

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

## бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: Система автоматичної вентиляції підземного паркінгу

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕТ-41  
спеціальнос  
ті 141

електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Будник О.А.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Філюк Я.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мовчан Л.Т.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Коваль В.П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Габрусєв Г.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)



6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Гурик О. Я. к.т.н., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Мовчан Л.Т., к.т.н., доц		

7. Дата видачі завдання 2 січня 2026 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	20.01.2026	
2	Аналітичний розділ	03.02.2026	
3	Проектно-конструкторський розділ	10.03.2026	
4	Розрахунковий розділ	14.04.2026	
5	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	05.05.2026	
6	Висновки	31.05.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки	26.05.2026	
8	Оформлення графічної частини	10.06.2026	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Будник О.А.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Філюк Я.О.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–41.  
- Т. : ТНТУ, 2026.

Стор.60; рис.30 ; табл.0 ; джерел 13; додатків -.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Система автоматичної вентиляції підземного паркінгу».

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження частотно-регульованого асинхронного електропривода системи вентиляції, який забезпечує автоматичне регулювання вентиляційної установки.

У першому розділі проведено аналіз систем вентиляції стояночних боксів та підземних паркінгів, розглянуто вплив шкідливих викидів автомобільного транспорту на повітряне середовище приміщень. Виконано аналіз існуючих вентиляційних систем і обґрунтовано доцільність застосування частотно-регульованого асинхронного електропривода для підвищення енергоефективності та безпеки роботи вентиляційної установки.

У другому розділі виконано розрахунок потужності вентиляційної установки та здійснено вибір приводних електродвигунів, газоаналізатора і елементів системи автоматичного керування. Розроблено структурну схему електропривода, досліджено статичні характеристики системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун» та проведено аналіз втрат потужності при вентиляторному навантаженні.

У третьому розділі розроблено математичну та імітаційну моделі асинхронного електропривода в середовищі MATLAB Simulink і виконано дослідження його динамічних характеристик. Проведено аналіз перехідних процесів системи частотного керування вентиляційною установкою та визначено оптимальні параметри налаштування, що забезпечують ефективну й надійну роботу електропривода.

*Ключові слова:* вентиляція; асинхронний електропривід; перетворювач частоти; система контролю; MATLAB Simulink..

## ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Системи вентиляції стояночного боксу	8
1.2 Характеристика шкідливих викидів автомобільного транспорту та необхідність вентиляції паркінгів	9
1.3 Аналіз існуючих систем вентиляції паркінгів	11
1.4 Висновки до розділу	17
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	18
2.1 Розрахунок потужності та вибір приводних електродвигунів вентиляційної установки	18
2.2 Вибір газоаналізатора та системи контролю загазованості стояночного боксу	20
2.3 Структурна схема силового каналу електроприводу	26
2.4 Статичні характеристики системи ПЧ-АД при регулюванні швидкості	28
2.5 Аналіз втрат потужності в асинхронному двигуні при вентиляторному характері навантаження	32
2.6 Висновки до розділу	35
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	36
3.1 Розрахунок динамічних характеристик асинхронного двигуна	36
3.2 Розробка системи ПЧ-АД	41
3.3 Дослідження перехідних процесів швидкості та електромагнітного моменту електропривода вентиляційної установки	42

3.4 Висновки до розділу	51
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	52
4.1. Значення охорони праці для забезпечення безпеки праці при роботі з автоматизованими системами	52
4.2 Основні вимоги до електробезпеки під час роботи з автоматизованими системами	53
4.3 Перелік дій при виникненні небезпечних ситуацій під час роботи з автоматизованими системами	55
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	58
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	59

## ВСТУП

Розвиток транспорту призводить до збільшення кількості транспортних засобів, що сприяє до розширення закритих автостоянок, гаражних комплексів та підземних паркінгів. Експлуатація таких об'єктів пов'язана з накопиченням у повітрі шкідливих речовин, які утворюються під час роботи двигунів. Найбільшу небезпеку становлять оксид вуглецю, оксиди азоту, незгорілі вуглеводні та інші токсичні компоненти вихлопних газів, які можуть негативно впливати на здоров'я людей та створювати небезпечні умови перебування в приміщенні.

Для забезпечення нормативних санітарно-гігієнічних умов у стояночних боксах і паркінгах застосовуються системи припливно-витяжної вентиляції. Ефективність їх роботи безпосередньо залежить від технічних характеристик електроприводів вентиляторів та алгоритмів керування ними. У традиційних вентиляційних установках вентилятори часто працюють із постійною швидкістю обертання незалежно від фактичного рівня забруднення повітря, що призводить до перевитрат електроенергії та зниження економічної ефективності експлуатації об'єкта.

Одним із напрямків підвищення енергоефективності вентиляційних систем є використання частотно-регульованих асинхронних електроприводів. Застосування перетворювачів частоти дозволяє плавно регулювати швидкість обертання вентиляторів залежно від потреб системи, зменшувати пускові струми, знижувати механічні навантаження на обладнання та забезпечувати суттєву економію електроенергії. Особливо ефективним є поєднання частотного регулювання із системами автоматичного контролю загазованості, які забезпечують адаптацію продуктивності вентиляції до реального стану повітряного середовища.

У сучасних умовах підвищення вартості енергоресурсів, необхідності впровадження енергозберігаючих технологій та посилення вимог до безпеки експлуатації будівель питання створення енергоефективних автоматизованих систем вентиляції набуває особливої актуальності. Тому розробка частотно-регульованого електропривода системи припливної вентиляції стояночного боксу є актуальним

інженерним завданням, спрямованим на підвищення безпеки, надійності та економічності роботи вентиляційного обладнання.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження частотно-регульованого асинхронного електропривода системи вентиляції, який забезпечує автоматичне регулювання вентиляційної установки.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання:

- – провести аналіз існуючих систем вентиляції закритих автостоянок та паркінгів і виконати аналіз сучасних методів регулювання швидкості електроприводів вентиляційних установок;
- – визначити необхідну продуктивність вентиляційної установки та виконати розрахунок потужності приводних електродвигунів;
- – розробити структурну схему системи автоматичного керування вентиляційною установкою та побудувати математичну модель асинхронного електропривода та системи частотного регулювання;
- – розробити імітаційну модель електропривода в середовищі MATLAB Simulink;
- – провести дослідження статичних і динамічних характеристик електропривода та виконати аналіз перехідних процесів при зміні режимів роботи вентиляційної установки;

# 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Системи вентиляції стояночного боксу

Зростання кількості автомобільного транспорту зумовлює необхідність вирішення низки важливих інженерних завдань, одним із яких є організація ефективних систем вентиляції в паркінгах та автостоянках. Сучасні житлові та громадські будівлі все частіше обладнуються підземними паркінгами, а також окремими критими стоянками наземного типу. Особливістю таких об'єктів є постійна присутність автомобілів із працюючими двигунами, що призводить до накопичення шкідливих газів і вимагає застосування надійних вентиляційних систем. [1]

Припливна вентиляція забезпечує подачу необхідної кількості свіжого повітря до приміщення, а також його підготовку відповідно до сезонних умов експлуатації. У вентиляційній установці використовується асинхронний електродвигун, для якого характерні значні пускові струми, що знижують ресурс обладнання та погіршують експлуатаційні показники системи. Одним із ефективних рішень цієї проблеми є застосування частотного регулювання, яке забезпечує плавний пуск двигуна, зменшення механічних навантажень та підвищення енергоефективності.

На сьогодні частотно-регульований електропривод широко використовується у світовій практиці не лише як засіб економії електроенергії, а й як інструмент підвищення якості. У європейських країнах такі системи успішно експлуатуються протягом кількох десятиліть, що дозволило накопичити значний досвід їх впровадження та стандартизувати основні технічні рішення.

В Україні процес модернізації систем автоматизації та впровадження сучасних частотно-регульованих електроприводів продовжує активно розвиватися. Застосування частотного регулювання у вентиляційних установках дозволяє суттєво знизити енергоспоживання, покращити якість роботи обладнання, збільшити термін його служби та підвищити загальну ефективність автоматизованих систем керування. [2]

## **1.2 Характеристика шкідливих викидів автомобільного транспорту та необхідність вентиляції паркінгів**

Характерною особливістю експлуатації сучасних гаражних комплексів, закритих автостоянок і підземних паркінгів є інтенсивний рух транспортних засобів та регулярна робота двигунів внутрішнього згоряння в межах приміщення. Під час маневрування автомобілів, їхнього в'їзду та виїзду, а також під час запуску й прогрівання двигунів, особливо в холодний період року, у повітряний простір надходить значна кількість продуктів згоряння палива. Через обмежений повітрообмін у замкнених приміщеннях концентрація шкідливих речовин може швидко зростати та перевищувати допустимі санітарно-гігієнічні норми. [3-4]

Вихлопні гази автомобільних двигунів являють собою складну суміш хімічних сполук, що утворюються внаслідок процесу згоряння палива. До складу цих газів входять як відносно безпечні компоненти, зокрема азот, кисень, водяна пара та діоксид вуглецю, так і токсичні речовини, які становлять серйозну небезпеку для здоров'я людини. Кількість і склад шкідливих викидів залежать від типу двигуна, режиму його роботи, технічного стану автомобіля та якості палива.

Найбільш небезпечними складовими вихлопних газів є оксид вуглецю (CO), оксиди азоту (NO<sub>x</sub>), оксиди сірки (SO<sub>x</sub>), незгорілі вуглеводні, альдегіди, тверді частинки сажі та канцерогенні сполуки, серед яких особливу увагу привертає бенз(а)пірен. Наявність цих речовин у повітрі негативно впливає на дихальну систему людини, серцево-судинну діяльність та загальний стан організму.

Серед усіх шкідливих компонентів особливо небезпечним є чадний газ (оксид вуглецю CO). Ця речовина не має кольору, запаху та смаку, тому її неможливо виявити без застосування спеціальних засобів контролю. Потрапляючи до організму через органи дихання, оксид вуглецю активно взаємодіє з гемоглобіном крові, утворюючи карбоксигемоглобін. Швидкість такого зв'язування в десятки разів перевищує швидкість зв'язування гемоглобіну з киснем, що призводить до

порушення транспортування кисню до тканин та розвитку кисневого голодування організму.

Навіть незначне перевищення допустимих концентрацій чадного газу може викликати головний біль, запаморочення, слабкість і погіршення самопочуття. Подальше зростання концентрації CO призводить до втрати свідомості, тяжких отруєнь та створює безпосередню загрозу життю людини. Саме тому контроль вмісту оксиду вуглецю є одним із головних завдань систем вентиляції та автоматизованого моніторингу повітряного середовища в закритих автостоянках і паркінгах. [4]

З метою забезпечення безпечних умов експлуатації таких об'єктів сучасні вентиляційні системи оснащуються газоаналізаторами, які здійснюють безперервний контроль концентрації шкідливих речовин у повітрі та забезпечують автоматичне регулювання продуктивності вентиляційного обладнання залежно від фактичного рівня загазованості приміщення.

Не менш небезпечними є оксиди азоту, які утворюються під час згоряння паливно-повітряної суміші при високих температурах. Вони подразнюють слизові оболонки дихальних шляхів, спричиняють захворювання легень та беруть участь в утворенні фотохімічного смогу. За токсичністю оксиди азоту перевищують чадний газ у декілька разів, а продукти їх подальших хімічних реакцій можуть становити ще більшу небезпеку для здоров'я людини.

Значну загрозу також становлять канцерогенні речовини, зокрема бензо(а)пірен, який здатний накопичуватися в організмі та сприяти розвитку онкологічних захворювань. Тверді частинки сажі є носіями токсичних сполук і легко проникають у нижні відділи дихальної системи, викликаючи хронічні захворювання органів дихання та серцево-судинної системи. [5]

Кількість шкідливих викидів залежить від автомобіля, та режиму його роботи. Найбільші концентрації токсичних речовин спостерігаються під час запуску двигуна, його прогрівання та роботи на холостому ході. За оцінками фахівців, під час спалювання одного кілограма бензину утворюється приблизно 15–16 кг

газоподібних продуктів згоряння, які містять десятки різноманітних хімічних сполук.

Особливо гостро проблема забруднення повітря проявляється в підземних паркінгах та закритих гаражних боксах. За відсутності ефективної вентиляції це призводить до погіршення умов праці персоналу, зниження рівня безпеки експлуатації об'єкта та створення загрози для життя людей.

З метою забезпечення нормативних параметрів повітряного середовища сучасні паркінги обладнуються системами припливно-витяжної вентиляції. Основним завданням таких систем є безперервне видалення забрудненого повітря та подача необхідної кількості свіжого зовнішнього повітря. [6]

Використання частотно-регульованого електроприводу у вентиляційних системах паркінгів дозволяє не лише підтримувати необхідні санітарно-гігієнічні показники повітряного середовища, але й суттєво знизити енергоспоживання, підвищити надійність роботи обладнання та збільшити термін його експлуатації. Саме тому впровадження сучасних автоматизованих систем керування вентиляцією є одним із найбільш ефективних напрямків удосконалення інженерного забезпечення гаражних комплексів та автостоянок.

### **1.3 Аналіз існуючих систем вентиляції паркінгів**

Забезпечення нормативних параметрів повітряного середовища в закритих автостоянках і підземних паркінгах є основним завданням під час проектування інженерних систем будівель. У процесі експлуатації транспортних засобів у повітряний простір приміщення надходять продукти згоряння палива, серед яких оксид вуглецю, оксиди азоту, вуглеводні та інші шкідливі речовини. За відсутності ефективного повітрообміну концентрація цих компонентів може перевищувати допустимі норми, що впливає на та безпеку експлуатації об'єкта. [7]

Для підтримання необхідних санітарно-гігієнічних умов у паркінгах застосовуються вентиляційні системи, основним призначенням яких є видалення забрудненого повітря та подача свіжого повітря у необхідному обсязі. Ефективна

робота вентиляції забезпечує підтримання допустимих концентрацій шкідливих речовин, запобігає утворенню зон застою повітря та створює комфортні умови для перебування людей і експлуатації транспортних засобів. [8]

Аналіз науково-технічних джерел показує, що системи вентиляції автомобільних стоянок і паркінгів можна класифікувати на природні, механічні та комбіновані. Кожен із цих типів характеризується власними особливостями конструктивного виконання, енергоефективністю, вартістю реалізації та умовами застосування. Природна вентиляція базується на використанні природних сил, які виникають внаслідок різниці температур і тисків між внутрішнім та зовнішнім повітряним середовищем. Переміщення повітряних потоків здійснюється через вентиляційні отвори, шахти, канали та інші аераційні елементи без застосування електромеханічного обладнання. Основною перевагою такого способу вентиляції є простота конструкції та відсутність витрат електроенергії на транспортування повітря. Водночас ефективність природної вентиляції значною мірою залежить від погодних умов, температури навколишнього середовища та архітектурних особливостей будівлі, що обмежує можливість її використання у великих підземних паркінгах. Схематичне зображення системи природної вентиляції наведено на рисунку 1.1.

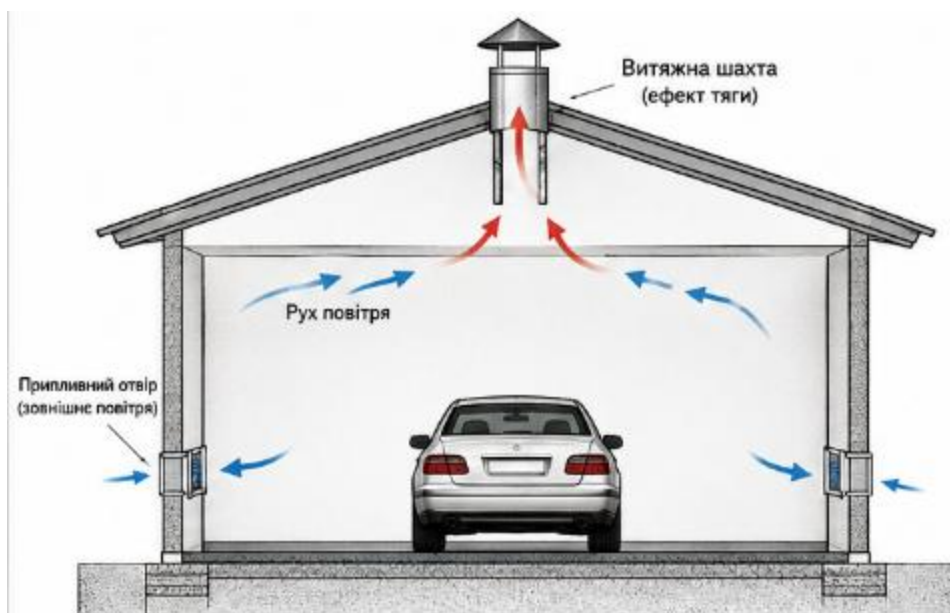


Рисунок 1.1 – Схема природної вентиляції гаражного приміщення

Основними перевагами природної вентиляції є простота конструктивного виконання, відсутність додаткових витрат електричної енергії та мінімальні експлуатаційні витрати. Такі системи не потребують складного обладнання та характеризуються високою надійністю завдяки невеликій кількості елементів. Разом з тим ефективність природного повітрообміну значною мірою визначається зовнішніми кліматичними умовами, зокрема температурою навколишнього середовища, атмосферним тиском і швидкістю вітру. Через це забезпечити стабільні параметри повітряного середовища за допомогою природної вентиляції в приміщеннях великого об'єму досить складно. Саме тому для підземних паркінгів, багаторівневих автостоянок та великих гаражних комплексів використання лише природної вентиляції є недостатнім для дотримання нормативних вимог щодо якості повітря. [9]

Найбільш ефективним та поширеним рішенням для вентиляції закритих автостоянок є механічна вентиляція. У таких системах переміщення повітря здійснюється за допомогою електричних вентиляторів, що забезпечують примусовий повітрообмін незалежно від погодних умов та пори року. Завдяки використанню механічних засобів транспортування повітря досягається необхідна продуктивність системи, забезпечується рівномірний розподіл повітряних потоків у приміщенні та підтримуються допустимі концентрації шкідливих газів.

Сучасні припливно-витяжні системи механічної вентиляції можуть працювати як у постійному режимі, так і в автоматичному режимі з регулюванням продуктивності залежно від рівня загазованості приміщення. Для цього використовуються датчики концентрації оксиду вуглецю, частотні перетворювачі та програмовані контролери, що дозволяє підвищити енергоефективність роботи системи та знизити експлуатаційні витрати.

Завдяки високій ефективності очищення повітря, можливості автоматичного керування та відповідності сучасним вимогам пожежної й екологічної безпеки механічна вентиляція є основним типом вентиляційних систем, що застосовуються в підземних паркінгах і закритих автостоянках. [10]

Схема механічної припливно-витяжної вентиляції наведена на рисунку 1.2.

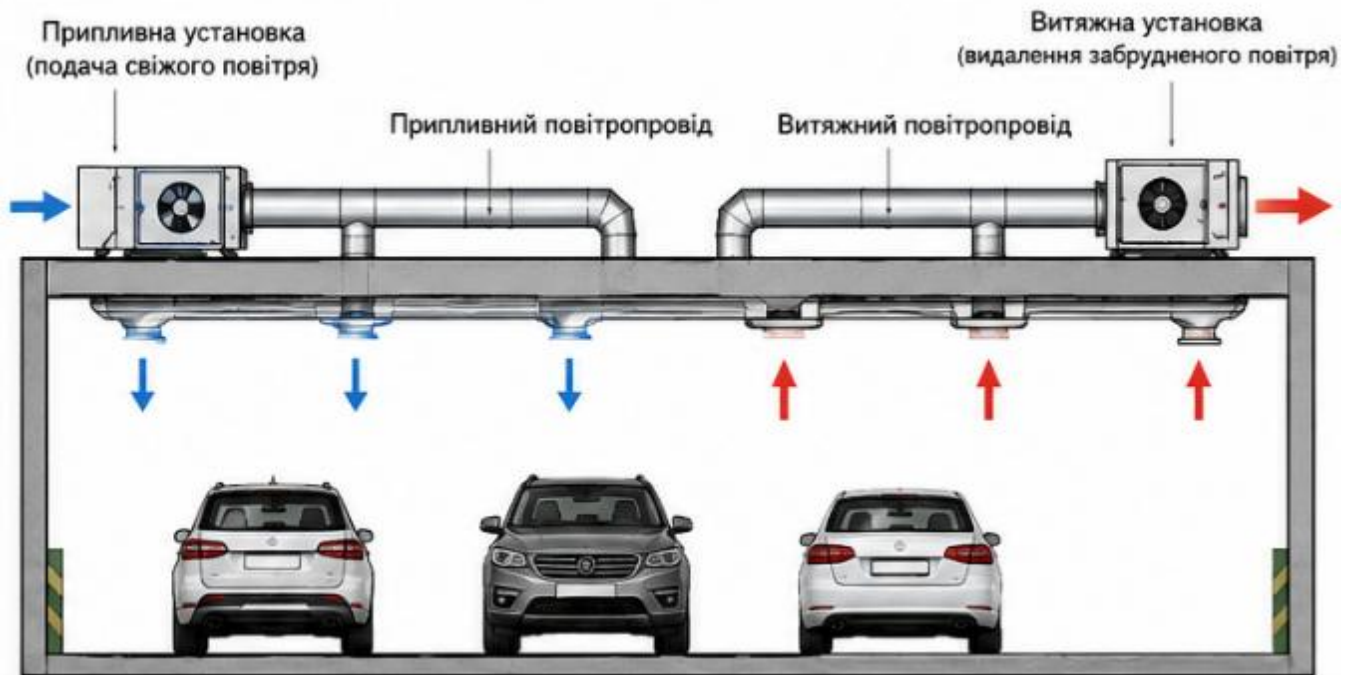


Рисунок 1.2 – Схема механічної припливно-витяжної вентиляції паркінгу

У механічних системах свіже повітря подається до приміщення через припливні канали, а забруднене видаляється витяжними вентиляторами. Такий принцип роботи забезпечує рівномірний розподіл повітряних потоків по всьому об'єму приміщення та ефективне видалення шкідливих домішок. [11]

Останніми роками значного поширення набули струминні (Jet Fan) системи вентиляції підземних паркінгів. Їх особливістю є відсутність розгалуженої мережі повітропроводів. Переміщення повітря здійснюється за допомогою спеціальних струминних вентиляторів, які створюють спрямований потік і переміщують забруднене повітря до витяжних шахт. Приклад організації такої системи наведений на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Струминна система вентиляції підземного паркінгу

Основними перевагами струминних систем є зменшення кількості повітропроводів, економія будівельного простору та зниження витрат на монтаж. Крім того, такі системи можуть використовуватися як елемент протидимного захисту у випадку пожежі. [12]

У більшості традиційних вентиляційних установок вентилятори працюють із постійною швидкістю обертання. Незалежно від фактичної концентрації шкідливих речовин система функціонує з однаковою продуктивністю, що призводить до перевитрат електроенергії. Аналіз сучасних досліджень показує, що найбільш ефективним способом підвищення енергоефективності вентиляційних систем є застосування частотно-регульованих електроприводів.

Структурна схема вентиляційної установки з частотним регулюванням наведена на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 –Схема структурна системи вентиляції з ЧР електроприводом

До системи входять датчики концентрації чадного газу та інших шкідливих речовин, програмований контролер, перетворювач частоти та асинхронний двигун вентилятора. У разі збільшення концентрації забруднювальних речовин газоаналізатор передає сигнал до системи керування, яка автоматично збільшує швидкість обертання вентилятора. При зниженні концентрації шкідливих домішок продуктивність системи зменшується, що дозволяє економити електроенергію.

Особливий інтерес для даної роботи становлять асинхронні електроприводи з частотним регулюванням. Використання перетворювачів частоти забезпечує плавний пуск двигуна, зменшує пускові струми, знижує механічні навантаження на робоче колесо вентилятора та підвищує термін служби обладнання. Крім того, регулювання швидкості обертання дозволяє підтримувати продуктивність вентиляційної установки відповідно до фактичних потреб об'єкта.

Аналіз літератури показав, що перспективним напрямком розвитку вентиляційних систем паркінгів є застосування автоматизованих припливно-витяжних установок із частотно-регульованими асинхронними електроприводами та системами контролю загазованості. Такі рішення забезпечують необхідний рівень безпеки, знижують витрати та є енергоефективними.

## 1.4 Висновки до розділу

Проведено аналіз особливостей експлуатації стояночних боксів і підземних паркінгів та визначено основні вимоги до їх вентиляції. Встановлено, що під час роботи двигунів внутрішнього згоряння в повітря виділяються шкідливі речовини, зокрема чадний газ, оксиди азоту, вуглеводні та сажа, концентрація яких у замкнених приміщеннях може перевищувати допустимі норми.

Аналіз існуючих систем вентиляції показав, що найбільш ефективними для паркінгів є механічні припливно-витяжні системи, які забезпечують необхідний повітрообмін незалежно від зовнішніх умов. Водночас традиційні вентиляційні установки з нерегульованою швидкістю вентиляторів характеризуються підвищеним енергоспоживанням і недостатньою гнучкістю керування.

З аналізу обґрунтовано застосування частотно-регульованого асинхронного електропривода в системі припливної вентиляції стояночного боксу. Його використання дозволяє знизити енергоспоживання, зменшити пускові струми, підвищити надійність роботи обладнання та забезпечити підтримання безпечних параметрів повітряного середовища. Отримані результати є основою для подальшого проектування та розрахунку системи електропривода.

## 2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Розрахунок потужності та вибір приводних електродвигунів вентиляційної установки

Для забезпечення нормативного повітрообміну у виробничих приміщеннях застосовуються вентиляційні установки, до складу яких входять вентилятори, система повітропроводів та вентиляційних каналів. Основним призначенням такої системи є подача свіжого повітря та видалення забрудненого повітря з приміщення.

Розрахункова потужність вентиляційної установки визначається за формулою

$$P_{\text{в.у.роз.}} = \frac{\kappa_{\text{зан}} \cdot Q_{\text{в}} \cdot H_{\text{в}}}{\eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{н}}} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт} \quad (2.1)$$

Де  $\kappa_{\text{зан}} = (1,1 \div 1,5)$  – коефіцієнт запасу,  $Q_{\text{в}}$  – продуктивність вентиляційної установки,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $H_{\text{в}} = (800 \div 1300) \text{ Па}$  – створюваний напір повітря,  $\eta_{\text{в}}$  – коефіцієнт корисної дії вентилятора,  $\eta_{\text{н}}$  – коефіцієнт корисної дії механічної передачі.

Продуктивність вентиляційної установки визначається з урахуванням об'єму приміщення та кратності повітрообміну:

$$Q_{\text{в}} = \frac{V \cdot \lambda_{\text{в}}}{3600} \quad (2.2)$$

де  $\lambda_{\text{в}}$  – кратність обміну повітря.

Об'єм гаражного приміщення становить:

$$V = A \cdot B \cdot H = 42 \cdot 30 \cdot 5 = 6300 \text{ м}^3 \quad (2.3)$$

Для приміщення гаража приймаємо кратність повітрообміну  $\lambda_g = 7 / год$ . Тоді продуктивність вентиляційної установки дорівнює

$$Q_g = \frac{6300 \cdot 7}{3600} = 12,25 \text{ м}^3 / \text{с} \quad (2.4)$$

Для подальших розрахунків приймаємо такі параметри:

- напір повітря  $H_g = 1300 \text{ Па}$ ;
- коефіцієнт запасу  $\kappa_{зан} = 1,1$ ;
- ККД вентилятора  $\eta_g = 0,69$ ;
- ККД механічної передачі  $\eta_n = 0,91$ .

Підставляючи вихідні дані у формулу розрахунку потужності, отримуємо:

$$P_{в.у.роз.} = \frac{1,1 \cdot 12,25 \cdot 1300}{0,69 \cdot 0,91} \cdot 10^{-3} = 27898 \text{ Вт} \quad (2.5)$$

Враховуючи об'єм приміщення та необхідну продуктивність, приймаємо вентиляційну установку, що складається з чотирьох вентиляторів.

Розрахункова потужність електродвигуна одного вентилятора:

$$P_{роз.1вен.} = \frac{P_{в.у.роз.}}{N_{вен}} = \frac{27898}{4} = 6974,5 \text{ Вт} \quad (2.6)$$

Для приводу вентиляторів обираємо асинхронні електродвигуни серії АІР із синхронною частотою обертання 1500 об/хв. Номінальна потужність двигуна має відповідати умові:

$$P_{ном.1вен.} \geq P_{роз.1вен.} \quad (2.7)$$

За результатами вибору приймаємо двигун типу АІР132S4 номінальною потужністю 7,5 кВт представлений на рисунку 2.1., технічні дані двигуна наведені у таблиці 2.1.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд електродвигуна АІР132S4

Сумарна встановлена потужність вентиляційної установки становить 30 кВт.

Таблиця 2.1 - Технічні дані асинхронного двигуна вентилятора

Тип двигуна	Синх. частота, об/хв	Момент інерції, кг·м <sup>2</sup>	Потужність, кВт	Ковзання s	Струм, А (380 В)	ККД, %	cosφ
АІР132S4	1500	0,0227	7,5	0,04	15,6	87	0,84

Отже, для забезпечення необхідного повітрообміну в гаражному приміщенні доцільно застосувати чотири вентилятори з асинхронними електродвигунами типу АІР132S4 потужністю 7,5 кВт кожний.

## 2.2 Вибір газоаналізатора та системи контролю загазованості стояночного боксу

Для забезпечення безпечних умов експлуатації стояночного боксу необхідно здійснювати безперервний контроль концентрації шкідливих газів, що утворюються

внаслідок роботи двигунів внутрішнього згоряння. Найбільшу небезпеку для персоналу та відвідувачів паркінгу становить оксид вуглецю (CO), який є безбарвним і не має запаху, що ускладнює його своєчасне виявлення без застосування спеціальних технічних засобів.

З метою автоматичного контролю загазованості приміщення обираємо стаціонарний газоаналізатор ОКСИ 5С українського виробництва компанії «Екотест». Прилад призначений для безперервного контролю концентрації кисню, оксиду вуглецю та інших газів у повітрі виробничих приміщень і може інтегруватися до систем автоматизації вентиляційних установок через цифрові та аналогові інтерфейси зв'язку.



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд газоаналізатора ОКСИ 5С

Принцип дії газоаналізатора базується на використанні електрохімічного сенсора, який перетворює концентрацію контрольованого газу на електричний сигнал. Отримана інформація обробляється вбудованим мікропроцесором і передається до системи керування через інтерфейс RS-485 (Modbus RTU) або аналоговий вихід 4–20 мА.

Основними перевагами обраного газоаналізатора є:

- безперервний контроль концентрації оксиду вуглецю;
- висока точність вимірювання;
- підтримка цифрового протоколу Modbus RTU;
- наявність аналогового виходу 4–20 мА;
- ступінь захисту корпусу IP65;
- можливість інтеграції в системи диспетчеризації та автоматизації;
- промислове виконання для роботи у важких умовах експлуатації.

Для реалізації автоматизованого керування вентиляційною установкою газоаналізатор підключається до програмованого логічного контролера (ПЛК), який здійснює обробку інформації про концентрацію оксиду вуглецю та подає сигнал керування ЧП вентилятора. Структурна схема підключення газоаналізатора до системи автоматичного керування вентиляцією представлено на рисунку 2.3



Рисунок 2.3 – Структурна схема підключення газоаналізатора до системи автоматичного керування вентиляцією

Алгоритм системи має автоматичну зміну продуктивності вентиляційної установки залежно від рівня загазованості приміщення. При незначній концентрації оксиду вуглецю вентиляція працює на мінімальній швидкості для забезпечення нормативного повітрообміну. При збільшенні концентрації CO частота обертання вентиляторів автоматично зростає.

Таблиця 2.2 – Закон керування вентилятором залежно від концентрації CO

CO, мг/м <sup>3</sup>	Режим	Частота, Гц	Швидкість, %
0–10	Черговий	20	40
10–20	Нормальний	30	60
20–50	Підвищений	40	80
50–100	Максимальний	50	100
>100	Аварійний	50	100

Запропонована система автоматичного керування дозволяє підтримувати необхідну якість повітря в приміщенні стояночного боксу, зменшити споживання електроенергії за рахунок використання частотного регулювання електропривода вентилятора та забезпечити безпечні умови перебування людей у приміщенні.

Кожен моноблок є самостійним газоаналізатором, оснащений світловою сигналізацією і, за запитом, струмовим виходом. Крім автономної роботи, газоаналізatori можна об'єднати в вимірювальні системи різного рівня, від простих, що використовують у своєму складі тільки один газоаналізатор, до складних, що об'єднують будь-яку, необхідну для вирішення завдань контролю, кількість одноканальних газоаналізаторів. У окремому випадку електрична схема з'єднань буде відповідати схемам «зірка» або «зірка/трикутник», які застосовувалися для раніше випущених приладів.

Системи, що складаються з одноканальних газоаналізаторів, об'єднаних у вимірювальну систему, особливо зручні для контролю протяжних об'єктів, де правила безпеки вимагають значної кількості точок контролю повітряного середовища. Системи контролю загазованості на базі газоаналізаторів OKSI 5C представлена на рисунку 2.4.

На рисунку представлено структуру багатоканальної системи контролю загазованості, побудованої на основі стаціонарних газоаналізаторів OKSI 5C та об'єднаної єдиною цифровою мережею обміну даними.

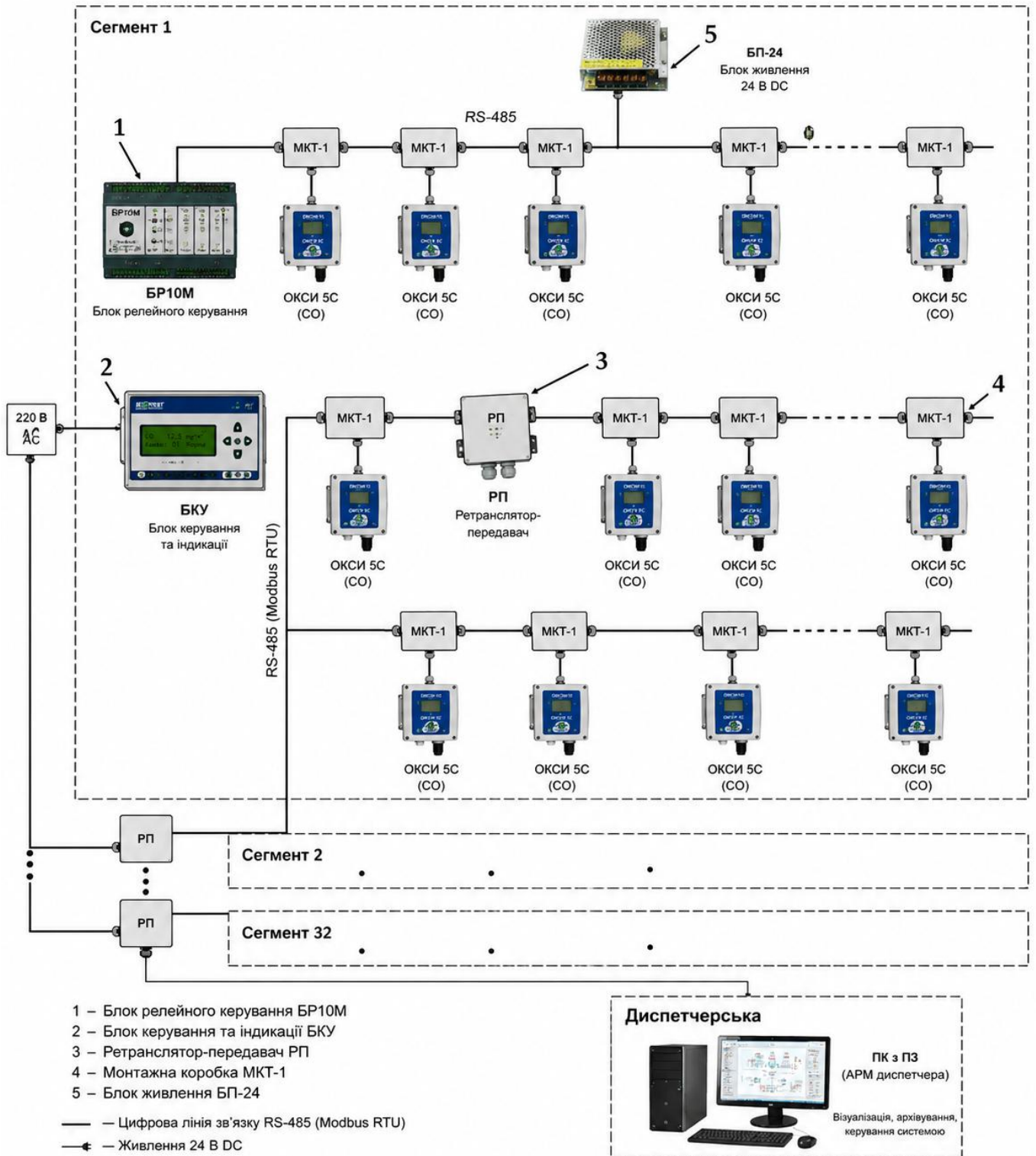


Рисунок 2.4 – Варіант побудови системи контролю загазованості на базі газоаналізаторів ОКСИ 5С

До складу системи входять такі основні елементи:

1 – Блок релейного керування БР10М

Призначений для керування зовнішніми виконавчими пристроями за сигналами від газоаналізаторів. Блок містить до десяти незалежних релейних виходів та забезпечує автоматичне включення вентиляційних установок, світлової та звукової сигналізації, а також інших пристроїв системи безпеки при перевищенні допустимих концентрацій шкідливих газів.

## 2 – Блок керування та індикації БКУ

Забезпечує централізований збір даних від газоаналізаторів ОКСИ 5С, відображення поточних значень концентрації газів, світлову та звукову сигналізацію аварійних режимів, а також передачу інформації до автоматизованої системи керування вентиляцією.

## 3 – Ретранслятор РП

Використовується для збільшення довжини цифрової лінії зв'язку та побудови розгалужених мереж передачі даних. Забезпечує надійну роботу системи на великих об'єктах із значною кількістю контрольних точок.

## 4 – Монтажна коробка МКТ-1

Призначена для комутації кабельних ліній зв'язку та живлення елементів системи. Забезпечує зручність монтажу та технічного обслуговування обладнання.

## 5 – Блок живлення БП-24

Забезпечує живлення газоаналізаторів ОКСИ 5С, блоків керування та допоміжного обладнання стабілізованою напругою 24 В постійного струму.

Газоаналізатори ОКСИ 5С встановлюються безпосередньо в контрольованих зонах стояночного боксу та здійснюють безперервний контроль концентрації оксиду вуглецю (СО). Передача даних між елементами системи виконується по цифровому інтерфейсу RS-485 з використанням протоколу Modbus RTU.

У разі перевищення допустимої концентрації чадного газу інформація надходить до блоку БКУ та програмованого логічного контролера системи вентиляції. Контролер формує сигнал керування частотним перетворювачем, який автоматично збільшує швидкість обертання вентиляторів. При досягненні аварійного рівня загазованості система додатково активує світлову та звукову сигналізацію.

Запропонована структура забезпечує централізований контроль повітряного середовища, підвищує безпеку експлуатації стояночного боксу та дозволяє реалізувати енергоефективне керування вентиляційною системою залежно від фактичного рівня загазованості приміщення.

### 2.3 Структурна схема силового каналу електроприводу

У систему силового каналу ЧР електропривода входять такі основні елементи:

- перетворювач частоти, який забезпечує перетворення параметрів електричної енергії та формує необхідні значення частоти й амплітуди напруги живлення електродвигуна;
- асинхронний електродвигун, що виконує перетворення електроенергії в механічну;
- механічна, яка передає енергію механічну в робочий механізму та забезпечує виконання технологічного процесу.

Під час дослідження, аналізу та проєктування систем автоматизованого керування асинхронними електроприводами широко використовуються математичні моделі електродвигунів, побудовані на основі теорії узагальненої електричної машини. Залежно від поставленої задачі такі моделі можуть бути представлені в нерухомих або обертових системах координат, що значно спрощує аналіз електромагнітних і механічних процесів, які відбуваються в електроприводі.

Для побудови мат. моделі системи ПЧ – АД використовується двофазна нерухома система координат  $(\alpha) - (\beta)$ , пов'язана зі статором електричної машини. Застосування такого підходу дозволяє перейти від трифазної системи змінних до еквівалентної двофазної моделі, що суттєво спрощує математичний опис електромагнітних процесів без втрати точності розрахунків.

Математичний опис асинхронного двигуна в системі координат  $(\alpha) - (\beta)$ , орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора, включає систему диференціальних рівнянь, які характеризують взаємозв'язок між напругами, струмами, потокозчепленнями та електромагнітним моментом машини. Отримана

модель дозволяє виконувати дослідження статичних і динамічних режимів роботи електропривода, аналізувати процеси пуску, гальмування та регулювання швидкості, а також здійснювати синтез сучасних систем автоматичного керування асинхронними двигунами.

$$\begin{aligned}
 U_{1\alpha} &= R_e(T_e p + 1)I_{1\alpha} - \frac{R'_2 L_\mu}{L_2'^2} \psi_{2\alpha} - \frac{L_\mu}{L_2'} z_p \omega \psi_{2\beta} \\
 U_{1\beta} &= R_e(T_e p + 1)I_{1\beta} - \frac{R'_2 L_\mu}{L_2'^2} \psi_{2\beta} + \frac{L_\mu}{L_2'} z_p \omega \psi_{2\alpha} \\
 0 &= (T_2 p + 1)\psi_{2\alpha} - L_\mu I_{1\alpha} + \frac{L_2'}{R_2'} z_p \omega \psi_{2\beta} \\
 0 &= (T_2 p + 1)\psi_{2\beta} - L_\mu I_{1\beta} + \frac{L_2'}{R_2'} z_p \omega \psi_{2\alpha} \\
 M_{em} &= \frac{3}{2} \frac{L_\mu}{L_2'} z_p (\psi_{2\alpha} I_{1\beta} - \psi_{2\beta} I_{1\alpha}) \\
 \dot{\omega} &= \frac{1}{J_p} (M_{em} - M_c)
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

На основі даної системи рівнянь була складена структурна схема на рисунку 2.5. Структурна схема описує процеси, що відбуваються в машині змінного струму, в якій діють змінні величини напруг, струмів, потокозчеплень синусоїдальної форми. Вхідними сигналами структурної схеми силового каналу є складові напруги керування перетворювача  $U_{\text{уп}\alpha}$  та  $U_{\text{уп}\beta}$ , подані в ортогональній системі координат  $(\alpha) - (\beta)$ . Вихідною координатою моделі є кутова швидкість обертання ротора асинхронного двигуна  $\omega$ .

Структурна схема, наведена на рисунку 2.5, відображає взаємозв'язок між електричними та механічними координатами електропривода. У процесі моделювання використовуються проміжні змінні, які характеризують стан електромагнітної системи двигуна. До них належать складові напруги, струмів статора та потокозчеплення ротора в нерухомій двофазній системі координат

$(\alpha) - (\beta)$ . У моделі визначається електромагнітний момент двигуна  $M_{em}$ , який є основною величиною, що зв'язує електричну частину привода з механічною.

Застосування такої структурної схеми дозволяє наочно представити процес перетворення електричних сигналів керування у механічний рух виконавчого механізму. Крім того, модель дає змогу досліджувати динамічні режими роботи асинхронного електропривода, зокрема пуск, зміну навантаження та перехідні процеси.

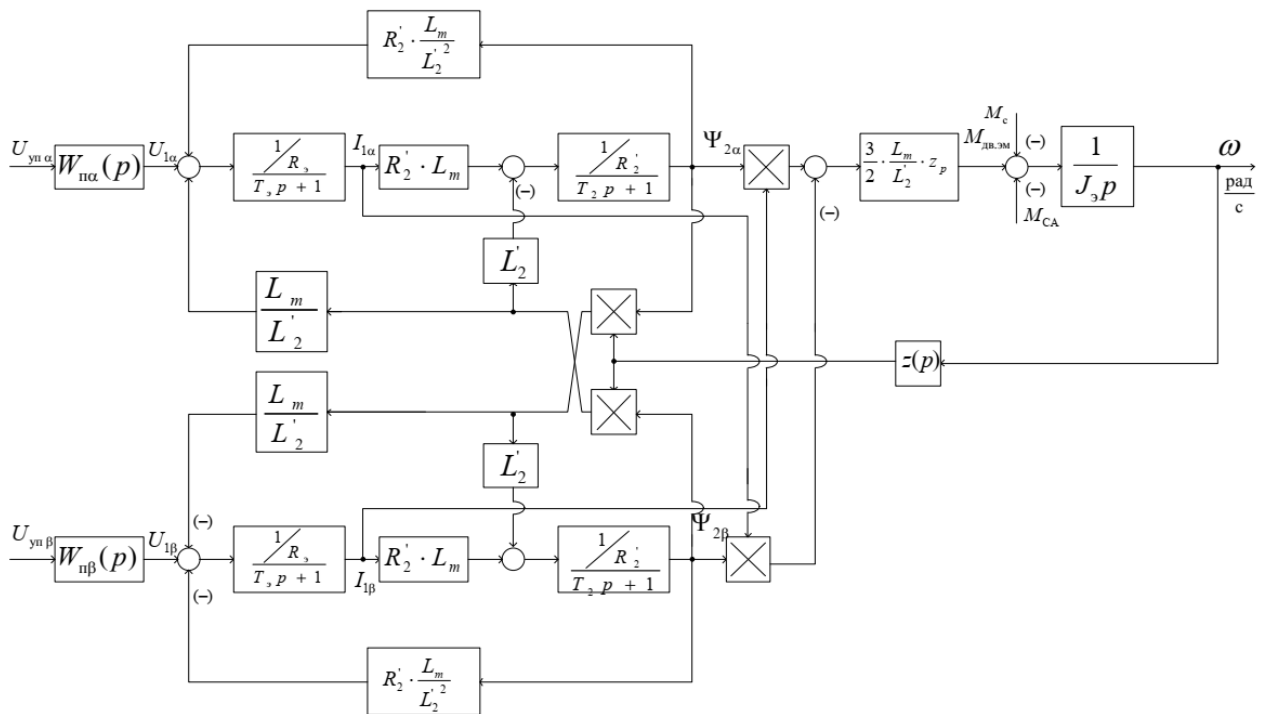


Рисунок 2.5 - Структурна схема силового каналу ЧР АД в нерухомій системі координат  $(\alpha) - (\beta)$

## 2.4 Статичні характеристики системи ПЧ-АД при регулюванні швидкості

$\frac{U_{1j}}{f_{1j}^2} = \text{const}$  такий клас законів регулювання в електроприводах змінного

струму отримав широке застосування.

Однак, при регулюванні швидкості за допомогою, даного закону, необхідно підвищувати фазне напруження на двигуні на величину, визначену рівнянням  $U_{1j} = E_{1j} + I_1 \cdot R_1$ , тобто на величину падіння напруги на.[5]

$$\begin{aligned}
 f_{1n1} &= 50 \text{ Гц}; & f_{11}^* &= \frac{f_{1n1}}{f_{1n}} = \frac{50}{50} = 1; \\
 f_{1n2} &= 25 \text{ Гц}; & f_{12}^* &= \frac{f_{1n2}}{f_{1n}} = \frac{25}{50} = 0.5; \\
 f_{1n3} &= 10 \text{ Гц}; & f_{13}^* &= \frac{f_{1n3}}{f_{1n}} = \frac{10}{50} = 0.2; \\
 f_{1n4} &= 5 \text{ Гц}; & f_{14}^* &= \frac{f_{1n4}}{f_{1n}} = \frac{5}{50} = 0.1.
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

Для підтримки відношення  $\frac{U}{f^2} = \text{const}$ , необхідно змінювати напруження:

$$\begin{aligned}
 U_{1n2} &= 4.4 \cdot f_{1n2}^2, & U_{1n2} &= 55 \text{ В}; \\
 U_{1n3} &= 4.4 \cdot f_{1n3}^2, & U_{1n3} &= 8.8 \text{ В}; \\
 U_{1n4} &= 4.4 \cdot f_{1n4}^2, & U_{1n4} &= 2.2 \text{ В}.
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

Синхронна швидкість на природній характеристиці

$$\omega_0 = \frac{n_0}{9.55} = 157.08 \text{ рад/с}$$

Синхронна швидкість на регулювальних характеристиках

$$\begin{aligned}
 \omega_{12} &= \omega_0 f_{12}^* = 157.08 \cdot 0.5 = 78.54 \text{ рад/с}; \\
 \omega_{13} &= \omega_0 f_{13}^* = 157.08 \cdot 0.2 = 31.416 \text{ рад/с}; \\
 \omega_{14} &= \omega_0 f_{14}^* = 157.08 \cdot 0.1 = 15.708 \text{ рад/с}.
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

Електромеханічні характеристики, що визначається із співвідношення струму ротора від ковзання

$$I_2'(s) = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_k^2 \cdot f_1 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_\mu \cdot f_1}\right)^2}} \quad (2.11)$$

$S_j = \frac{\omega_{0j} - \omega}{\omega_{0j}}$  – відносне ковзання .

Приклад розрахунку для  $S_j = 1$ ,  $R_1 = 0.644 \Omega$ ,  $f_* = 1$ :

$$I_2' = \frac{220}{\sqrt{0.467^2 \cdot 1^2 + \left(0.00685 + \frac{0.00675}{1}\right)^2 + \left(\frac{0.467 \cdot 0.452}{1 \cdot 53.459 \cdot 1}\right)^2}} = 49.697 \text{ A}$$

$U_{ij}$  – фазна напруга обмоток статора асинхронного двигуна ;

$f_* = \frac{f_{1j}}{f_{1H}}$  – відносне значення частоти напруги живлення .

Результати дослідження електромеханічних властивостей асинхронного двигуна подано у вигляді характеристик ротора, наведених на рисунку 2.6.

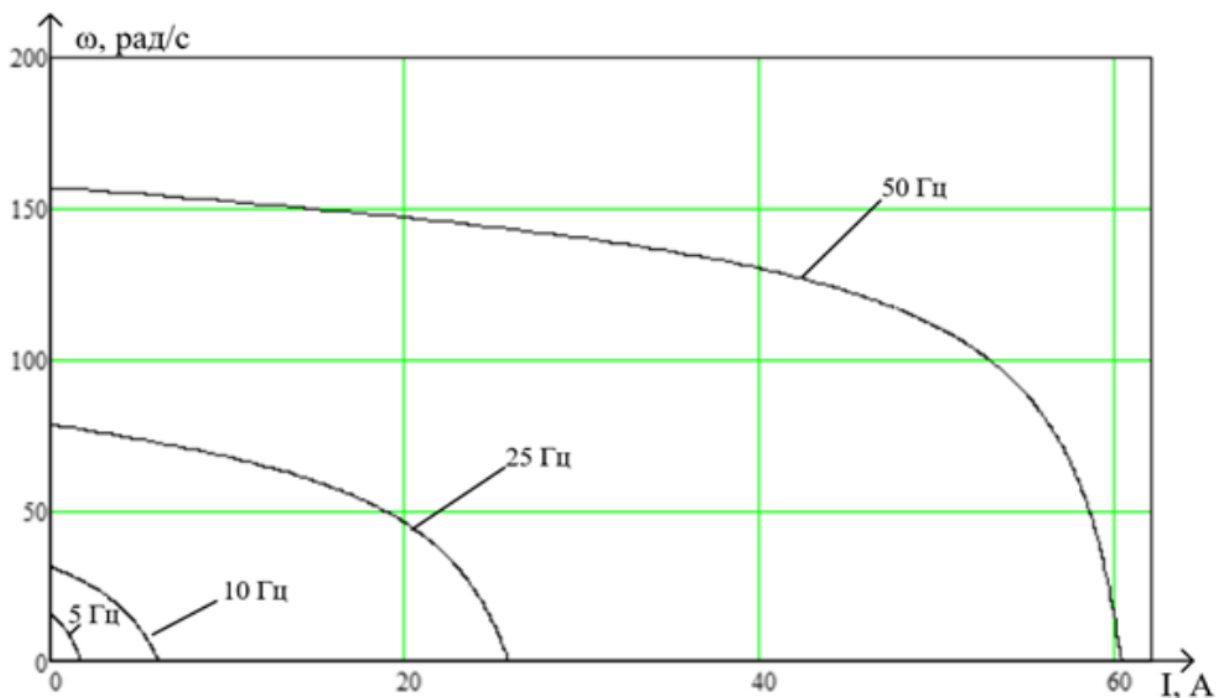


Рисунок 2.6 - Електромеханічних властивостей АД (струм ротора)  $I_2 = f(\omega)$

Далі проведемо розрахунок електромеханічні характеристики АД  $I_1 = f(\omega)$  при різних значеннях частот обмоток статора.

Вважаючи струм намагнічування асинхронного двигуна  $I_0$  реактивним ( $I_{0A} = 0$ ), струм статора  $I_1$  через приведений струм ротора  $I_2'$  можна знайти за формулою.

$$I_{1i} = \sqrt{I_0^2 + I_{2i}'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_{2i}'(s) \cdot \sin \varphi_{2i}(s)} \quad (2.12)$$

$$\text{де } \varphi_{2i}(s) = \arcsin \left[ \frac{X_{\text{ef}} \cdot (f_{li}^*)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{ef}}^2 \cdot (f_{li}^*)^2}} \right]$$

Результати дослідження електромеханічних властивостей асинхронного двигуна подано у вигляді характеристик струму статора, наведених на рисунку 2.7.

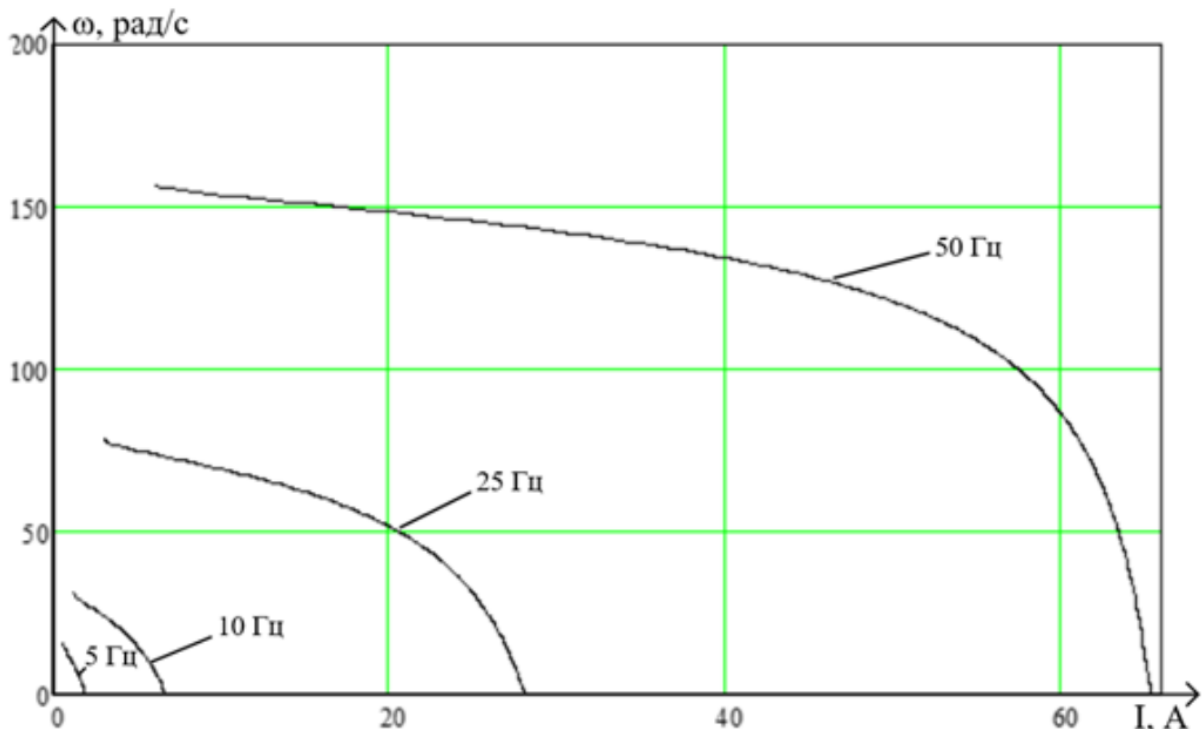


Рисунок 2.7 – Електромеханічних властивостей АД (струм статора)  $I_1 = f(\omega)$

## 2.5 Аналіз втрат потужності в асинхронному двигуні при вентиляторному характері навантаження

Вентиляторне навантаження описується рівнянням

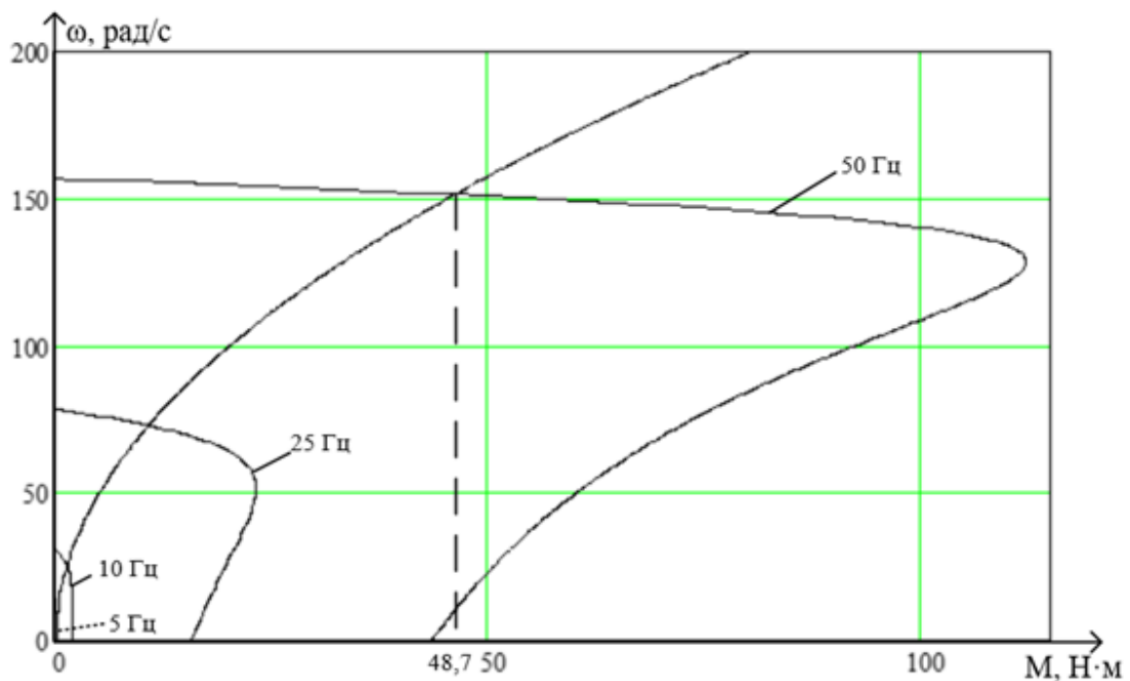
$$M_H = M_0 + k \cdot \omega^2 \quad (2.13)$$

де  $M_0$  – початковий момент.  $M_0 = 0,3$

$k$ - коефіцієнт вентиляційного навантаження.  $k=0,002$

$\omega^2$  - швидкість обертання

Підставивши розраховані значення частоти живлення у відповідні рівняння, визначаємо значення електромагнітного моменту асинхронного двигуна для кожного режиму роботи. На основі отриманих результатів будуюмо сімейство штучних механічних характеристик двигуна, а також характеристику вентиляторного навантаження представленої на рисунку 2.8.



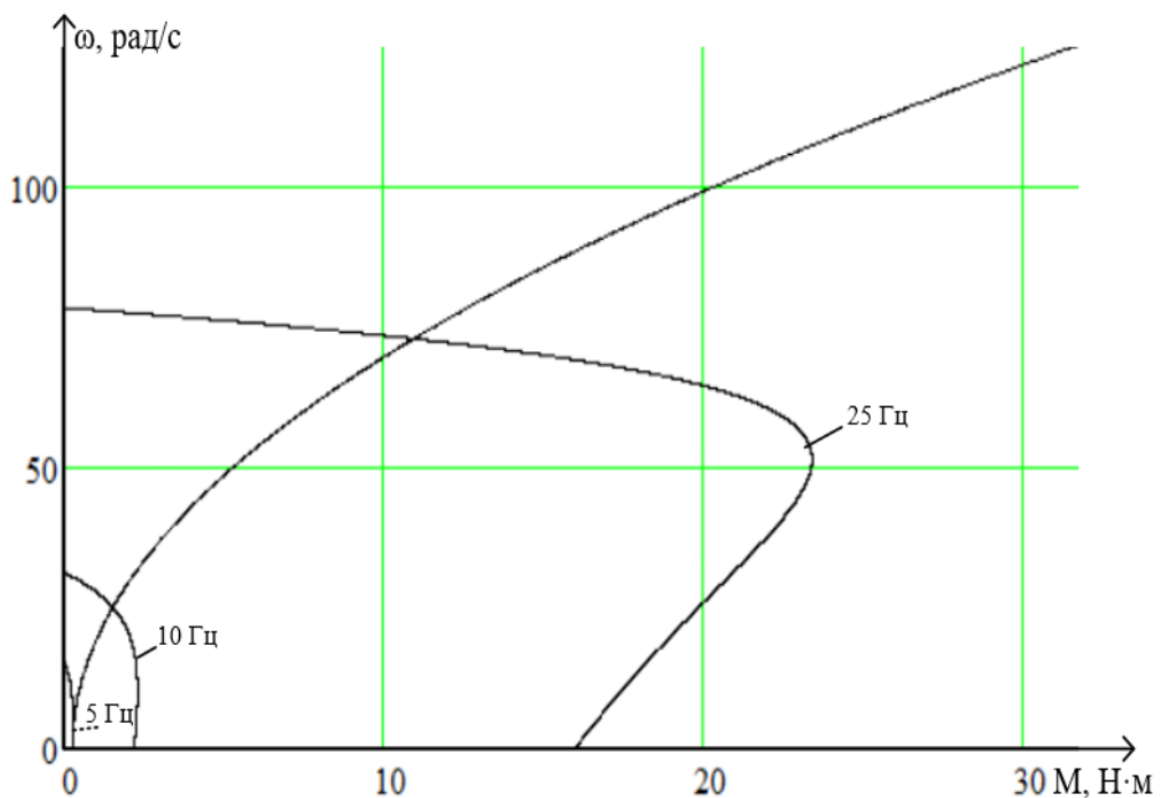


Рисунок 2.8 - Штучні механічні характеристики  $M(\omega)$  асинхронного двигуна при частотному регулюванні швидкості за вентиляторного навантаження

Робочі режими електропривода визначаються точками перетину механічних характеристик двигуна та навантаження. Саме в цих точках встановлюється рівність електромагнітного моменту двигуна і моменту навантаження, що відповідає усталеному режиму роботи системи.

За результатами побудови характеристик визначено такі значення кутової швидкості в робочих точках:

1. При частоті живлення ( $f_1 = 50$ ) Гц:  $\omega_{p1} = 151$  рад/с;
2. При частоті живлення ( $f_2 = 25$ ) Гц:  $\omega_{p2} = 74$  рад/с;
3. При частоті живлення ( $f_3 = 10$ ) Гц:  $\omega_{p3} = 27$  рад/с;

Для кожного режиму роботи визначаються відповідні значення моменту навантаження та ковзання асинхронного двигуна.

$$\begin{aligned}
M_{e.1} &= M_0 + k \cdot \omega_{p1}^2 = 0.3 + 0.002 \cdot 151^2 = 45.9 \text{ Нм}; \\
s_{p1} &= \frac{\omega_0 - \omega_{p1}}{\omega_0} = \frac{157.08 - 151}{157.08} = 0.038; \\
M_{e.2} &= M_0 + k \cdot \omega_{p2}^2 = 0.3 + 0.002 \cdot 74^2 = 11.25 \text{ Нм}; \\
s_{p2} &= \frac{\omega_0 - \omega_{p2}}{\omega_0} = \frac{78.54 - 74}{78.54} = 0.057; \\
M_{e.3} &= M_0 + k \cdot \omega_{p3}^2 = 0.3 + 0.002 \cdot 27^2 = 1.76 \text{ Нм}; \\
s_{p3} &= \frac{\omega_0 - \omega_{p3}}{\omega_0} = \frac{31.416 - 27}{31.416} = 0.14.
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Втрати потужності в роторному колі двигуна розраховуються за відповідною залежністю, яка враховує значення електромагнітного моменту та ковзання машини.

$$\begin{aligned}
\Delta P &= \omega_0 \cdot s_p \cdot M_e \\
\Delta P_1 &= \omega_{01} \cdot s_{p1} \cdot M_{e.1} = 157.08 \cdot 0.038 \cdot 45.9 = 273.98 \text{ Вт}; \\
\Delta P_2 &= \omega_{02} \cdot s_{p2} \cdot M_{e.2} = 78.54 \cdot 0.057 \cdot 11.25 = 50.36 \text{ Вт}; \\
\Delta P_3 &= \omega_{03} \cdot s_{p3} \cdot M_{e.3} = 31.416 \cdot 0.14 \cdot 1.76 = 7.74 \text{ Вт}.
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Проведений аналіз показує, що зі зменшенням частоти живлення двигуна та відповідним зниженням швидкості обертання ротора відбувається зменшення втрат потужності в роторі. Це пояснюється особливостями вентиляторного навантаження, для якого момент опору залежить від швидкості обертання та зменшується при її зниженні. У результаті зменшується навантаження на електропривод, що приводить до зниження струмів у двигуні та відповідного зменшення енергетичних втрат.

Таким чином, використання частотного регулювання швидкості забезпечує не лише плавне керування роботою вентиляційної установки, але й дозволяє істотно підвищити енергоефективність електропривода за рахунок зниження втрат потужності при роботі на знижених швидкостях

## 2.6 Висновки до розділу

У даному розділі виконано проектування ЧР електропривода системи вентиляції стояночного боксу. На основі розрахунку необхідного повітрообміну визначено потрібну продуктивність вентиляційної установки та виконано вибір приводних електродвигунів. Для забезпечення заданих параметрів роботи прийнято чотири асинхронні електродвигуни типу AIP132S4 потужністю 7,5 кВт кожний, що забезпечують сумарну встановлену потужність вентиляційної системи 30 кВт.

З метою підвищення безпеки експлуатації стояночного боксу обґрунтовано вибір стаціонарного газоаналізатора ОКСИ 5С та розроблено структуру системи контролю загазованості приміщення. Запропоновано алгоритм автоматичного керування вентиляторами залежно від концентрації оксиду вуглецю, що дозволяє підтримувати нормативну якість повітря та забезпечувати енергоефективний режим роботи вентиляційної установки.

Також розглянуто структурну схему силового каналу системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун» та наведено математичний опис асинхронного електропривода, який використовується для подальшого аналізу статичних і динамічних режимів роботи системи. Проведено дослідження електромеханічних характеристик двигуна при частотному регулюванні швидкості та виконано аналіз втрат потужності за вентиляторного характеру навантаження.

Отримані результати підтвердили доцільність застосування частотного регулювання в системах вентиляції, оскільки воно забезпечує плавне керування продуктивністю, зменшення енергоспоживання та підвищення ефективності роботи електропривода залежно від фактичних умов експлуатації.

### 3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Розрахунок динамічних характеристик асинхронного двигуна

Оскільки параметри схеми заміщення асинхронного двигуна знайдені за допомогою методики, що допускає певну похибку, то для остаточного -перевірки правильності їх знаходження, перевіримо асинхронний двигун в динаміці. Моделювання асинхронного двигуна будемо проводити в абсолютних одиницях, так як сучасні програмні засоби для чисельних обчислень, розрахунків і математичного моделювання, наприклад, MATLAB дозволяють автоматично встановлювати масштаб моделювання незалежно від потужності двигуна або його параметрів.

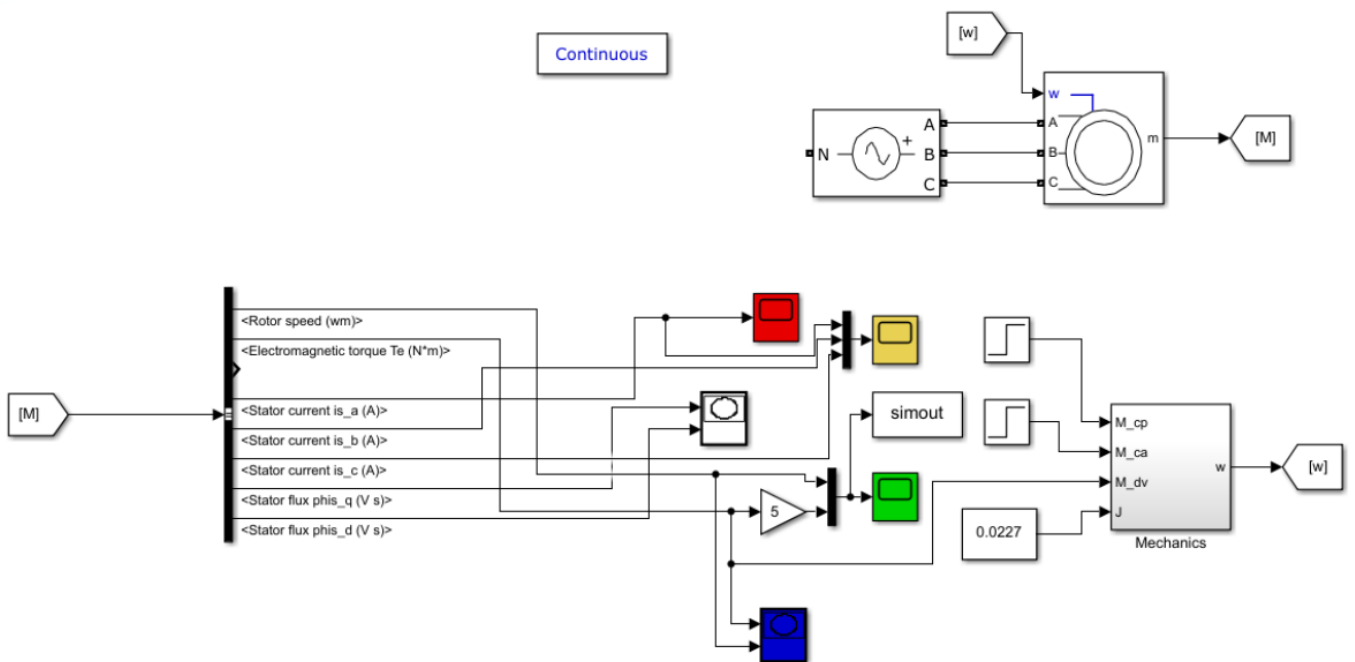


Рисунок 3.1 - Імітаційна модель АД в середовищі MATLAB Simulink.

Рисунок 3.1 демонструє розроблену імітаційну модель асинхронного електродвигуна, реалізовану в середовищі MATLAB Simulink. Побудована модель дозволяє досліджувати електромеханічні процеси, що відбуваються в двигуні, аналізувати його динамічні характеристики та оцінювати вплив різних режимів роботи на параметри електропривода.

Налаштування математичної моделі двигуна здійснюється шляхом введення параметрів його схеми заміщення через спеціальне діалогове вікно програмного блоку. Доступ до цього вікна забезпечується подвійним натисканням лівої кнопки миші на графічному зображенні асинхронного двигуна в моделі. У вікні задаються номінальні параметри машини, електричні характеристики обмоток статора та ротора, механічні параметри, а також додаткові дані, необхідні для коректного відтворення процесів у двигуні.

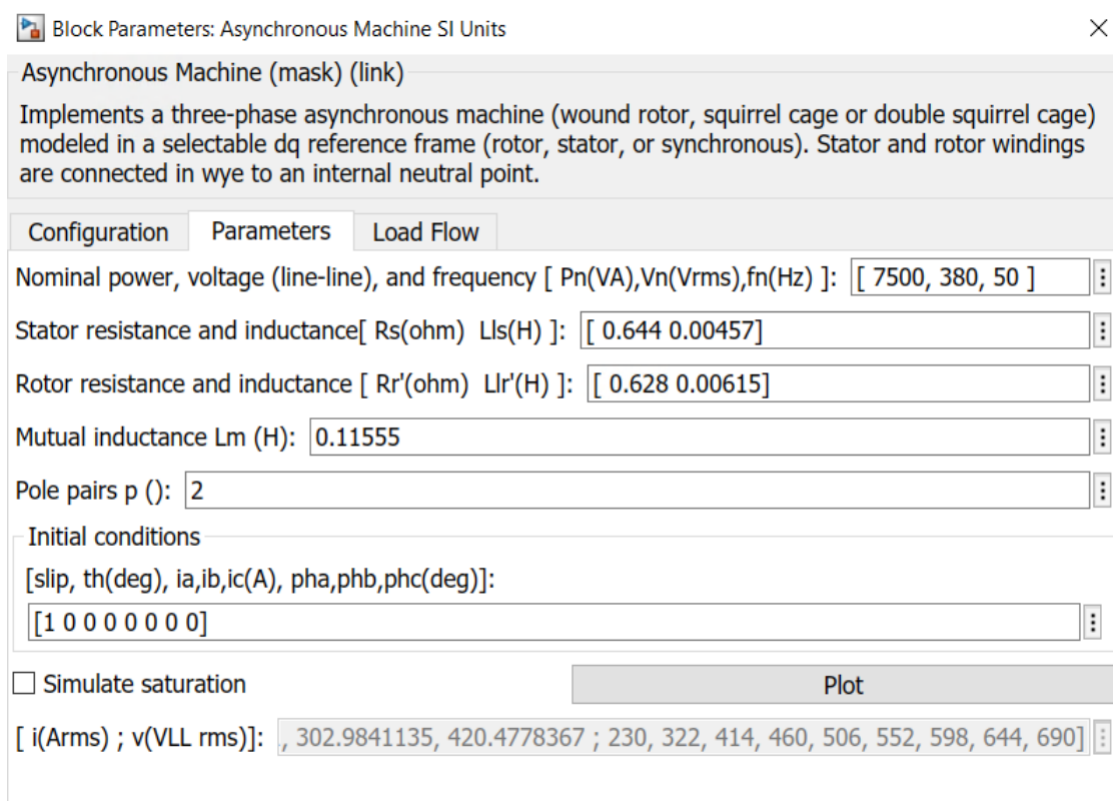


Рисунок 3.2 - Діалогове вікно налаштування параметрів АД

Графіки перехідних процесів швидкості  $w = f(t)$  і моменту  $M = f(t)$  при пуску асинхронного електродвигуна прямим включенням в мережу представлені на рисунку 3.3.

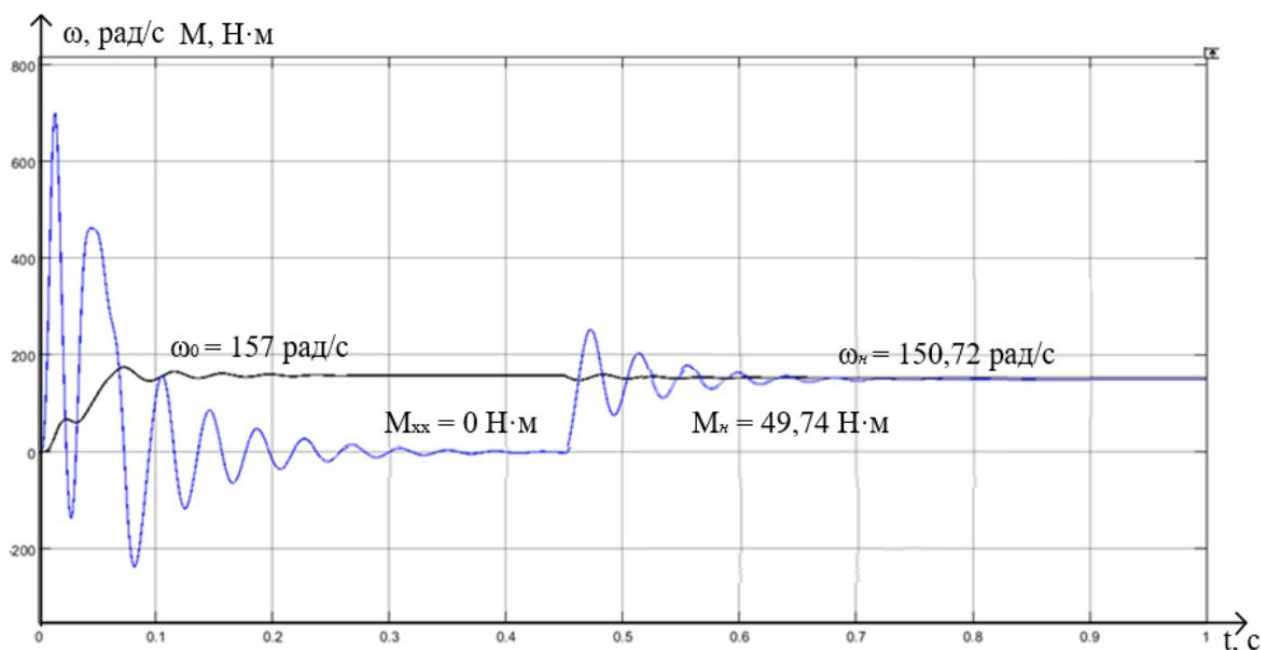


Рисунок 3.3 - Графіки перехідних процесів швидкості  $\omega = f(t)$  і моменту  $M = f(t)$ .

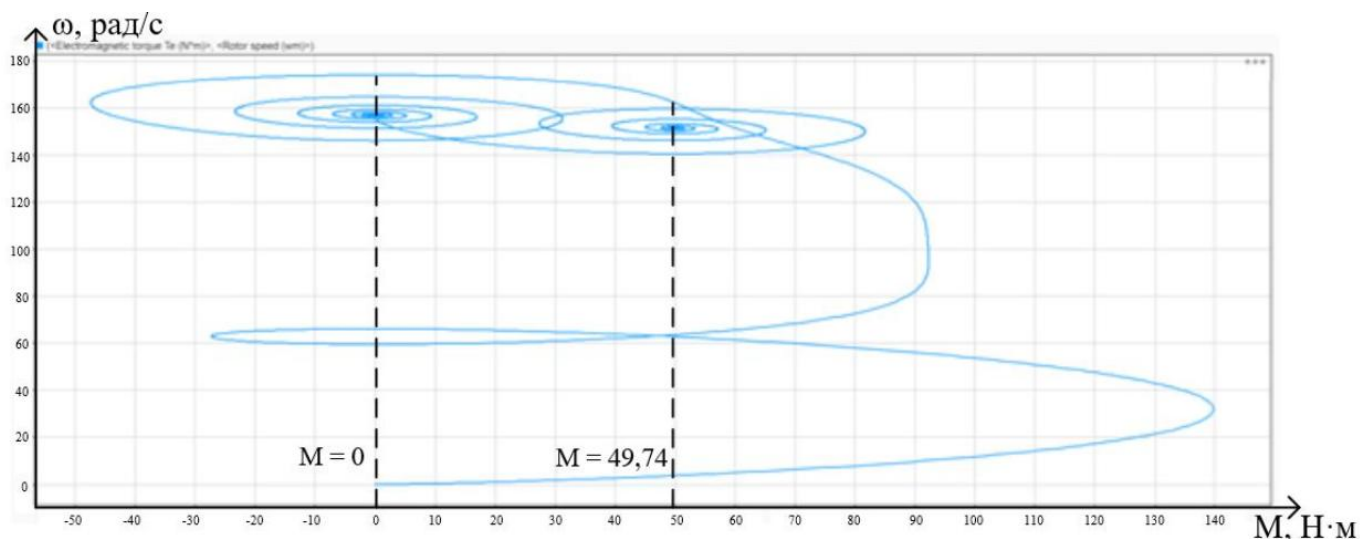


Рисунок 3.4 - Динамічна характеристика прямого пуску двигуна.

Час регулювання  $-t_p = 0,25 \text{ c}$ ,

Встановлене значення швидкості  $\omega_{вст} = 150,72 \text{ рад/с}$

Аналіз графіків показує, що при відпрацюванні перехідних процесів без навантаження (режим ідеального холостого ходу) асинхронний двигун розганяється до синхронної швидкості  $\omega_g = 157 \text{ рад/с}$ , його електромагнітний момент встановився рівним нулю.

У момент часу  $t = 0,45 \text{ с}$  на валу двигуна зроблено навантаження навантаження, рівний номінальному моменту двигуна  $M_c = 49,74 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . При відпрацюванні збурюючого впливу встановлена швидкість двигуна зменшилася до номінальної швидкості  $\omega_n = 150,72 \text{ рад/с}$ , електромагнітний момент у встановленому режимі став рівним статичному моменту на валу двигуна  $M_c = 49,74 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Графіки перехідних процесів струму статора  $I_c = f(t)$ , при пуску асинхронного двигуна без струмообмеження наведені на рисунку 3.5.

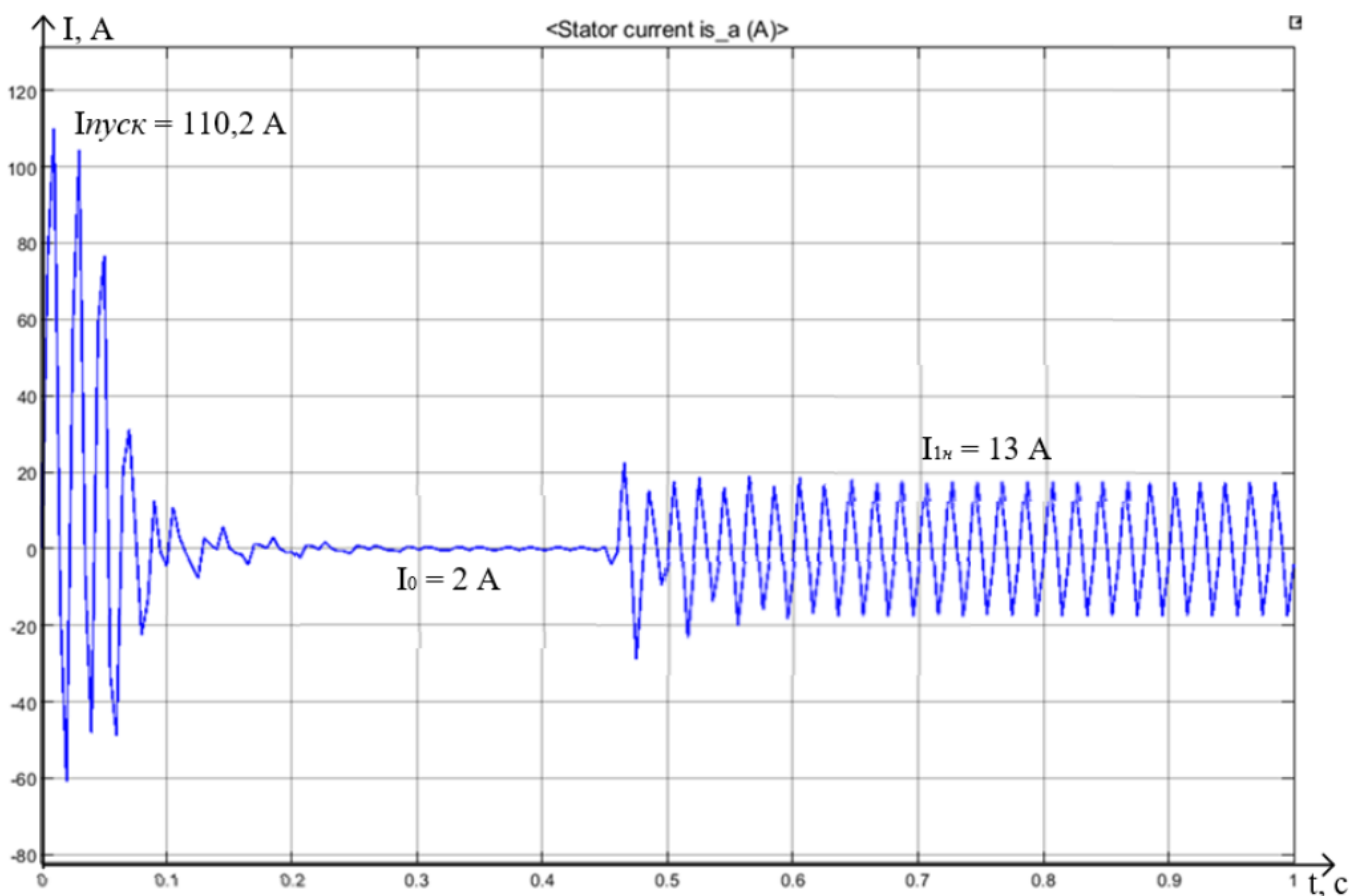


Рисунок 3.5 - Графік перехідних процесів струму статора  $I_c = f(t)$

Пусковий струм асинхронного двигуна, знайдений за результатами розрахунку перехідних процесів, становить:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{I_{\text{пуск},c}}{\sqrt{2}} = \frac{110,2}{\sqrt{2}} = 77,92 \text{ А} \quad (3.1)$$

де  $I_{1_{пуск.с}}$  – амплітудне значення пускового струму статора .

Максимальний струм, що споживається двигуном при прямому пуску

$$I_p = k_t \cdot I_{1C} = 7 \cdot 13 = 91 \text{ A}, \quad (3.2)$$

де

$$k_T = \frac{I_c}{I_{1C}} = 7 \text{ – перевантажувальна здатність асинхронного двигуна по струму};$$

$I_{1C} = 13 \text{ A}$  – номінальний струм обмоток статора асинхронного двигуна .

Розбіжності у визначенні пускового струму пояснюються тим, що імітаційна модель асинхронного двигуна не враховується ефект

витіснення струму на поверхню провідників ротора і насичення зубців ротора, що виникають при пуску.

Номінальний струм статора двигуна, знайдений за результатами розрахунку перехідних процесів:

$$I_{1н} = \frac{I_{1н.с}}{\sqrt{2}} = \frac{13}{\sqrt{2}} = 9.19 \text{ A}, \quad (3.3)$$

де  $I_{1н.с}$  – амплітудне значення номінального струму статора, незначно відрізняється від номінального струму статора ( $I_{1н} = 15,55 \text{ A}$ ) паспортних даних двигуна.

Графіки перехідних процесів струму, швидкості та моменту показали, що асинхронний електродвигун із знайденими параметрами схеми заміщення є стійкою ланкою і ці параметри можна використовувати в подальшому при дослідженні та налаштуванні систем регулювання із застосуванням даного двигуна.

### 3.2 Розробка системи ПЧ-АД

Перетворювач частоти в системі ПЧ-АД дозволяє зменшити витрати на проектування, зменшити знос обладнання. ПЧ змінює частотні характеристики, тим самим плавно регулюється продуктивність вентиляторів.

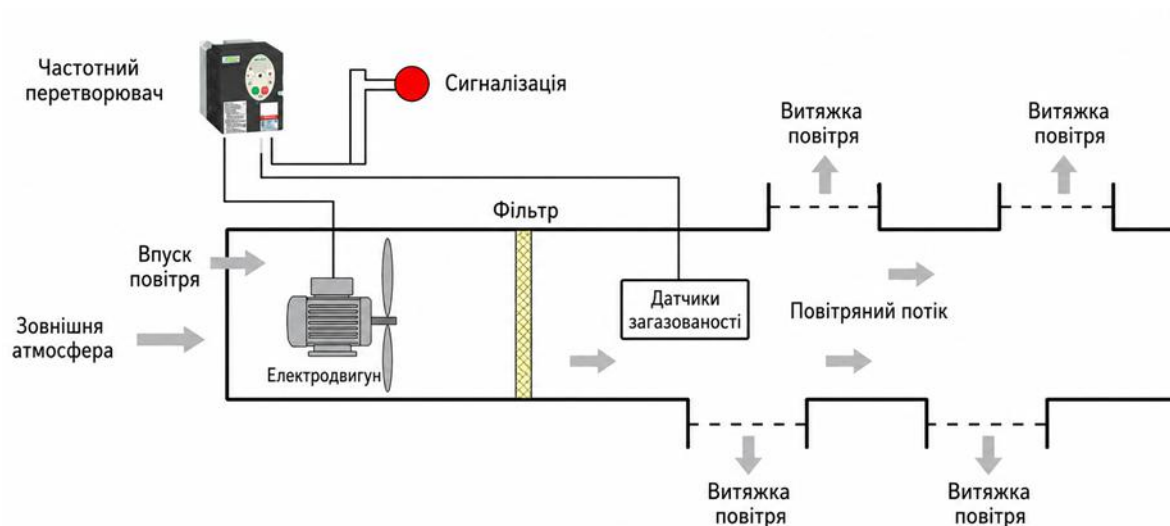


Рисунок 3.6 - Система вентиляції з використанням ПЧ-АД.

У системі управління з ПЧ двигун повинен бути підключений через перетворювач. Приймаючи сигнал від датчиків загазованості, при спрацьовуванні сигналізації про перевищення норми загазованості ПЧ збільшує швидкість обертання вентилятора до 30 Гц. Якщо норма перевищується в 2 рази і більше, то ПЧ збільшує швидкість до 50 Гц, а коли значення знову входить в допустиму межу - знижує її до робочого значення - 20 Гц.

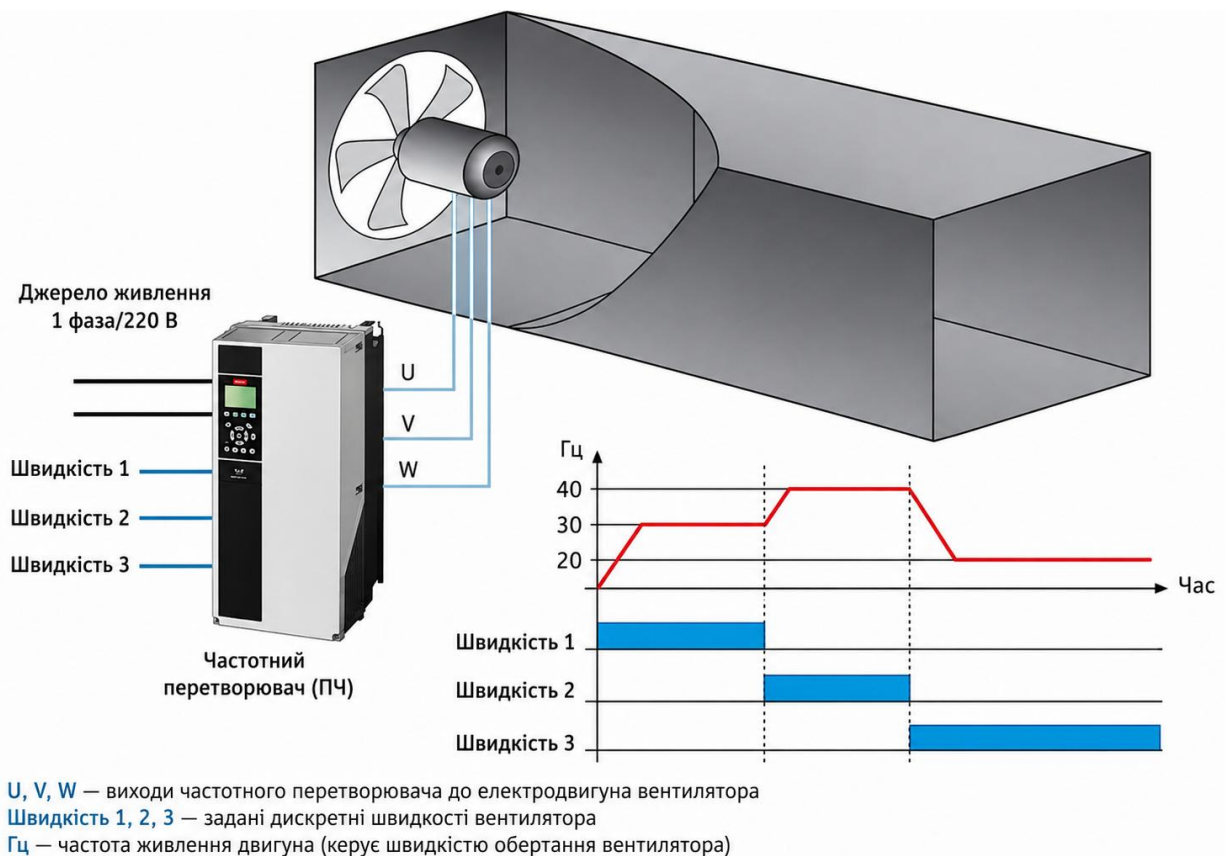


Рисунок 3.7 - Управління вентилятором в системі ПЧ-АД.

Таким чином ЕД буде менше зношуватися, відповідно обладнання рідше відправляється в ремонт. Також за рахунок даної системи відбувається економія електроенергії.

### 3.3 Дослідження перехідних процесів швидкості та електромагнітного моменту електропривода вентиляційної установки

Для оцінювання динамічних характеристик електропривода вентиляційної установки було проведено моделювання системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун» у середовищі MATLAB Simulink. Основною метою дослідження є аналіз процесів розгону та гальмування двигуна при вентиляторному характері навантаження, а також визначення впливу параметрів системи керування на якість перехідних процесів.

На основі функціональної схеми електропривода, наведеної на рисунку 3.8, розроблено імітаційну модель системи частотного керування асинхронним двигуном.

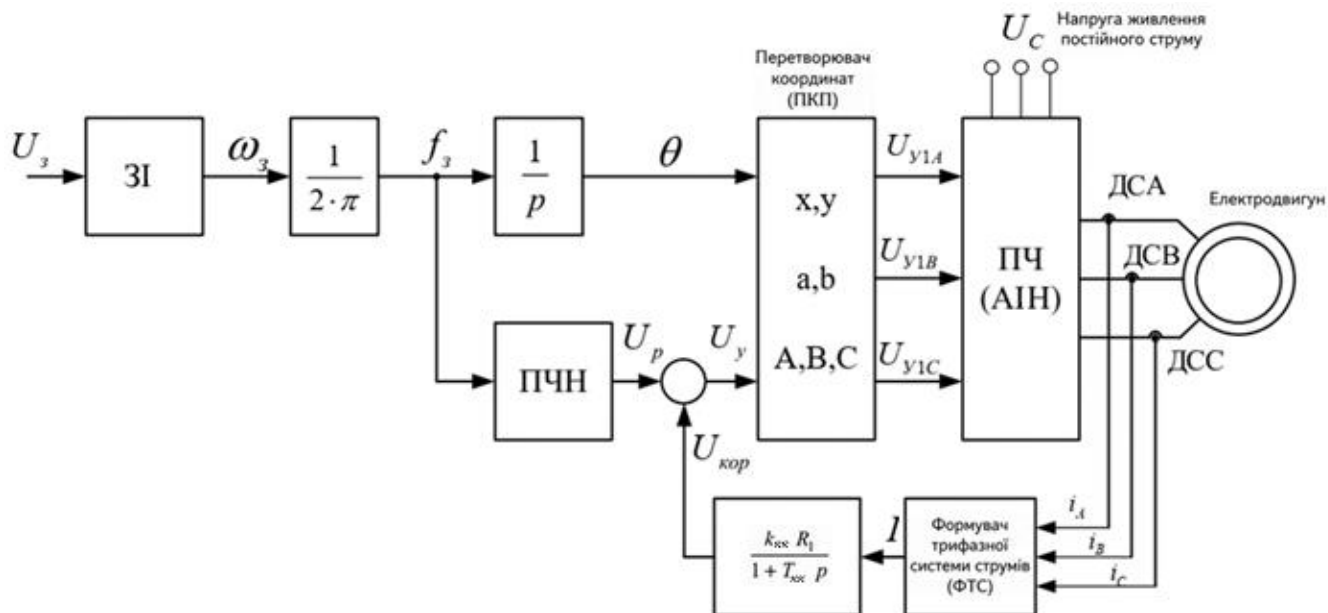


Рисунок 3.8 – Структурна схема системи скалярного частотного керування асинхронним двигуном з IR-компенсацією

У розглянутій системі формування закону зміни швидкості виконує задавач інтенсивності (3I), який визначає темп розгону та гальмування електропривода. При дистанційному керуванні вхідним сигналом є задаюча напруга ( $U_3$ ), якій відповідає необхідна частота живлення двигуна. У режимі місцевого керування запуск та зупинка двигуна здійснюються безпосередньо з панелі частотного перетворювача.

Блок перетворення частоти в напругу формує необхідну залежність між частотою та амплітудою вихідної напруги відповідно до прийнятого закону скалярного регулювання. Підтримання співвідношення ( $U/f$ ) забезпечує практично сталий магнітний потік машини в усьому діапазоні регулювання швидкості.

При використанні IR-компенсації сигнал керування визначається як сума основного сигналу регулювання та сигналу позитивного зворотного зв'язку за струмом:

$$U_y = U_p + U_{\text{кор}} = U_p + k_{\text{кк}} R_1 I \quad (3.4)$$

Сформований сигнал надходить на вхід прямого координатного перетворювача, який генерує три синусоїдальні сигнали керування, зміщені один відносно одного на кут ( $120^\circ$ ). Надалі ці сигнали використовуються автономним інвертором напруги для формування трифазної системи напруг живлення двигуна.

Для побудови моделі була використана апроксимація характеристики скалярного керування залежністю  $U_{1\phi} = 0,0046 f^2$ .

Зазначена характеристика реалізована у блоці ПЧН за допомогою набору контрольних точок при значеннях частоти 5, 10, 15, 20, 35 та 50 Гц.

Автономний інвертор напруги у моделі представлений аперіодичною ланкою першого порядку з передавальною функцією

$$W_i(p) = \frac{k_i}{T_i p + 1} = \frac{1}{0.0002 p + 1} \quad (3.5)$$

де  $k_i$  - коефіцієнт передачі інвертора;

Постійна часу інвертора визначається за виразом

$$T_i = \frac{1}{f_{\text{нч}}} = \frac{1}{5000} = 0.0002 \quad (3.5)$$

де  $f_{\text{нч}} = 5000$  Гц - несуча частота інвертора.

Зворотній зв'язок за струмом також описується аперіодичною ланкою:

$$W_{\text{кк}}(p) = \frac{k_{\text{кк}}}{T_{\text{кк}} p + 1} = \frac{0.1}{0.02 p + 1} \quad (3.6)$$

де  $k_{кк}$  - коефіцієнт позитивного зворотного зв'язку по струму, прийmemo  $k_{км} = 0,1$ ;

$T_{кк} = 0,02$  – час затримки вимірювання струму.

Побудовані імітаційні моделі окремих блоків системи наведені на рисунках 3.9–3.13.

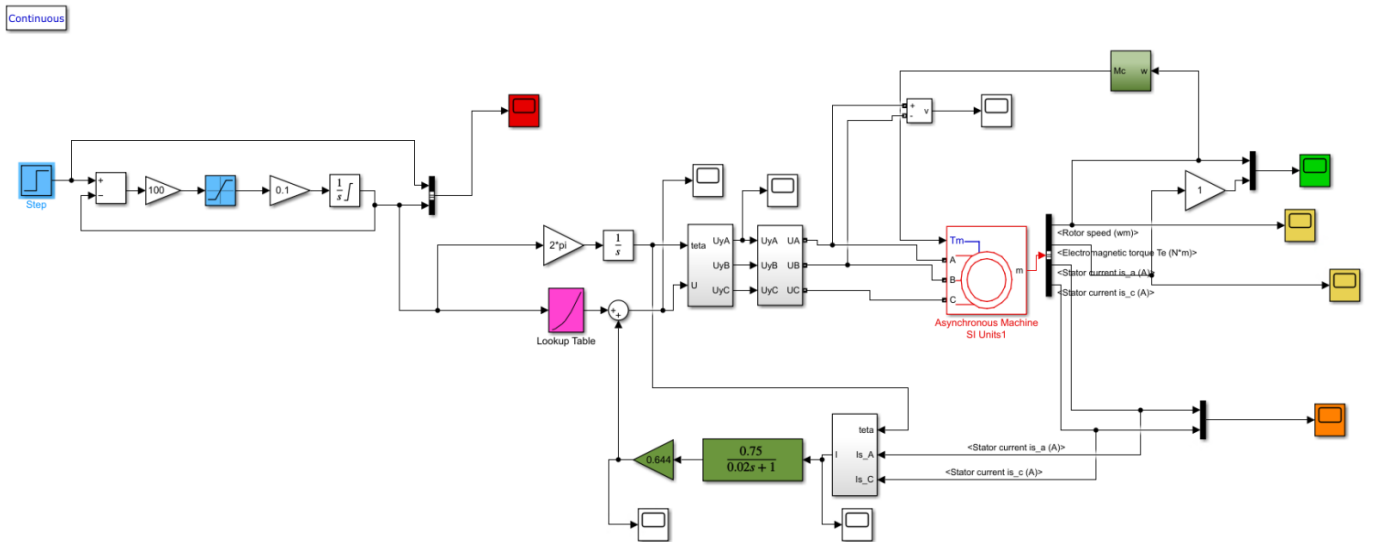


Рисунок 3.9 - Імітаційна модель електропривода вентиляційної установки з частотним регулюванням

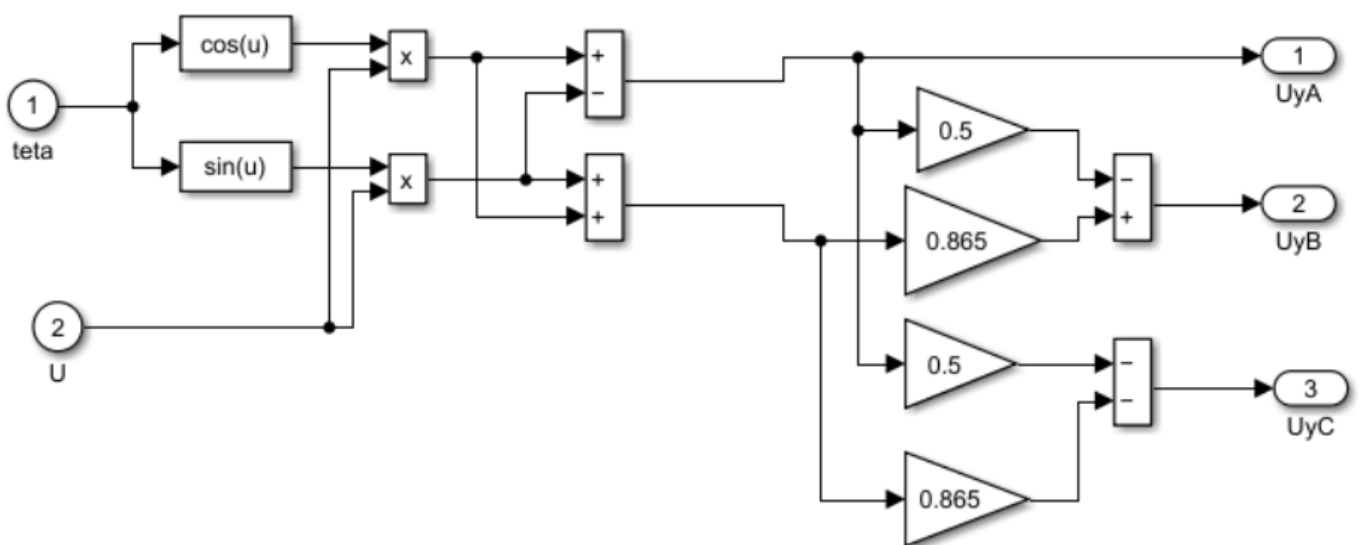


Рисунок 3.10 - Модель прямого координатного перетворення керуючих сигналів

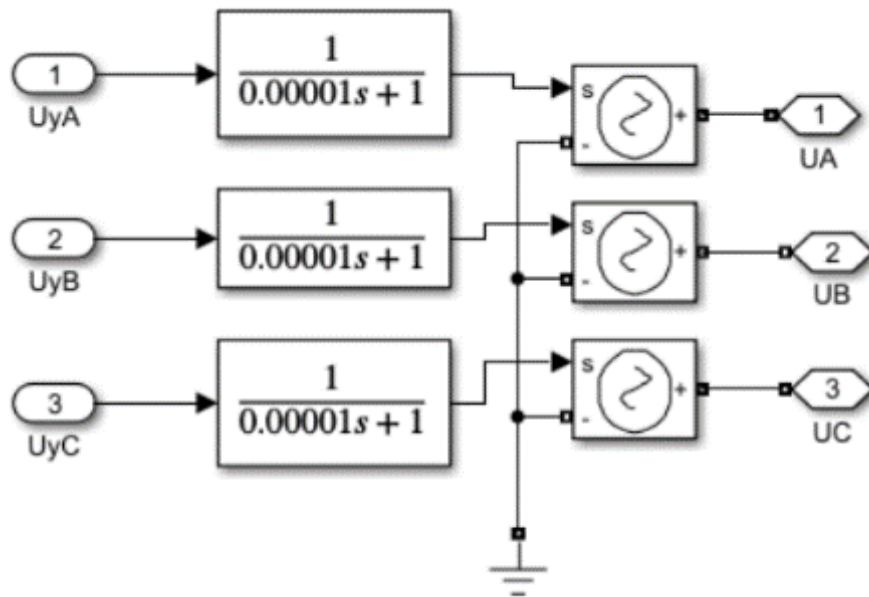


Рисунок 3.11 - Модель АІН

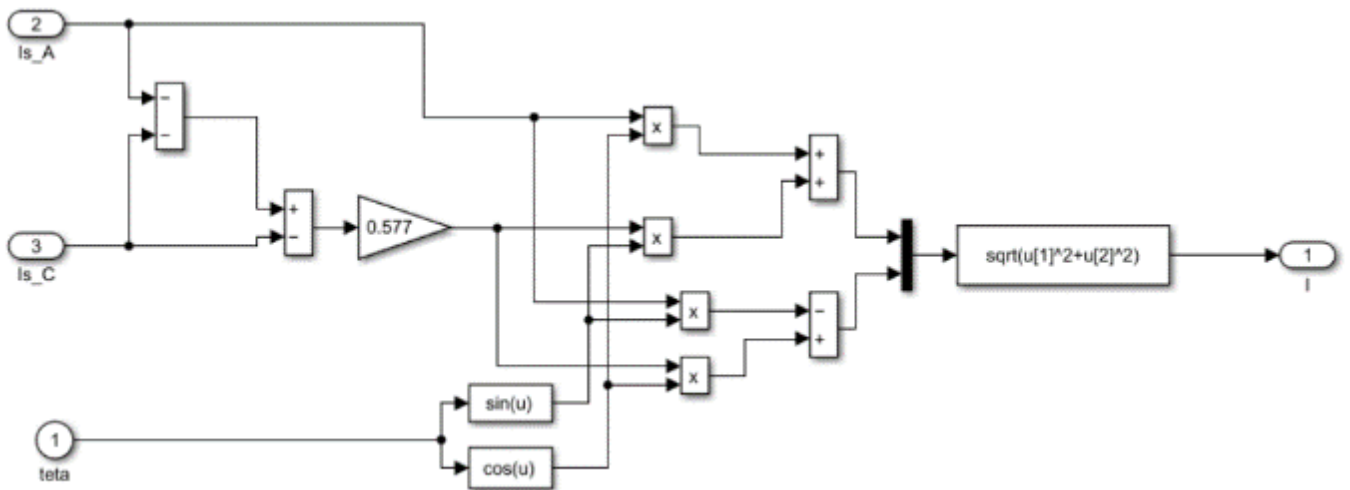


Рисунок 3.12 - Модель зворотнього координатного перетворювача струмів

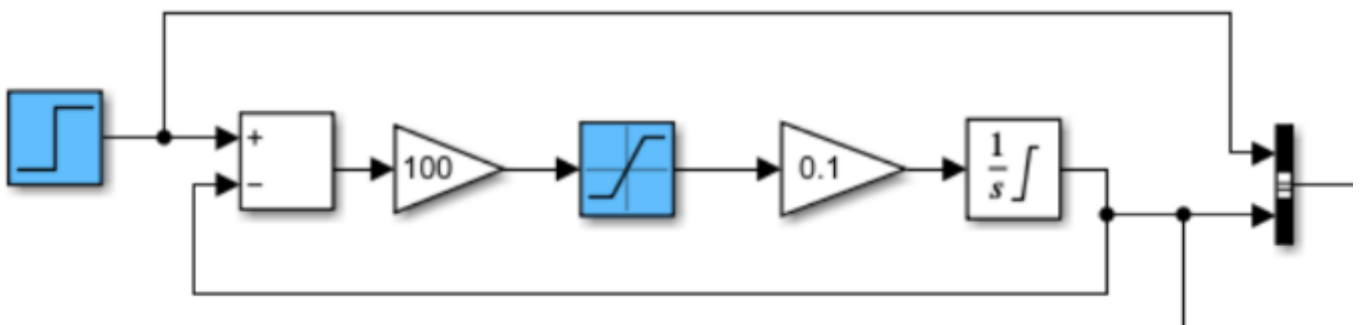


Рисунок 3.13 - Імітаційна модель задавача інтенсивності розгону

На вході системи встановлено задавач інтенсивності із постійною часу  $T_{zi} = 10$  с. Його використання дозволяє обмежити пускові струми та електромагнітний момент двигуна, що позитивно впливає на надійність роботи електропривода та механічного обладнання вентиляційної установки.

За результатами моделювання були отримані перехідні характеристики швидкості ротора та електромагнітного моменту для різних значень коефіцієнта IR-компенсації та різних режимів зміни частоти живлення. отримані на графіки, представлені на рисунках 3.14-3.19

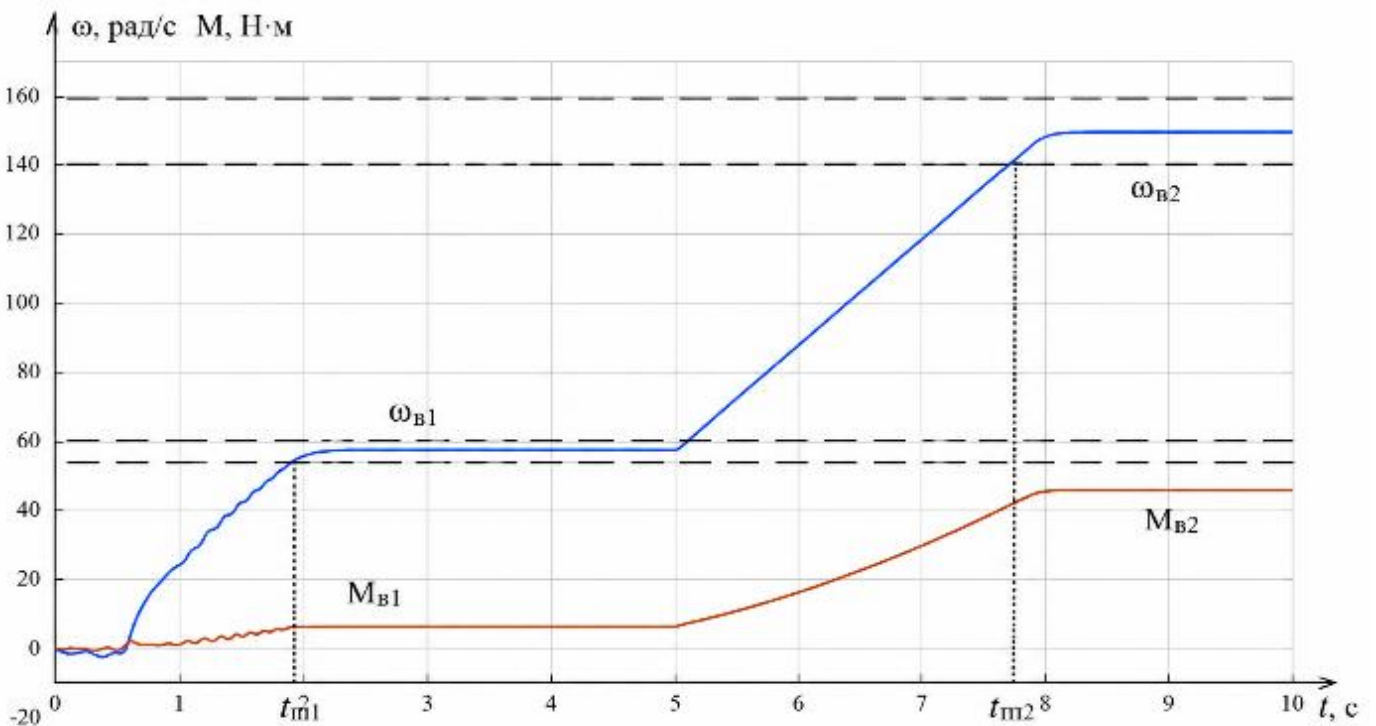


Рисунок 3.14 – Графік перехідних процесів  $\omega = f(t)$  при збільшенні частоти з 20 до 50 Гц і  $k_{kk} = 0,75$

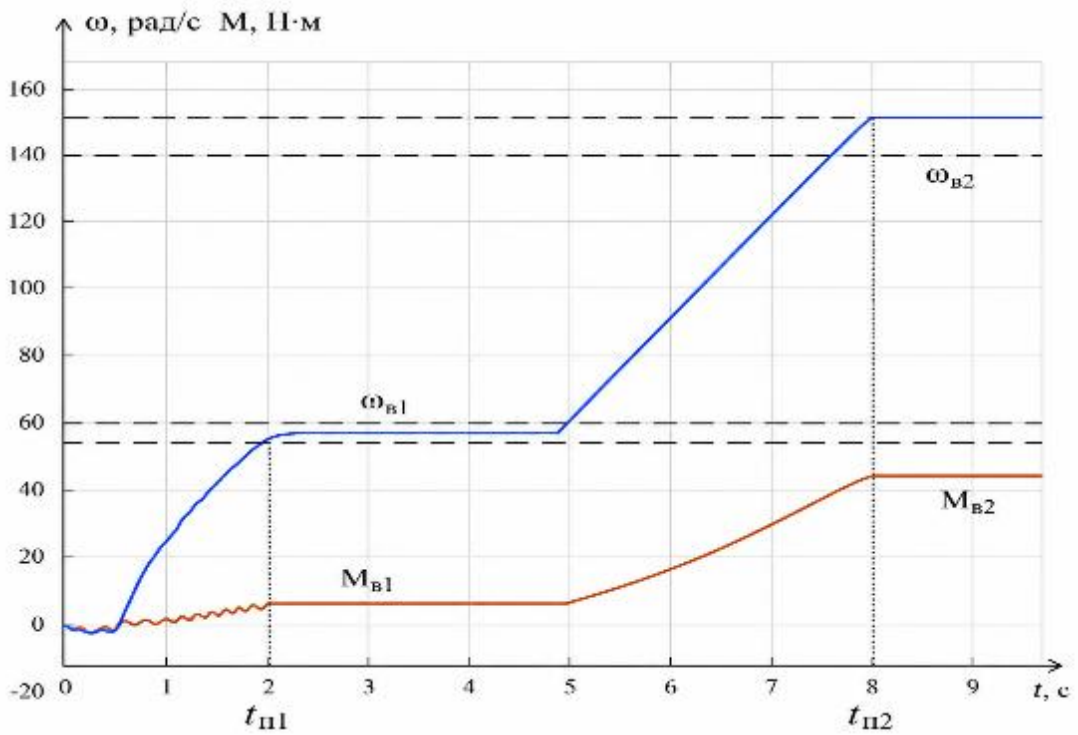


Рисунок 3.15 – Графік перехідних процесів  $\omega = f(t)$  при збільшенні частоти з 20 до 50 Гц і  $k_{kk} = 0,5$

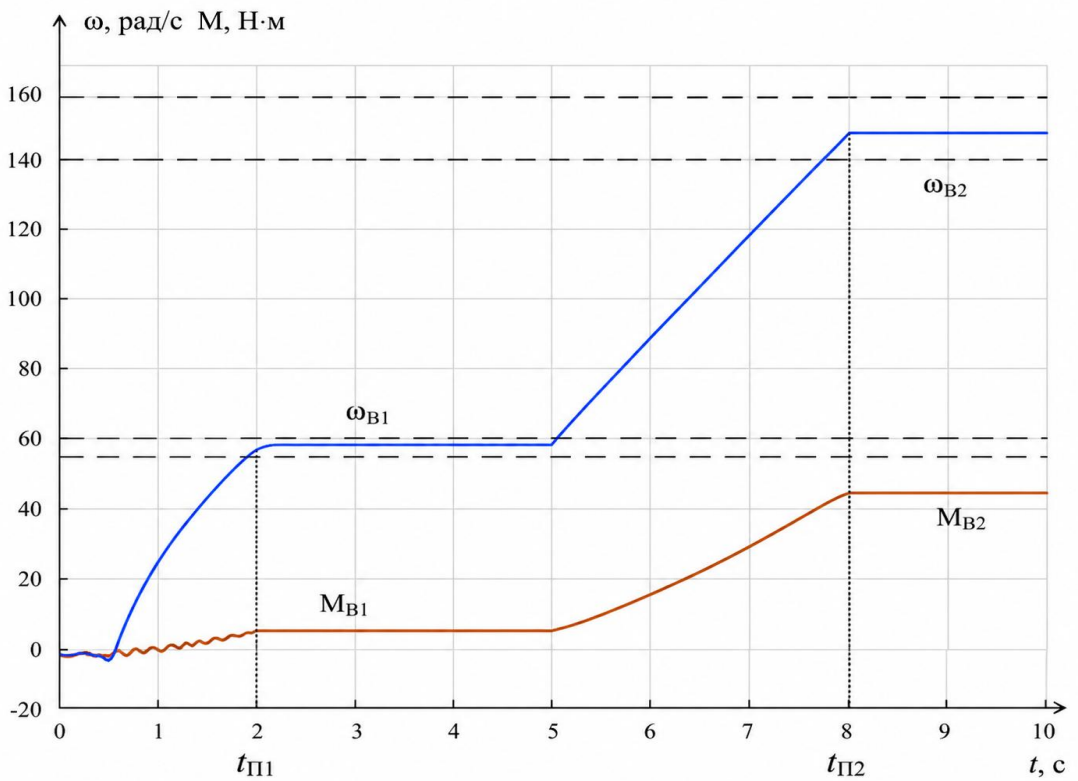


Рисунок 3.16 – Графік перехідних процесів  $\omega = f(t)$  при збільшенні частоти з 20 до 50 Гц і  $k_{kk} = 0,15$

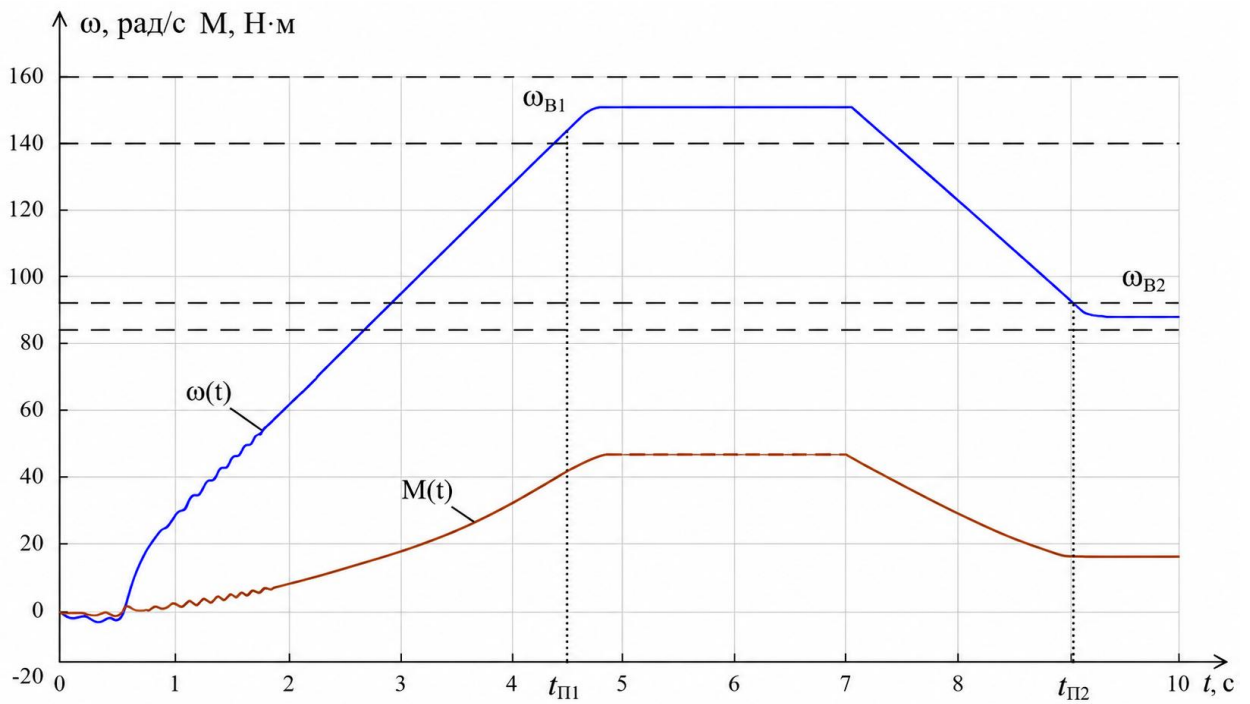


Рисунок 3.17 – Графік перехідних процесів  $\omega = f(t)$  при зменшенні частоти з 50 до 30 Гц і  $k_{kk} = 0,75$

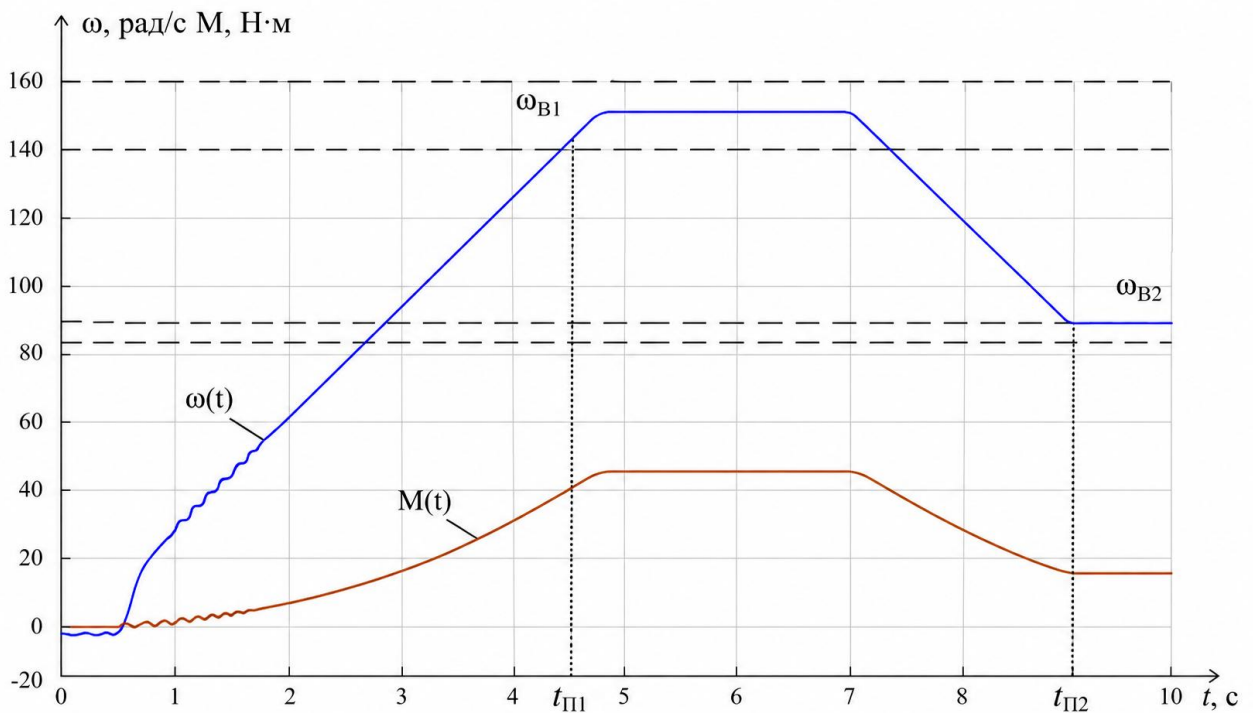


Рисунок 3.18 – Графік перехідних процесів  $\omega = f(t)$  при зменшенні частоти з 50 до 30 Гц і  $k_{kk} = 0,5$

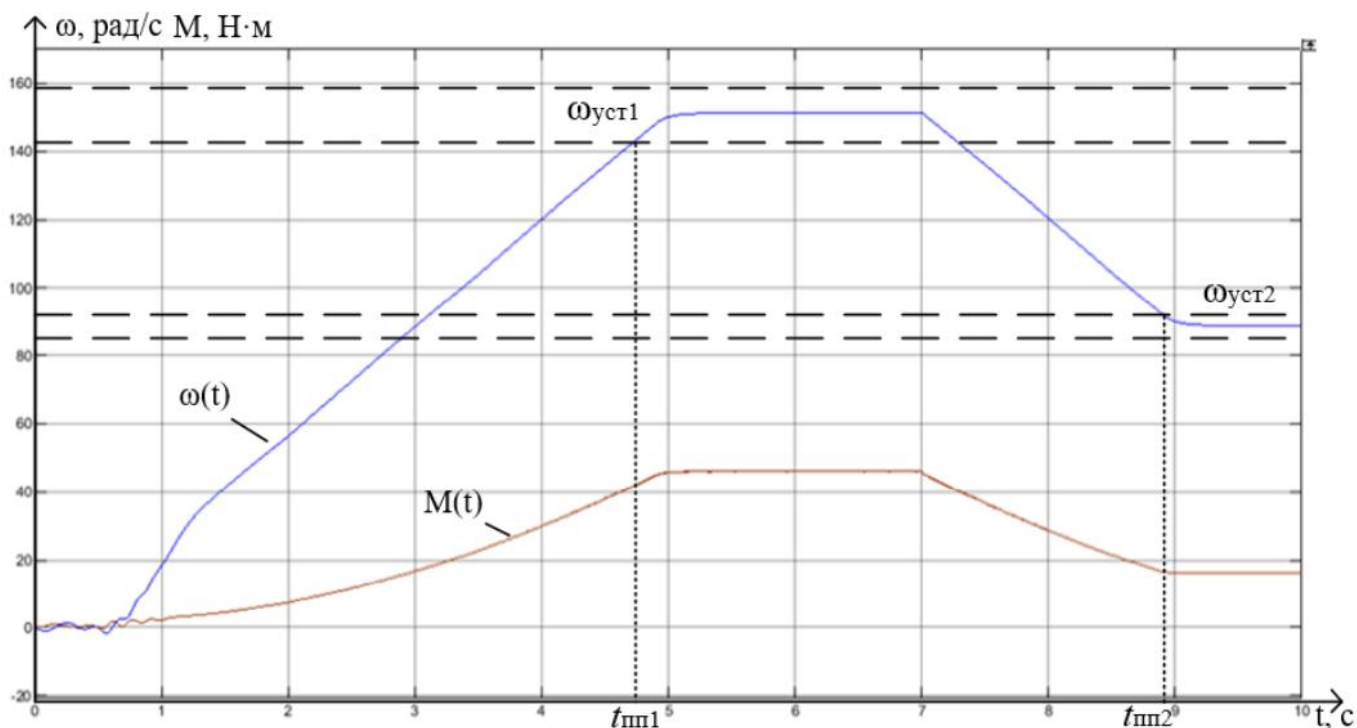


Рисунок 3.19 – Графік перехідних процесів  $\omega = f(t)$  при зменшенні частоти з 50 до 30 Гц і  $k_{\text{кк}} = 0,15$

Аналіз перехідних процесів показав, що при запуску системи автоматичної вентиляції на частоті 20 Гц і збільшенні частоти з 20 до 50 Гц і  $k_{\text{кк}} = 0,75$  час перехідного процесу становить  $t_{\text{пп1}} = 1,91$  с і  $t_{\text{пп2}} = 7,7$  с

При запуску системи вентиляції на частоті 20 Гц і збільшенні частоти з 20 до 50 Гц і  $k_{\text{кк}} = 0,5$  час перехідного процесу становить  $t_{\text{пп1}} = 1,94$  с і  $t_{\text{пп2}} = 7,75$  с.

З 20 Гц на 50 Гц,  $k_{\text{кк}} = 0,15$  час перехідного процесу становить  $t_{\text{пп1}} = 1,98$  с і  $t_{\text{пп2}} = 7,78$  с. При зменшенні частоти з 50 до 30 Гц і  $k_{\text{кк}} = 0,75$  час перехідного процесу становить  $t_{\text{пп1}} = 4,65$  с і  $t_{\text{пп2}} = 8,94$  с. При зменшенні частоти з 50 до 30 Гц і  $k_{\text{кк}} = 0,5$  час перехідного процесу становить  $t_{\text{пп1}} = 4,68$  с і  $t_{\text{пп2}} = 8,98$  с. При зменшенні частоти з 50 до 30 Гц і  $k_{\text{кк}} = 0,15$  час перехідного процесу становить  $t_{\text{пп1}} = 4,68$  с і  $t_{\text{пп2}} = 8,97$  с

Таким чином, найменший час перехідного процесу становить  $t_{\text{пп1}} = 0,75$ , але присутні незначні коливання моменту. При зменшенні  $k_{\text{кк}}$  час перехідного процесу

збільшується, а коливання моменту залишаються, що видно на графіках перехідних процесів. Таким чином для даної системи необхідно прийняти  $k_{\text{кк}} = 0,75$ .

### 3.4 Висновки до розділу

У даному розділі виконано дослідження динамічних характеристик асинхронного електродвигуна та розроблено імітаційну модель частотно-регульованого електропривода вентиляційної установки в середовищі MATLAB Simulink. За результатами моделювання підтверджено правильність визначення параметрів схеми заміщення двигуна та доведено його стійку роботу в різних режимах навантаження.

Проведений аналіз процесів прямого пуску показав характер зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора, що дозволило оцінити динамічні властивості електропривода. Отримані результати підтвердили відповідність параметрів моделі паспортним даним двигуна та можливість її використання для подальших досліджень систем автоматичного керування.

Розроблено систему керування на базі перетворювача частоти, яка забезпечує автоматичну зміну швидкості обертання вентиляторів залежно від рівня загазованості приміщення. Використання частотного регулювання дозволяє зменшити пускові струми, знизити механічні навантаження на обладнання та підвищити енергоефективність роботи вентиляційної установки.

У процесі моделювання досліджено перехідні процеси електропривода при зміні частоти живлення та різних значеннях коефіцієнта IR-компенсації. Аналіз отриманих характеристик показав, що найкращі показники швидкодії системи досягаються при значенні коефіцієнта компенсації  $k_{\text{кк}} = 0,75$ . За цього значення забезпечується мінімальний час перехідного процесу при допустимому рівні коливань електромагнітного моменту.

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

### **4.1. Значення охорони праці для забезпечення безпеки праці при роботі з автоматизованими системами**

Охорона праці в контексті роботи з автоматизованими системами відіграє критичну роль у забезпеченні безпеки та здоров'я працівників. Значення охорони праці в цьому контексті може бути розглянуте з кількох ключових точок зору.

Запобігання травмам та аваріям. Охорона праці спрямована на визначення потенційних ризиків, пов'язаних із використанням автоматизованих систем, та впровадження ефективних заходів для їхнього попередження. Автоматизовані системи можуть включати роботи з високою швидкістю, роботи у високотехнологічних середовищах чи з великими електричними потужностями, тож охорона праці важлива для мінімізації травм та аварій. [13]

Визначення і регулювання ергономіки. Оцінка та належна настройка автоматизованих систем допомагає підтримувати ергономічні стандарти для працівників, уникнення непотрібних фізичних навантажень та запобігання захворюванням, пов'язаним з роботою.

Навчання та підготовка працівників. Охорона праці передбачає надання належного навчання та підготовки працівників, які взаємодіють з автоматизованими системами. Це включає у себе навички безпеки, розуміння ризиків та ефективні методи взаємодії з технологією.

Забезпечення безпеки взаємодії з людьми. Деякі автоматизовані системи можуть включати спільну роботу з людьми. Охорона праці визначає необхідність створення безпечних та ефективних механізмів взаємодії між людьми та автоматизованими системами, включаючи визначення безпечних зон та дотримання стандартів безпеки.

Моніторинг здоров'я працівників. Охорона праці включає в себе системи моніторингу здоров'я працівників, які можуть виявити можливі впливи автоматизованих систем на фізичне і психологічне здоров'я.

Перелік дій при виникненні небезпечних ситуацій. Забезпечення ефективних процедур евакуації та заходів безпеки в екстрених ситуаціях, таких як аварійна зупинка автоматизованих систем або реакція на витік інформації, є важливою частиною охорони праці.

Психосоціальна безпека. Охорона праці також ставить завдання забезпечення психосоціальної безпеки працівників, уникнення стресу та психологічних перевантажень, пов'язаних з використанням та обслуговуванням автоматизованих систем.

Загальною метою охорони праці в контексті автоматизованих систем є створення найбезпечніших і ефективних умов праці для працівників, щоб забезпечити їхнє здоров'я та безпеку в робочому середовищі.

#### **4.2 Основні вимоги до електробезпеки під час роботи з автоматизованими системами**

Сучасні системи розумного будинку вимагають дотримання певних правил безпеки під час монтажу та експлуатації системи. Дотримання правил електробезпеки в розумних будинках є важливим аспектом, оскільки вони визначають стандарти та процедури, які забезпечують безпечну експлуатацію та функціонування систем автоматизації та електроприладів. Нижче представлені ключові аспекти важливості дотримання правил електробезпеки в розумних будинках:

- захист життя та здоров'я: відповідність електробезпеці гарантує захист від електричних ударів, пожеж та інших небезпек, що можуть виникнути при використанні розумних пристроїв та систем.

- забезпечення стабільності мережі: справне виконання електромонтажу та дотримання електробезпеки сприяє стабільному живленню та уникненню перебоїв у роботі систем розумного будинку.

- зменшення ризику пожеж: електричні пристрої та системи розумного будинку можуть бути джерелом пожеж, і відповідність електробезпеці допомагає уникнути пожеж та забезпечити безпеку життя та майна.

Загальною метою дотримання правил електробезпеки в розумних будинках є забезпечення безпеки, надійності та ефективності їхнього функціонування, а також захист життя та здоров'я користувачів і людей що обслуговують системи розумного будинку.

- заземлення та ізоляція: заземлення електричних пристроїв в розумному будинку є запобіжним заходом, що виводить надлишковий струм в землю, уникнення електричних ударів та створення небезпеки. Забезпечення належної ізоляції, особливо в умовах вологості, допомагає уникнути коротких замикань та підтримує стійкість електричних систем.

- стандарти електромонтажу: дотримання стандартів електромонтажу гарантує правильне підключення та розташування електрообладнання, забезпечуючи безпеку в експлуатації. Це включає в себе правильне використання кабелів, розеток та вимикачів згідно з встановленими вимогами.

- захист від перевантажень та коротких замикань: автоматичні вимикачі та пристрої захисту від перевантажень є важливими для уникнення надмірного струму та попередження пожеж. Ці пристрої автоматично відключають живлення, якщо вони виявляють надмірні електричні навантаження або короткі замикання, забезпечуючи безпеку системи.

- безпека роботи з батареями та акумуляторами: в системах розумного будинку часто використовується пристрої оснащені батареями, тому необхідно забезпечити правильне обслуговування та використання батарей та акумуляторів, що допоможе уникнути перевантажень, нагрівання та потенційних пожеж. Важливо

дотримуватися інструкцій щодо їхньої експлуатації та уникати механічних пошкоджень.

- електрична безпека вологих приміщень: у вологих зонах розумного будинку, таких як ванна кімната чи кухня, необхідно використовувати електричні пристрої та розетки, які мають відповідний ступінь вологозахисту. Це допомагає уникнути коротких замикань та електричних ударів, пов'язаних із збільшеним ризиком взаємодії з водою.

- безпека роботи з високовольтною технікою: працівники, які взаємодіють з високовольтними системами, повинні мати високий рівень кваліфікації та навчання. Застосування заходів безпеки, таких як використання ізольованих інструментів та захисного одягу, є важливим для запобігання нещасних випадків.

- ізоляція датчиків та сенсорів: забезпечення ефективної ізоляції датчиків та сенсорів у розумному будинку має важливе значення для попередження електричних випромінювань та збереження їхньої надійної роботи.

#### **4.3 Перелік дій при виникненні небезпечних ситуацій під час роботи з автоматизованими системами**

Виникнення небезпечних ситуацій в автоматизованих системах вимагає негайних та добре організованих заходів для забезпечення безпеки. Автоматизовані системи стрімко розвиваються та стають безпечнішими для людини, все ж імовірність виникнення небезпечних ситуацій не виключена. Нижче подано перелік дій, який потрібно зробити при виникненні небезпечних ситуацій.

Аварійна зупинка системи. При виникненні небезпечних ситуацій в автоматизованих системах однією з перших кроків повинно бути негайне введення аварійної зупинки системи. Ця дія призначена для припинення всіх робочих процесів та зменшення можливих наслідків аварії. При введенні аварійної зупинки системи важливо, щоб це відбувалося відразу, без затримок, щоб максимально ефективно запобігти подальшому розгортанню небезпечної ситуації. Під час цієї дії

слід враховувати інструкції та навчання персоналу, які стосуються процедур аварійної зупинки, щоб уникнути помилок або затримок.

Вимкнення живлення. В разі виникнення небезпечних ситуацій важливо припинити живлення автоматизованої системи. Відключення живлення є ефективним засобом запобігання небезпекам, особливо якщо причиною проблеми є електричний збій або перешкоди у роботі системи живлення. Персонал повинен бути навчений виконувати цю дію швидко та вірно, дотримуючись встановлених процедур та заходів безпеки. Додатково, слід враховувати можливі наслідки відключення живлення, такі як можливість втрати даних або несправностей у системі.

Відокремлення від мережі зв'язку. При виникненні аварійної ситуації важливо негайно відокремити автоматизовану систему від мережі зв'язку. Це допоможе запобігти небажаній передачі інформації або команд, які можуть погіршити ситуацію. Встановлення ефективної системи відокремлення та ізоляції може включати в себе використання фізичних або програмних бар'єрів, які гарантують безпеку та надійність цих процесів.

Повідомлення про подію. Під час аварійної ситуації важливо вчасно та ефективно повідомити відповідальні служби, регуляторів та персонал про виникнення небезпечної ситуації та прийняті заходи. Забезпечення чіткої комунікації сприяє управлінню ситуацією та допомагає залучити необхідні ресурси для подолання проблеми.

Евакуація персоналу. У випадку небезпечної ситуації важливо вчасно та організовано провести евакуацію персоналу. Працівники повинні бути навчені процедурам евакуації та місцям збору, а також взаємодії з евакуаційними шляхами та засобами захисту. Ефективна евакуація може допомогти уникнути травм та максимально зменшити ризики для життя персоналу.

Виклик служб аварійної допомоги. В разі виникнення небезпечної ситуації слід негайно викликати служби аварійної допомоги, такі як пожежна охорона чи медична допомога. Швидка реакція служб допомоги може бути вирішальною для

мінімізації збитків та забезпечення безпеки персоналу та оточуючого середовища. Ключовим елементом є належна комунікація та співпраця з екстреними службами для ефективного управління ситуацією.

Надання допомоги постраждалим. У випадку аварійної ситуації важливо забезпечити негайну медичну допомогу та психологічну підтримку постраждалим. Це може включати евакуацію для отримання медичної допомоги, а також забезпечення допомоги для подолання психологічних наслідків події.

Після проведення необхідних дій, що спрямовані на локалізацію та усунення небезпечної ситуації необхідно провести ретельний аналіз причин її виникнення, щоб мінімізувати можливість її виникнення в майбутньому.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра проведено аналіз існуючих систем вентиляції паркінгів та особливостей утворення шкідливих викидів автомобільного транспорту. На підставі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність застосування автоматизованої вентиляційної системи з частотно-регульованим асинхронним електроприводом та системою контролю загазованості.

Виконано розрахунок необхідної продуктивності вентиляційної установки та визначено потужність приводних електродвигунів. Для реалізації системи обрано чотири асинхронні електродвигуни типу AIP132S4 потужністю 7,5 кВт кожний. Виконано вибір газоаналізатора ОКСИ 5С та розроблено структуру системи контролю концентрації оксиду вуглецю з автоматичним регулюванням продуктивності вентиляції залежно від рівня загазованості приміщення. Також проведено аналіз статичних характеристик системи ПЧ – АД та досліджено вплив частотного регулювання на енергетичні показники електропривода.

Розроблено математичну та імітаційну модель асинхронного електропривода в середовищі MATLAB Simulink. Проведено дослідження динамічних режимів роботи двигуна, отримано перехідні процеси швидкості, моменту та струму статора, що підтвердили працездатність і стійкість розробленої системи. Виконано моделювання частотно-регульованого електропривода вентиляційної установки та досліджено вплив коефіцієнта IR-компенсації на якість перехідних процесів. Встановлено, що оптимальним для даної системи є значення коефіцієнта компенсації  $k_{\text{кк}} = 0,75$ , при якому забезпечуються найкращі показники швидкодії.

Результати виконаної роботи підтвердили ефективність використання частотно-регульованого асинхронного електропривода в системах вентиляції стояночних боксів. Запропоноване технічне рішення забезпечує автоматичне підтримання нормативних параметрів повітряного середовища, зменшення споживання електричної енергії, зниження механічних навантажень на обладнання та підвищення надійності роботи вентиляційної установки.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. G. Baoming, A. de Almeida and F. J. Ferreira, “Design of Transverse Flux Linear Switched Reluctance Motor,” IEEE Transaction on Magnetics, vol. 45, no. No. 1, pp. 113-119, January 2009.
2. Lin F.J., Wai R.J. Robust recurrent fuzzy neural network control for linear synchronous motor drive system. Neurocomputing. – 2003. – Т. 50. Рр. 365-390.
3. Скочиляс, О. І., & Буняк, О. А. (2025). Аналіз функціонування захистів асинхронних двигунів. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 59-59.
4. Буняк О. А. Електричні машини : Навчальний посібник /. — Тернопіль : ФОП Паляниця В.А. , 2023 — 324 с.
5. A. D. Almeida, J. Fong, C. Brunner, R. Werle and M. V. Werkhoven, “New technology trends and policy needs in energy efficient motor systems - A major opportunity for energy and carbon savings,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 115, 2019.
6. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М.Куценко, В.Ф.Яковлев та ін.–К.: Аграрна освіта, 2013. –449 с..
7. АНДРІЙЧУК, В., НАКОНЕЧНИЙ, М., ФІЛЮК, Я., КОСТИК, Л., & КОЗАК, І. (2023). Електропривід рухомої опромінювальної установки. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences, 329(6), 44-48.
8. J. Malinowski, W. Hoyt, P. Zwanziger and B. Finley, “Motor and Drive-System Efficiency Regulations: Review of Regulations in the United States and Europe,” IEEE Industry Applications Magazine, vol. 23, no. 1, pp. 34-41, January/February 2017.
9. Шворак, Д. А., & Наконечний, М. С. (2024). Методи регулювання асинхронних двигунів. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної

конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій “, 289-289.

10. Белякова, І. В., Вакуленко, О. О., & Ришиковець, О. Л. (2018). Досвід підвищення енергоефективності на автотранспортному підприємстві. Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій “, 3, 9-10.

11. F. J. T. E. Ferreira and A. T. de Almeida, “Reducing Energy Costs in Electric-MotorDriven Systems: Savings Through Output Power Reduction and Energy Regeneration,” IEEE Industry Applications Magazine, vol. 24, no. 1, pp. 84-97, Jan.-Feb. 2018.

12. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.

13. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший ( бакалаврський ) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.