороняється через можливість захоплення обертовими частинами одягу.
- Використання кондиціювання та вентиляції повітря, використання індивідуальних засобів захисту а також забезпечення працівників спеціальним одягом і застосування незалежних джерел живлення для аварійного освітлення.
- Захисні заходи від шкідливих та небезпечних факторів:
- Зниження (ослаблення) шуму в самих його джерелах (конструкція обладнання).
- Чітке дотримання правил технічної експлуатації.
- Встановлення звукоізоляційних огорожувальних конструкцій і звукопоглинальних екранів.
- Для ослаблення вібрації кожухів, огорож та інших деталей застосовується вібропоглинання шляхом нанесення на віброуючу поверхню шару гуми, пластиків, які розсіюють енергію вібрацій.
- Для захисту людини від впливу підвищеної температури потрібно передбачити кондиціювання, вентиляцію повітря; встановлення поглинаючих екранів; забезпечити працівників спецодегмою.
- Живлення світильників аварійного освітлення здійснюється від незалежних джерел живлення. Потрібно передбачити наявність у кожного працівника ліхтарика.

При експлуатації двигунів власних потреб напругою 0,4 кВ пожежну небезпеку обумовлює наявність горючих ізоляційних матеріалів, а також наявність масла в системі змащення підшипників кочення електродвигунів.

Причини пожеж при експлуатації двигуна поділяють на:

- електричного характеру: іскріння в електричних апаратах; струми короткого замикання і струмові перевантаження; погані контакти в місцях з'єднання; електрична дуга;
  - неелектричного характеру: недотримання персоналом вимог безпеки; несправність обладнання (перегрів).
  - При загорянні електродвигуна його необхідно відключити, розібрати схему, включити заземлювальний ніж і приступити до гасіння пожежі за допомогою вуглекислого або порошкового вогнегасників. Місця проведення вогневих робіт необхідно забезпечити вогнегасником і асбесплотном. Також для запобігання пожежі застосовуються пожежні крани і пожежні гідранти.
- Отже під час технологічного процесу дуже важливим є дотримання вимог безпеки. Порушення цих вимог може призвести до виходу з ладу асинхронного двигуна, що бере участь у технологічному процесі, важких аварій, великих матеріальних втрат на відновлення, поранення або навіть смерті обслуговуючого персоналу.

#### **4.2 Засоби захисту від ураження електричним струмом**

Основними заходами захисту від ураження електричним струмом є електроізоляція, використання малих напруг, електричне блокування, розділення мережі, забезпечення недоступності до струмопровідних частин обладнання, попереджувальні засоби та електрозахисті засоби захисту.

Електроізоляція – шар діелектрика або конструкція, виконана з діелектрика, яким покрита поверхня, що проводить струм, або відділені одна від одної частини, які частково проводять струм. Ізоляція завдяки великому опору створює перешкоду проходження струму. Часто використовують подвійну ізоляцію.

Малі напруги використовують для живлення переносного електроінструменту (електродрелі, електропаяльники), переносних ламп та місцевого освітлення на станках. Як правило використовують напруги менше

42 В, що є порівняно безпечними для людини. При роботах в особливо небезпечних приміщеннях напруга складає не більше 12 В.

Забезпечення недоступності до частин обладнання, які проводять електричний струм здійснюється шляхом розміщення обладнання на недоступній висоті та огороженням струмопровідних частин обладнання.

Блокування – автоматичний пристрій, який допускає певний порядок увімкнення (вимкнення) механізму; застосовується в електричних апаратах, рубильниках, пускачах, автоматичних вимикачах тощо.

Електричне блокування здійснює розрив кола спеціальними контактами, встановленими на дверях огорожень, кришок, дверних кожухів.

Механічне блокування використовується в електричних апаратах за допомогою замків, що самі зачиняються, стопорів, защіпок тощо.

Електричне розділення мережі на окремі електрично не пов'язані між собою ділянки здійснюється за допомогою відокремлю вального трансформатора. У відокремлювальному трансформаторі відсутній електричний зв'язок між обмотками. Такий трансформатор відділяє електроприймачі і їх дроти від загальної мережі, усуваючи можливість виникнення великих та ємних струмів, а також замикання на землю.

Попереджувальна сигналізація вмикається при включенні апаратів або за умови наявності (відсутності) напруги на певній ділянці мережі.

Попереджувальні плакати сигналізують про небезпеку наближення до частин обладнання, які знаходяться під напругою. В електроустановках використовують ряд електрозахисних засобів. Це ізолюючі засоби – діелектричні рукавички, ізолювальні штанги, ізолювальні кліщі, покажчики напруги, калоші, килимки, ізолювальні підставки тощо. До огорожувальних електрозахисних засобів відносять ширми, екрани, щити, плакати і т.п.. Запобіжні електрозахисті засоби: страху вальні канати, ізолювальні драбини, кігті-лази, запобіжні пояси, захисні окуляри, щитки, каски, захисні рукавички, спецодяг, переносне заземлення тощо.

Основними способами захисту при раптовій появі напруги на металевих частинах електроустановки, які не проводять струм, є захисне заземлення, занулення, вирівнювання потенціалів та захисне вимкнення.

Захисне заземлення – це навмисне з'єднання з землею або її еквівалентом металевих частин обладнання, які не проводять електричний струм, але можуть опинитися під напругою. Захисне заземлення призначене для захисту від небезпеки ураження електричним струмом при дотику до металевих корпусів електрообладнання, яке внаслідок пробією ізоляції опинилося під напругою. Принцип дії захисного заземлення полягає в зниженні напруги дотику до безпечної величини.

Захисне заземлення є ефективним у мережах з ізолюваною нейтраллю, коли при глухому замиканні на землю або на заземлений корпус струм не залежить від провідності /опору заземлення, а також в мережах з напругою більше 1000 В із заземленою нейтраллю; для електроустановок, які живляться від електричних мереж напругою до 1000 В з ізолюваною нейтраллю та в мережах напругою вище 1000 В з ізолюваною або заземленою нейтраллю.

Заземлення електроустановок необхідно виконувати при напрузі 380 В і вище для змінного струму та 440 В і вище для постійного струму; у приміщеннях з підвищеною небезпекою і особливо небезпечних приміщеннях; в зовнішніх установках при номінальній напрузі 42 В змінного та 110 В постійного струму.

Занулення – навмисне електричне з'єднання металевих частин електричних установок, що не проводять струм, але можуть опинитися під напругою, з нульовим захисним провідником. Занулення застосовується в трифазних чотиридротових електричних мережах до 1000В із глухо заземленою нейтраллю.

Занулення призначене для усунення небезпеки ураження електричним струмом у випадку дотику до корпусу електричної установки та інших

металевих частин, які не проводять струм та можуть опинитися під напругою відносно землі внаслідок замикання на корпус та інших причин.

Принцип дії занулення – перетворення замикання на корпус на однофазне коротке замикання, тобто замикання між фазним і нульовим захисним провідником з метою викликати великий струм, здатний забезпечити спрацювання захисту і автоматично відключити пошкоджену установку від електричної мережі.

Вирівнювання потенціалів є способом зниження напруги дотику та кроку між точками електричного кола, до яких можливе одночасне доторкання людини, або на яких вона може одночасно стояти. Сутність вирівнювання потенціалів полягає в штучному підвищенні потенціалу опорної поверхні ніг до рівня потенціалу струмовідної частини, а також при контурному заземленні. Захисне вимкнення – автоматичне вимкнення електроустановки при виникненні в ній небезпеки ураження електричним струмом при замиканні фази на корпус електрообладнання, зниженні опору ізоляції фаз відносно землі нижче певного рівня, появи в мережі вищої напруги, а також дотику до струмоведучої частини, що знаходиться під напругою.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У випускній кваліфікаційній роботі було спроектовано автоматичну систему вентиляції приміщення котельні на базі асинхронного частотно-регульованого електроприводу, що відповідає високим вимогам щодо надійності роботи. Автоматичне управління системою здійснюється програмованим логічним контролером відповідно до розробленого алгоритму роботи.

Для даного приміщення був проведений розрахунок необхідного повітрообміну, на підставі якого було обрано радіальний вентилятор низького тиску ВР 80-75, який забезпечує тиск  $P = 800$  Па, продуктивність  $Q = 22000$  м<sup>3</sup>/год. ККД радіального вентилятора становить 84%. По потужності вентилятора був зроблений вибір асинхронного двигуна АІР160S8 із синхронною швидкістю обертання  $n_0 = 750$  об/хв.

До електроприводу вентилятора не висуваються вимоги до забезпеченню великого діапазону регулювання швидкості та високої точності регулювання, однак, за умовою технологічного процесу, перевантаження електроприводу неприпустимі. Відповідно до цього в програмному середовищі Matlab Simulink була розроблена імітаційна модель частотно-регульованого електроприводу зі скалярною системою управління та додатним зворотним зв'язком по статорному струму.

Імітаційна модель містить регулятор обмеження струму, блоки ІР-компенсації та компенсації ковзання. Регулятор обмеження струму обмежує максимально допустимий струм електроприводу на рівні 20 А. Момент навантаження при цьому обмежується значенням 126 Н·м. ІР-компенсація дозволяє забезпечити стабільну роботу приводу на малих частотах. Компенсація ковзання забезпечує підвищення перевантажувальної здатності приводу.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Goodfellow, Howard D.; Kosonen, Risto (ed.). Industrial Ventilation Design Guidebook: Volume 1: Fundamentals. Academic Press, 2020.
2. Cory, William. Fans and ventilation: a practical guide. Elsevier, 2010.
3. Удут Л. О, Мальцева О. П. Системи управління електроприводів: Навчальний посібник. – Видавництво ТПУ, 2007р. – 152 с
4. Півняк, Г. Г.; Довгань, В. П.; Шкрабець, Ф. П. Електричні машини. Д.: НГУ, 2003.
5. Косенко, Р. А. Моделювання системи векторного керування асинхронним двигуном. Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки, 2014, 1: 215-223.
6. Демішонкова, С. А.; Терещенко, О. В. Векторне керування трьохфазним асинхронним двигуном. In: Мехатронні системи: інновації та інжиніринг. Київський національний університет технологій та дизайну, 2018.
7. Шеховцов В. П. Довідковий посібник з електроустаткування і електропостачання. – М.: ФОРУМ: ІНФРА-М, 2008р. – 136 с.
8. Толочко О.І. Векторні моделі асинхронного двигуна у середовищі пакета MATLAB / О.І. Толочко, Г.С. Чекавський, Д.М. Мірошник // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук, 2003. – Т.1. – № 2 (19). – С. 199-202.
9. Шеховцов В. П. Довідковий посібник з електроустаткування і електропостачання. – М.: ФОРУМ: ІНФРА-М, 2008р. – 136 с.
10. БОБУХ, А. О. Автоматизовані системи керування технологічними процесами: Навч. посібник. 2006.

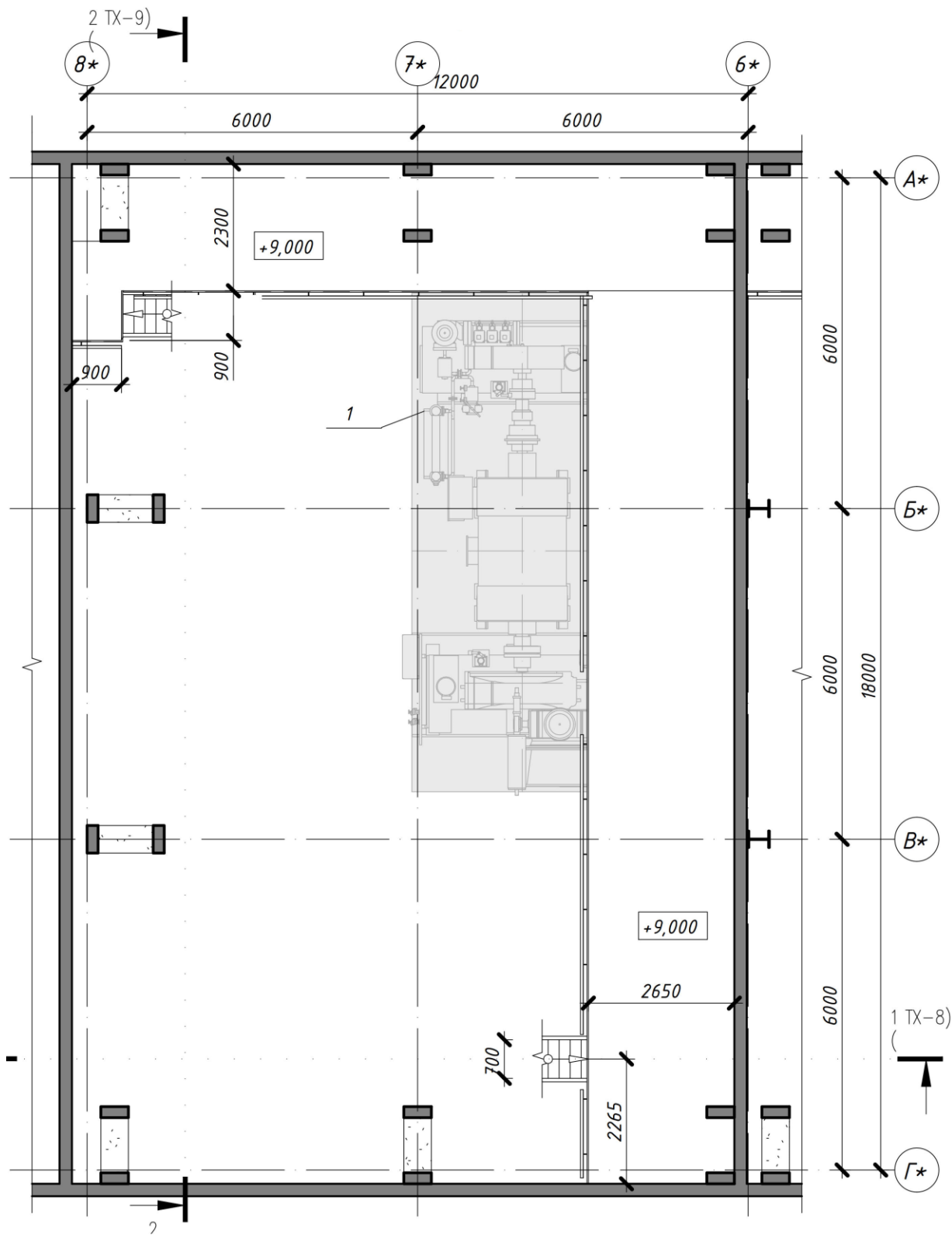


- 11.Сьомін, Андрій Олександрович. Метод ідентифікації параметрів асинхронного електропривода з низькою чутливістю до похибок вимірювання параметрів його режиму при нерухомому роторі. 2019.
- 12.Перетворювач частоти Delta Electronics, <https://delta-electronics.com.ua/ua/p6995821-preobrazovatel-chastoty-delta.html>
- 13.Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.
- 14.Програмований логічний контролер. <https://owen.ua/ua/programovani-logichni-kontrolery/plk110-m02-programovanyj-logichnyj-kontroler>
- 15.SimPowerSystems User's Guide. / Hydro-Quebec and The MathWorks, Inc., 2009. – 402 p.

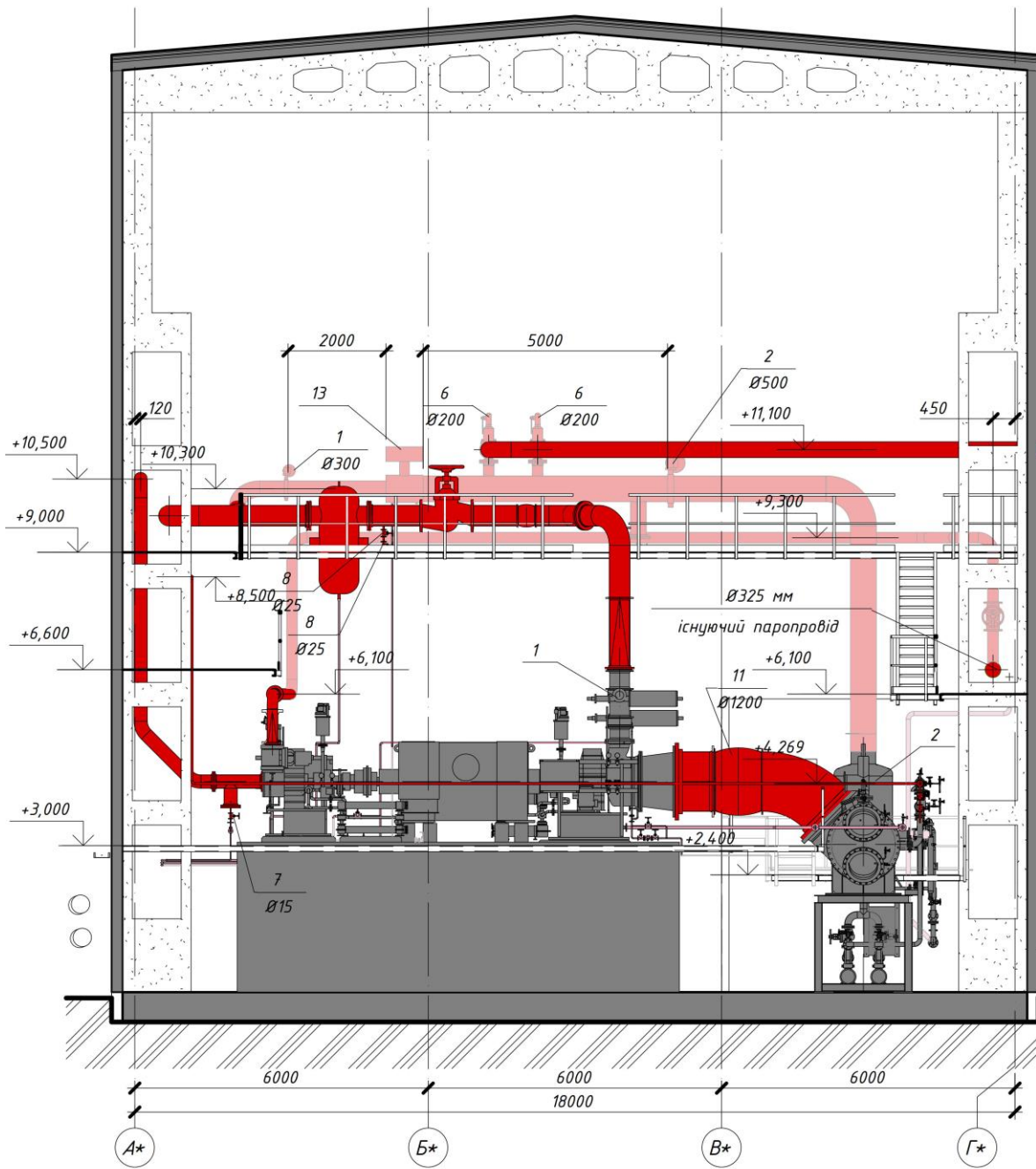
# ДОДАТКИ



Додаток А



Котельня – план



Котельня Розріз 6-6