

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор

_____Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ ” _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти

на тему:

«Моделювання та аналіз енергоощадної роботи
асинхронних двигунів систем вентиляції переробного
підприємства»

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу, групи *ЕЕ-24М*

ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»

спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»,

_____Сергій КРИВЕНКО

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи к.т.н., доцент

_____Наталія ГАРАСЬОВА

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

завідувач кафедри ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор

Петро ПЛЄШКОВ

« 06 » 10 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Кривенка Сергія Михайловича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Моделювання та аналіз енергоощадної роботи асинхронних двигунів систем вентиляції переробного підприємства

Modeling and analysis of energy-efficient operation of asynchronous motors in ventilation systems of a processing plant

2. Керівник роботи Гарасьова Наталія Юріївна, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 01.12.2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: аналіз вентиляційних систем переробного виробництва; методи підвищення енергоефективності вентиляційних установок переробного виробництва з аналізом енергоощадних режимів роботи АД; математичне моделювання асинхронного електроприводу вентиляційних систем; розробка імітаційного моделювання вентиляційної системи та аналіз результатів дослідження; охорона праці під час монтажу та експлуатації системи вентиляції; висновки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц., к.т.н. І.В. Савеленко		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	06.10-10.10. 2025 р.	
2	Аналіз вентиляційних систем переробного виробництва	11.10-15.10. 2025 р.	
3	Методи підвищення енергоефективності вентиляційних установок переробного виробництва з аналізом енергоощадних режимів роботи АД	16.10-23.10. 2025 р.	
4	Математичне моделювання асинхронного електроприводу вентиляційних систем	24.10-04.11. 2025 р.	
5	Розробка імітаційного моделювання вентиляційної системи та аналіз результатів дослідження	05.11-15.11. 2025 р.	
6	Охорона праці під час монтажу та експлуатації системи вентиляції	16.11-20.11. 2025 р.	
7	Висновки, список використаних джерел	21.11-23.11. 2025 р.	
8	Оформлення презентації КР	24.11-26.11. 2025 р.	
9	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки КР	27.11-30.11. 2025 р.	

Дата видачі завдання

« ___ » _____ 2025 р.

Підпис керівника

Наталія ГАРАСЬОВА

Завдання прийнято до виконання

« ___ » _____ 2025 р.

Підпис здобувача

Сергій КРИВЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 97 с.; 39 рис.; 17 табл.; 23 джерела

Кривенко С. М. Моделювання та аналіз енергоощадної роботи асинхронних двигунів систем вентиляції переробного підприємства. - Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2025 рік.

Об'єкт дослідження - процеси перетворення енергії в системі частотно-регульованого асинхронного електроприводу вентиляційної установки.

Предмет дослідження - математичні моделі та алгоритми енергоефективного керування асинхронним електроприводом вентиляційних систем.

Мета роботи - підвищення енергетичної ефективності асинхронних електроприводів вентиляційних установок переробного виробництва шляхом математичного моделювання та аналізу енергоощадних режимів роботи з мінімізацією втрат.

У першому розділі здійснено аналіз технологічних процесів переробного виробництва та вентиляційних потреб, досліджено енергетичні характеристики вентиляційних систем, класифіковано типи електроприводів та їх застосування.

У другому розділі проаналізовано методи підвищення енергоефективності вентиляційних установок, виконано порівняльний аналіз традиційних та сучасних методів регулювання продуктивності. Розглянуто структури перетворювачів частоти та методи частотного керування. Досліджено алгоритми оптимального керування асинхронним електроприводом з мінімізацією втрат.

У третьому розділі розроблено математичні моделі асинхронного двигуна в різних системах координат, побудовано математичну модель вентиляційного

навантаження, досліджено математичну модель перетворювача частоти з широтно-імпульсною модуляцією.

У четвертому розділі створено комплексну імітаційну модель системи частотнорегульованого асинхронного електроприводу вентиляційної установки в середовищі MATLAB/Simulink. Виконано синтез системи автоматичного керування тиском з ПІ-регулятором. Проведено моделювання перехідних процесів для різних режимів роботи, з урахуванням енергоощадних алгоритмів керування та мінімізації сумарних втрат потужності.

У п'ятому розділі проаналізовано умови праці при монтажі та експлуатації вентиляційних систем, ідентифіковано шкідливі та небезпечні виробничі чинники, розроблено техніко-організаційні заходи та обґрунтовано засоби індивідуального захисту персоналу.

Ключові слова: асинхронний електропривод, вентиляційна система, частотне регулювання, математичне моделювання, MATLAB/Simulink.

ABSTRACT

Qualification work: 97 p.; 39 Fig.; 17 tables; 23 sources

Kryvenko S. M. Modeling and analysis of energy-efficient operation of asynchronous motors in ventilation systems of a processing plant. - Manuscript.

Master's thesis in specialty 141 "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics", OPP "Electrical Engineering Systems of Electricity onsumption". - Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2025.

The object of research is energy conversion processes in the system of a frequency-controlled asynchronous electric drive of a ventilation unit.

The subject of research is mathematical models and algorithms for energy-efficient control of an asynchronous electric drive of ventilation systems.

The purpose of the work is to increase the energy efficiency of asynchronous electric drives of ventilation units in processing production through mathematical modeling and analysis of energy-saving operating modes with minimization of losses.

The first section analyzes the technological processes of processing production and ventilation needs, investigates the energy characteristics of ventilation systems, and classifies the types of electric drives and their applications.

The second section analyzes methods for increasing the energy efficiency of ventilation units, and a comparative analysis of traditional and modern methods of regulating performance is performed. The structures of frequency converters and frequency control methods are considered. Algorithms for optimal control of an asynchronous electric drive with loss minimization are investigated.

In the third section, mathematical models of an asynchronous motor in different coordinate systems are developed, a mathematical model of the ventilation load is constructed, and a mathematical model of a frequency converter with pulse-width modulation is investigated.

In the fourth section, a comprehensive simulation model of a frequency-controlled asynchronous electric drive system of a ventilation unit is created in the MATLAB/Simulink environment. An automatic pressure control system with a PI regulator is synthesized. Transient processes were simulated for different operating modes, taking into account energy-saving control algorithms and minimizing total power losses.

The fifth section analyzes working conditions during the installation and operation of ventilation systems, identifies harmful and dangerous production factors, develops technical and organizational measures, and justifies personal protective equipment for personnel.

Keywords: asynchronous electric drive, ventilation system, frequency control, mathematical modeling, MATLAB/Simulink.

З М І С Т

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1. АНАЛІЗ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ ПЕРЕРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	12
1.1 Основні технологічні процеси переробного виробництва та їх вентиляційні потреби.....	12
1.2 Загальна та енергетична характеристика вентиляційних систем.....	15
1.3 Аналіз та характеристика електроприводів вентиляційних систем...	17
1.3.1. Типи електродвигунів та їх застосування.....	17
1.3.2. Вентиляційне навантаження	21
2. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВЕНТИЛЯЦІЙ- НИХ УСТАНОВОК ПЕРЕРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА З АНАЛІЗОМ ЕНЕРГООЩАДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ АД.....	25
2.1 Загальні методи підвищення енергоефективності вентиляційних установок.....	25
2.1.1. Традиційні та сучасні методи регулювання продуктивності вентиляційних установок.....	26
2.1.2. Аналіз графіків навантаження вентиляційних систем.....	29
2.2 Оцінка доцільності встановлення частотнорегульованого електроприводу в системах вентиляції ОЕВ.....	30
2.3 Сучасні перетворювачі частоти.....	32
2.3.1 Загальна характеристика та вибір структури ПЧ	32
2.3.2. Класифікація методів частотного керування.....	36
2.4 Оптимальне керування асинхронним електроприводом з мінімізацією втрат у міді та теплових втрат.....	39
2.4.1. Загальна характеристика втрат у системах асинхронного електроприводу.....	39
2.4.2. Зменшення втрат у міді та теплових втрат.....	41
2.5 Оцінка енергетичної ефективності частотного регулювання.....	47

3.	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ.....	53
3.1	Математичні моделі асинхронного двигуна в різних системах координат та вибір моделі дослідження.....	53
3.1.1.	Модель АД у нерухомій системі координат (abc) та в обертовій системі координат ($d-q$).....	54
3.1.2.	Визначення параметрів асинхронного двигуна.....	57
3.2	Математична модель вентиляційного навантаження.....	59
3.3	Моделювання перетворювача частоти.....	62
3.3.1.	Вибір частотного перетворювача	62
3.3.2.	Математична модель частотного перетворювача для системи вентиляції.....	64
3.4	Узагальнена модель дослідження.....	65
4.	РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	67
4.1	Вибір моделі у програмному середовищі MATLAB.....	67
4.2	Створення імітаційної моделі системи в програмному середовищі MATLAB/Simulink.....	70
4.2.1.	Комп'ютерна імітаційна модель частотнорегульованого АЕП	71
4.2.2.	Синтез САК тиску вентиляційної установки.....	77
4.3	Моделювання режимів роботи вентиляційної установки на основі частотнорегульованого електроприводу.....	80
5.	ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС МОНТАЖУ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ОЕВ.....	86
5.1	Аналіз умов праці.....	86
5.2	Шкідливі та небезпечні чинники на виробництві.....	88
5.3	Вибір техніко-організаційних заходів і засобів індивідуального захисту для запобігання впливу на працівників шкідливих і небезпечних виробничих чинників.....	91
	ВИСНОВКИ.....	93
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	96

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ОЕВ - олійноекстракційне виробництво

АД - асинхронний двигун

АЕП - автоматизований електропривод

ПЧ – перетворювач частоти

ККД – коефіцієнт корисної дії

САК - система автоматичного керування

АКЗ - асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором

СДПМ - синхронні двигуни з постійними магнітами

СРД - синхронний реактивний двигун

ВРД - вентильний реактивний двигун

НВ - некерований випрямляч

АН - автономний інвертор напруги

ШІМ - широтно-імпульсна модуляція

ЧРЕП – частотнорегульований електропривод

ДПЧ - дворівневий перетворювач частоти

ВУ – вентиляційна установка

ЗІ – задавач інтенсивності

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний

ПІ- пропорційно-інтегральний

АСК - автоматизована система керування

ОК – об'єкт керування

ВП – виконавчий пристрій

ВСТУП

Актуальність теми. Ефективне функціонування вентиляційних систем на підприємствах переробної промисловості є одним із ключових чинників забезпечення безпеки технологічних процесів, дотримання санітарно-гігієнічних норм та підвищення продуктивності виробництва. Особливої актуальності набуває питання модернізації систем аспірації та загальнообмінної вентиляції, що працюють із значними повітряними потоками та характеризуються високим рівнем енергоспоживання. Зростання вартості електроенергії, посилення екологічних та безпекових вимог, а також прагнення підприємств до оптимізації витрат, зумовлюють необхідність впровадження енергоефективних технологій управління вентиляційними установками.

Вентиляційні системи переробних підприємств характеризуються значним енергоспоживанням, що становить до 40% від загальних витрат електроенергії. Серед сучасних технічних рішень найефективнішим є застосування частотнорегульованих електроприводів вентиляторів, що дозволяють адаптувати продуктивність вентиляційних систем до реальних потреб технологічних процесів. Впровадження частотнорегульованого асинхронного електроприводу з оптимізованими алгоритмами керування забезпечує суттєве зниження енергетичних витрат при збереженні необхідних технологічних параметрів вентиляції.

Метою роботи є підвищення енергоефективності вентиляційних систем переробного виробництва шляхом застосування частотнорегульованого асинхронного електропривода, розроблення математичної та імітаційної моделей системи «ПЧ–АД–вентилятор» та оцінка економічної доцільності впровадження частотного регулювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати технологічні процеси переробного виробництва та визначити їх вентиляційні потреби;
- дослідити типи вентиляційних систем та електроприводів, що застосовуються у переробній промисловості;

- розглянути методи регулювання продуктивності вентиляційних установок та оцінити їх енергоефективність;
- обґрунтувати доцільність використання частотнорегульованого електропривода для вентиляційних систем переробного виробництва;
- розробити математичні моделі асинхронного двигуна, вентиляційного навантаження та перетворювача частоти;
- створити імітаційну модель системи «ПЧ–АД–вентилятор» у MATLAB/Simulink та дослідити її роботу в різних режимах;
- виконати аналіз енергетичної ефективності частотного регулювання та розрахувати економічні показники проекту.

Об'єктом дослідження є вентиляційні системи переробного виробництва, зокрема аспіраційні та припливно-витяжні установки.

Предметом дослідження є процес частотного керування асинхронним електроприводом вентилятора та його вплив на енергоефективність, динаміку та стабільність роботи вентиляційної системи.

Методи дослідження: системний аналіз вентиляційних процесів та характеристик вентиляторів; методи математичного моделювання; числові методи розрахунку параметрів електромеханічних систем; імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink; методи техніко-економічного аналізу.

Наукова цінність роботи полягає в удосконаленні математичних моделей системи «ПЧ - АД - вентилятор» з урахуванням енергоощадних алгоритмів керування та мінімізації сумарних втрат потужності.

Практична цінність результатів дослідження визначається можливістю їх використання при проектуванні та модернізації вентиляційних систем переробних підприємств з метою зниження енергоспоживання на 25-40% порівняно з нерегульованими електроприводами.

1 АНАЛІЗ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ ПЕРЕРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА

У якості переробного виробництва у кваліфікаційній роботі розглянуто олійноекстракційне виробництво (ОЕВ). Вентиляційні системи задіяні у всіх технологічних процесах підприємства, таких як підготовка сировини, форпресування (попереднє віджимання), екстракція, рафінація олії.

Вентиляційні системи забезпечують нормалізацію повітряного середовища у виробничих приміщеннях, підтримуючи безпечні умови праці та стабільність технологічних процесів. Через наявність пилу, парів розчинників (гексану), тепла, вологи та запахів, системи вентиляції мають складну структуру та суворі вимоги до виконання.

1.1 Основні технологічні процеси ОЕВ та їх вентиляційні потреби

Розглянемо використання вентиляційних систем для основних технологічних операцій ОЕВ.

Вентиляційна система олійноекстракційного виробництва є складним комплексом інженерних засобів, спрямованих на підтримання нормативного мікроклімату, запобігання утворенню вибухонебезпечних концентрацій парів розчинників і видалення забрудненого повітря з технологічних зон. Її структура визначається специфікою технологічних процесів — від підготовки насіння до стадії екстракції, рафінації та дезодорації олії. Така система базується на зонуванні повітрообміну відповідно до рівня забруднення і вибухонебезпечності повітря.

Кожна технологічна дільниця обладнується необхідною системою вентиляції: аспіраційною, припливно-витяжною або вибухозахищеною. Основною вимогою є виключення перетоку повітря із зон з високою концентрацією парів гексану в інші приміщення.

На стадії підготовки насіння (очищення, дроблення, сушіння, обсмажування) формується значна кількість пилу, теплого та вологого повітря.

Для їх видалення застосовується аспіраційна система, яка складається з локальних відсмоктувачів, повітропроводів, циклонів або рукавних фільтрів, та відцентрового вентилятора. Повітря після очищення частково повертається в приміщення, а його решта викидається через димову трубу.

У пресовому цеху встановлюються витяжні та припливні установки, які подають очищене й підігріте повітря у верхню зону. Це забезпечує баланс тепловологісного режиму і створює комфортні умови праці.

Найскладнішою частиною системи вентиляції є екстракційний комплекс, де використовується органічний розчинник - гексан. Через вибухонебезпечність цього середовища вентиляція виконує подвійну функцію: забезпечення безперервного повітрообміну та створення постійного розрідження для запобігання витоку парів у суміжні приміщення.

Витяжне повітря з екстрактора, дистилятора та десольвентайзера спрямовується у конденсаційно-адсорбційну установку, де пари гексану вловлюються й повертаються в технологічний цикл.

Припливна система подає свіже повітря, очищене від пилу та осушене, через фільтри та калорифери.

Для підвищення надійності передбачено автоматичне блокування роботи екстрактора при зупинці вентилятора або при перевищенні концентрації парів розчинника.

У процесах регенерації гексану вентиляція забезпечує відведення тепла від конденсаторів і сепараторів, а також локалізацію можливих витоків розчинника. Використовуються герметизовані системи, обладнані вибухозахищеними вентиляторами та аварійними витяжними каналами.

У рафінаційному та дезодораційному відділеннях вентиляція виконує санітарно-гігієнічну функцію, видаляючи пари кислот, лугів і водяної пари. Тут застосовують корозійностійкі вентилятори та скрубери, які забезпечують очищення відпрацьованого повітря перед викидом в атмосферу. Система працює в припливно-витяжному режимі з частковою рециркуляцією повітря для зниження теплових втрат.

До допоміжних систем належать вентиляція котельні, компресорної, електрощитової та складу розчинників. У складських приміщеннях розчинників встановлюють постійно діючу витяжку біля підлоги, оскільки пари гексану важчі за повітря. У котельні застосовується припливна вентиляція з рекуперацією тепла, що підвищує енергоефективність об'єкта.

Основні завдання вентиляційних систем відповідно до етапів виробництва представлено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Призначення вентиляційних систем ОЕВ

№	Етап виробництва	Основна мета вентиляції
1	Підготовка насіння	Видалення пилу, вологи, тепла
2	Пресування	Відведення парів і запахів
3	Екстракція	Запобігання вибухам, контроль парів розчинника
4	Регенерація розчинника	Безпека, стабільність процесу
5	Рафінація	Видалення парів реагентів, запахів
6	Допоміжні приміщення	Охолодження, пожежна безпека

Технологічну блок-схему вентиляційної системи наведено на рис 1.1.

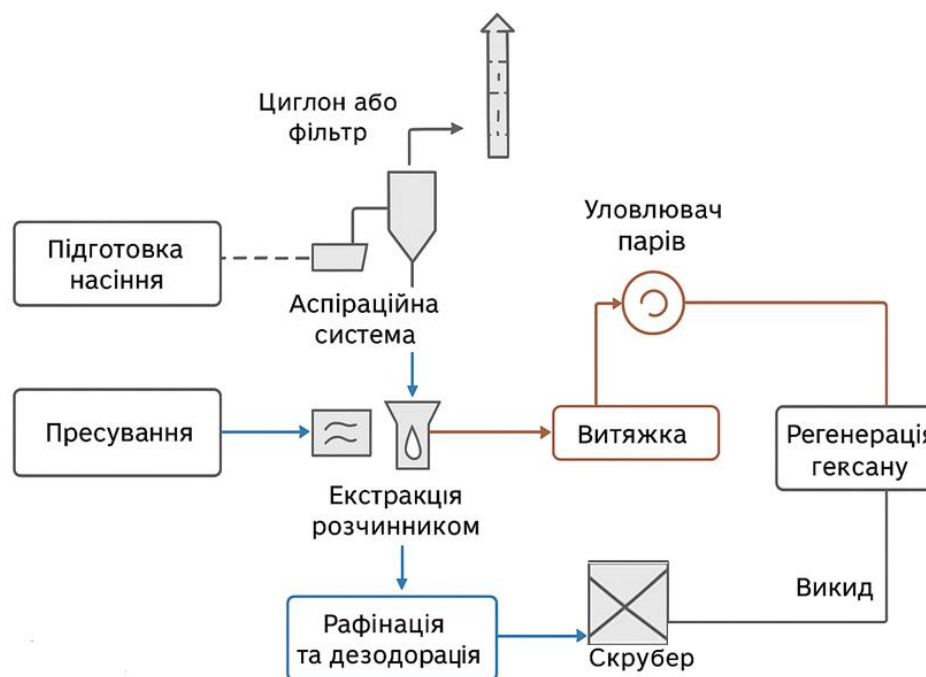


Рисунок 1.1 – Технологічна блок-схема вентиляційної системи ОЕВ

Таким чином, вентиляційна система виступає невід'ємною частиною технологічної структури підприємства, що забезпечує стабільність виробництва, енергозбереження і відповідність нормам охорони праці та довкілля.

1.2 Загальна та енергетична характеристики вентиляційних систем ОЕВ

До основних видів вентиляційних систем відносяться: аспіраційні системи, сушильна вентиляція, вибухозахищена вентиляція, вакуумні системи, загальнообмінна вентиляція. Призначення та характеристику цих систем наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Призначення та характеристика вентиляційних систем

Тип системи	Призначення	Основні вузли	$P_{дв}$, кВт	Продуктивність, м ³ /год
Аспіраційні системи	Очищення повітря від пилу та легких домішок	- відцентрові вентилятори середнього тиску (3-8 кПа); - циклони для уловлювання пилу; - тканинні фільтри; - пневмотранспортні трубопроводи	15-75	5000-20000
Сушильна вентиляція	Видалення вологи при сушці насіння	- відцентрові вентилятори високого тиску; - теплообмінники для підігріву повітря; - системи регулювання температури та вологості	45-200	15000-50000
Вибухозахищена вентиляція	Безпечне видалення парів розчинника	- вибухозахищені електродвигуни; - іскробезпечне виконання; - системи контролю концентрації парів; - аварійне відключення	22-110	10000-40000
Вакуумні системи	Створення розрідження при дезодорації	- водокільцеві вакуум-насоси; - пароструминні ежектори; - конденсатори; - сепаратори	30-150	Глибина вакууму 2-5 мм рт.ст.
Загальнообмінна вентиляція	Підтримання мікроклімату у виробничих приміщеннях	- припливні установки з підігрівом повітря; - витяжні вентилятори; - системи автоматичного регулювання	11-75	20000-100000

Структуру енергоспоживання вентиляційних систем наведено в таблиці 1.3 та на рис. 1.2.

Таблиця 1.3 – Структура енергоспоживання вентиляційних систем

№	Вид вентиляційної системи	% від загального споживання електроенергії
1	Аспіраційні системи	25-30
2	Сушильна вентиляція	20-25
3	Вибухозахищена вентиляція	15-20
4	Вакуумні системи	15-20
5	Загальнообмінна вентиляція	15-20



Рисунок 1.2 – Зображення структури енергоспоживання ВС

Електроприводи вентиляційних систем працюють в безперервному (вибухозахищена вентиляція екстракційного відділення; загальнообмінна вентиляція основних цехів), періодичному (аспіраційні системи, сушильна вентиляція) та змінному (вакуумні системи, витяжка від технологічного обладнання) режимах.

Особливостями навантаження електроприводів вентиляційних систем є квадратична залежність потужності від продуктивності вентиляторів; високий пусковий момент для відцентрових машин; можливість роботи з частковим навантаженням та сезонні коливання навантаження, що пов'язані з переробкою врожаю.

1.3 Аналіз та характеристика електроприводів вентиляційних систем

Розберемо особливості застосування електродвигунів у вентиляційних системах. Потрібно враховувати, що олійноекстракційне виробництво характеризується складним комплексом технологічних процесів, що супроводжуються виділенням пилю, водяної пари, летких органічних сполук та створенням потенційно вибухонебезпечних середовищ. Забезпечення безпеки та ефективності виробничих процесів вимагає застосування розгалужених систем вентиляції, до складу яких входять численні електроприводи різної потужності та призначення.

Загальна встановлена потужність електродвигунів вентиляційних систем на підприємствах олійноекстракційної промисловості середньої продуктивності (переробка 1000-1500 тонн насіння на добу) становить 1500-2500 кВт, що складає 15-25% від загального енергоспоживання підприємства. Ця обставина зумовлює високу актуальність питань раціонального вибору типів електродвигунів та оптимізації режимів їх роботи.

1.3.1. Типи електродвигунів та їх застосування. Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором складають основу електроприводів вентиляційних систем олійноекстракційного виробництва. За даними аналізу типового підприємства, вони становлять 75-80% від загальної кількості встановлених двигунів у вентиляційних системах.

Для аспіраційних систем застосовуються двигуни потужністю від 4 до 75 кВт серії АІР (або їх аналоги 5АІ, 4А). Найбільш поширеним є діапазон 15-45 кВт, що відповідає продуктивності вентиляторів 8000-20000 м³/год при тиску 3000-5000 Па.

Наприклад, для двигунів потужністю 30 кВт серії АІР180М4 характерні наступні параметри: синхронна частота обертання 1500 об/хв, номінальна швидкість 1470 об/хв (ковзання 2%), номінальний ККД 92-93%, коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0,85-0,87$, кратність пускового струму 6,5-7,5, кратність пускового моменту 1,8-2,2.

Конструктивне виконання двигунів обирається відповідно до умов експлуатації: ІР54 або ІР55 для загальнопромислового застосування, ІР65 для приміщень з підвищеною вологістю (відділення екстракції, рафінації).

У відділеннях екстракції, де використовуються леткі органічні розчинники (переважно н-гексан), застосування вибухозахищених двигунів є обов'язковою вимогою нормативних документів. Використовуються двигуни серій АІММ, ВА, ВАО, ІВАО з рівнем вибухозахисту ExdІІВТЗ або ExdІІСТЗ.

Вибухозахист типу "d" (вибухонепроникна оболонка) забезпечується посиленою конструкцією корпусу, здатного витримати внутрішній вибух без руйнування та передачі полум'я у зовнішнє середовище. Це призводить до збільшення маси двигуна на 30-40% порівняно з загальнопромисловими аналогами.

Температурний клас ТЗ відповідає максимальній температурі поверхні 200°C, що є достатнім для роботи у середовищах з парами гексану (температура самозаймання 225°C).

Вибухозахищені двигуни мають дещо нижчі енергетичні показники порівняно із загальнопромисловими: ККД нижче на 1-2%, коефіцієнт потужності на 0,02-0,03. Для двигуна потужністю 30 кВт серії АІММ180М4 ККД становить 90-91%, $\cos \varphi = 0,83-0,85$.

У зв'язку з прийняттям Україною стандартів енергоефективності, що гармонізовані з європейськими (ДСТУ ІЕС 60034-30-1), на підприємствах олійноекстракційної промисловості все ширше застосовуються двигуни класів ІЕ3 (підвищена ефективність) та ІЕ4 (суперпреміум ефективність).

Наприклад, для двигуна потужністю 30 кВт, 4-полюсного, при номінальному навантаженні:

- клас ІЕ1 (стандартна ефективність): ККД = (90,5-91,0)%;
- клас ІЕ2 (висока ефективність): ККД = (92,0-92,5)%;
- клас ІЕ3 (підвищена ефективність): ККД = (93,0-93,5)%;
- клас ІЕ4 (суперпреміум ефективність): ККД = (94,0-94,5)%.

Для вентиляційних систем з необхідністю ступінчастого регулювання продуктивності застосовуються двигуни з можливістю переключення числа пар полюсів. Найбільш поширеними є двошвидкісні двигуни з комбінацією 4/8 полюсів (1500/750 об/хв) або 6/12 полюсів (1000/500 об/хв).

Переключення швидкості здійснюється зміною схеми з'єднання обмоток статора (зірка/подвійна зірка або трикутник/зірка). При зниженні швидкості у два рази продуктивність вентилятора зменшується також у два рази, а споживана потужність приблизно у вісім разів відповідно до законів подібності для відцентрових машин.

Недоліками багатошвидкісних двигунів є складність конструкції, більша вартість (на 40-60% вище стандартних), обмежена кількість швидкостей (зазвичай 2-3), нерівномірність енергетичних характеристик на різних швидкостях.

В останні роки на підприємствах олійноекстракційної промисловості при модернізації вентиляційних систем почали застосовуватися синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ), що працюють у складі регульованих електроприводів.

Основними перевагами є: відсутність втрат у роторі, що забезпечує ККД 94-96% у широкому діапазоні навантажень; високий коефіцієнт потужності $\cos \varphi \approx 1$; можливість роботи з постійним моментом при низьких швидкостях; компактність конструкції (менша маса на 20-30% при тій же потужності).

Недоліками є висока вартість (у 2-3 рази вище асинхронних двигунів), необхідність обов'язкового використання перетворювача частоти, чутливість до перевантажень, складність демонтажу та ремонту. Порівняння параметрів АД представлено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняння параметрів АД потужністю 30 кВт для різних типів

Параметр	Загально-промисловий ІЕ2	Енергоефективний ІЕ3	Вибухо-захищений ExdІІВТ3	СДПМ
ККД, %	92,0	93,2	90,5	95,0
cos φ	0,86	0,87	0,84	0,98
Маса, кг	220	240	310	170
Вартість, тис. грн	35	42	58	95
Термін служби, років	12-15	15-18	15-18	15-20

Вибір типу двигуна залежить від конкретної вентиляційної системи. Для аспіраційних систем рекомендується застосування асинхронних двигунів класу ІЕ3 з конструктивним виконанням ІР54/ІР55. При наявності регульованого електроприводу доцільне використання двигунів з підвищеною механічною міцністю ізоляції обмоток.

Для вибухонебезпечних зон (відділення екстракції) обов'язковим є застосування вибухозахищених двигунів відповідного рівня захисту. Вибір виконується на основі категорії приміщення.

Для систем з широким діапазоном регулювання та частими пуск-зупинками перспективним є застосування синхронних двигунів з постійними магнітами (СДПМ), незважаючи на високу початкову вартість.

Перспективним є застосування нових типів двигунів, таких як синхронні реактивні двигуни (СРД), вентильні реактивні двигуни (ВРД). СРД поєднують переваги асинхронних (простота, надійність) та синхронних (високий ККД, $\cos \varphi \approx 1$) двигунів. При ККД 94-95% та вартості, на 15-20% нижчій за СДПМ, СРД є перспективними для модернізації вентиляційних систем. ВРД характеризуються найпростішою конструкцією ротора, відсутністю обмоток та магнітів, високою надійністю, однак потребують складних систем керування та мають підвищений рівень акустичного шуму.

1.3.2. Вентиляційне навантаження. Вибір потужності двигуна вентиляційної установки залежить від багатьох факторів основними з яких являються: продуктивність вентилятора (Q , м³/год); повний тиск (Δp , Па); ККД вентилятора (η_v); ККД передачі (η_n); коефіцієнту запасу (k_3):

$$P_{дв.в.} = \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta_v \cdot \eta_n} \cdot k_3.$$

Електроприводи вентиляторів характеризуються специфічним характером механічного навантаження, що описується залежністю:

$$M_c = M_0 + k \cdot \omega^2,$$

де M_0 - момент тертя у підшипниках та ущільненнях (5-10% від номінального);

k – коефіцієнт пропорційності, що залежить від конструкції вентилятора та параметрів повітряної мережі;

ω – кутова швидкість обертання.

Залежність продуктивності, тиску та потужності вентилятора від частоти обертання (швидкості) описується законами подібності вентиляторів.

$$\begin{cases} Q_2 = Q_1 \cdot \frac{n_2}{n_1}; \\ \Delta p_2 = \Delta p_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2; \\ P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3. \end{cases} \quad (1.1)$$

Зі зменшенням частоти обертання продуктивність вентилятора знижується пропорційно, тиск — пропорційно квадрату, а потужність — пропорційно кубу швидкості (рис.1.3). Це визначає високий енергозберігаючий потенціал частотного регулювання у вентиляційних та аспіраційних системах.

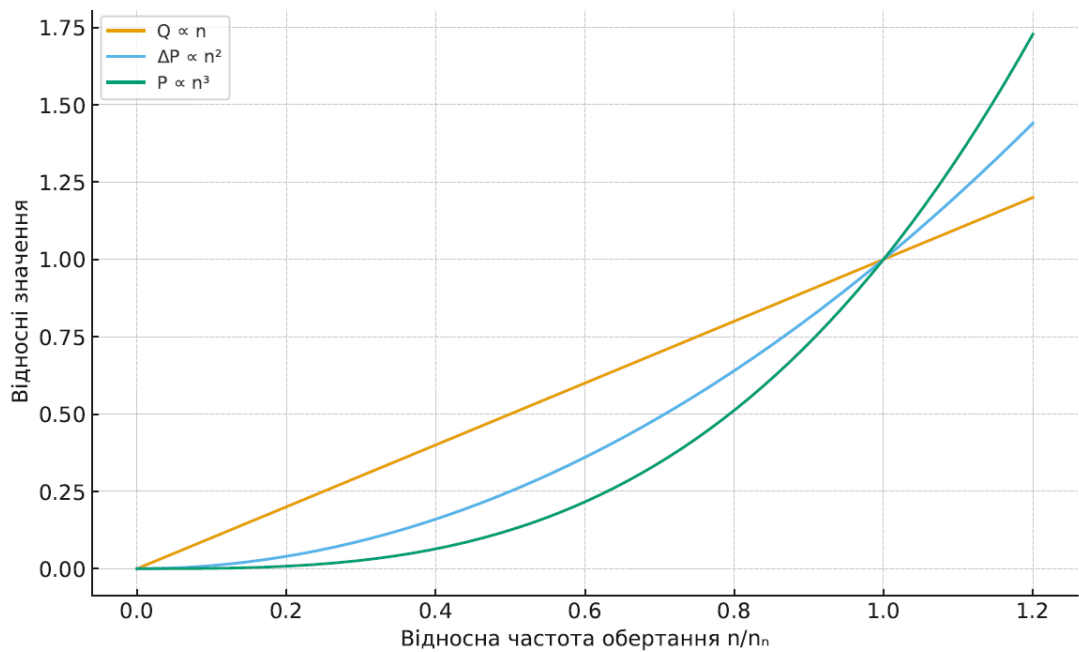


Рисунок 1.3 - Закони подібності вентиляторів: залежність продуктивності, тиску та потужності від частоти обертання електропривода.

Закони подібності ідеальні. На практиці результати можуть трохи відрізнятись через зміни характеристик каналу, забруднення фільтрів, механічні втрати двигуна, втрати в ПЧ.

Вибір вентилятора для промислової системи (загальнообмінної, сушильної, аспіраційної) здійснюється на основі таких параметрів:

- розрахункова витрата повітря Q , м³/год;
- повний тиск ΔP , Па;
- характеристика повітропровідної мережі;
- температурний режим;
- наявність пилу або агресивних домішок;
- клас вибухонебезпечності середовища;
- потреба в регулюванні продуктивності.

Основними типами вентиляторів, які застосовуються в промисловості, є радіальні, осьові, каналні, високотемпературні, пилові та вибухозахищені вентилятори.

Вибір вентиляторів для технологічних систем олійноекстракційного виробництва залежить від призначення та умов експлуатації. Для

загальнообмінної вентиляції ефективні осьові й каналні вентилятори, для сушильних процесів підходять високотемпературні радіальні моделі, для аспірації доцільно застосовувати пилові радіальні вентилятори зі зміцненими робочими колесами, а у вибухонебезпечних зонах застосовуються агрегати у спеціальному виконанні. Частотне керування забезпечує оптимізацію повітряного потоку і зниження енергоспоживання.

Аналіз роботи електроприводів вентиляційних систем показує, що фактичний коефіцієнт завантаження двигунів значно нижчий за номінальний:

- аспіраційні системи: $k_3 = (0,65-0,75)$;
- сушильна вентиляція: $k_3 = (0,7-0,8)$;
- загальнообмінна вентиляція: $k_3 = (0,6-0,7)$;
- технологічна вентиляція екстракції: $k_3 = (0,75-0,85)$.

Сучасний розвиток електромашинобудування для вентиляційних систем характеризується наступними тенденціями: підвищення енергоефективності (перехід на клас IE4 та IE5 за рахунок застосування електротехнічних сталей з низькими втратами, оптимізації магнітних кіл, покращення системи охолодження); інтеграція засобів діагностики(вбудовані датчики температури, вібрації, струму дозволяють реалізувати системи превентивного обслуговування та запобігати аваріям); модульна конструкція (розроблення уніфікованих серій двигунів з можливістю швидкої заміни компонентів спрощує ремонт та обслуговування).

Аналіз застосування електричних двигунів у вентиляційних системах олійноекстракційного виробництва дозволяє зробити наступні висновки:

1. Основним типом електроприводів є асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором потужністю 4-75 кВт, що забезпечують надійну експлуатацію у важких умовах запиленості та підвищеної вологості.

2. Коефіцієнт завантаження двигунів у реальних умовах експлуатації становить $(0,6-0,8)$, що зумовлює значний потенціал енергозбереження при впровадженні регульованих електроприводів.

3. Застосування двигунів підвищених класів енергоефективності (IE3, IE4) економічно доцільне при безперервному режимі роботи з терміном окупності 3-5 років.

4. Специфіка технологічних процесів вимагає застосування вибухозахищених двигунів у відділеннях екстракції, що супроводжується підвищенням капітальних витрат на (40-60)%.

5. Перспективним напрямком розвитку є застосування синхронних двигунів з постійними магнітами та синхронних реактивних двигунів у складі регульованих електроприводів, що дозволяє підвищити загальний ККД системи до 90-92%.

6. Характер навантаження вентиляторних установок (квадратична залежність моменту від швидкості) створює сприятливі умови для ефективного частотного регулювання з економією електроенергії до 35-50% при частковому навантаженні.

2 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ УСТАНОВОК ПЕРЕРОВНОГО ВИРОБНИЦТВА З АНАЛІЗОМ ЕНЕРГООЩАДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ АД

2.1 Загальні методи підвищення енергоефективності вентиляційних установок

Підвищення енергетичної ефективності вентиляційних систем може бути досягнуто шляхом реалізації комплексу організаційних, технічних та технологічних заходів.

Організаційні заходи включають оптимізацію режимів експлуатації обладнання, своєчасне технічне обслуговування, навчання персоналу раціональним методам керування системами вентиляції. Потенціал енергозбереження цих заходів становить 5-15% без капіталовкладень.

Технічні заходи передбачають модернізацію або заміну обладнання, впровадження систем автоматичного керування, застосування енергоефективних двигунів. Термін окупності капіталовкладень становить близько 2-7 років при потенціалі енергозбереження 20-60%.

Технологічні заходи спрямовані на вдосконалення технологічних процесів з метою зменшення потреби у вентиляції. Включають герметизацію обладнання, рециркуляцію повітря, утилізацію теплоти. Потенціал енергозбереження 10-30%.

Найбільший потенціал мають саме технічні заходи. Енергетичний баланс типової вентиляційної установки з асинхронним електроприводом характеризується розподілом споживаної електричної енергії на корисну енергію (витрачається безпосередньо на переміщення повітря та створення необхідного тиску у вентиляційній системі), втрати у вентиляторі (обумовлені недосконалістю аеродинамічних характеристик робочого колеса, гідравлічними втратами у спіральному корпусі, механічними втратами у підшипниках та ущільненнях), втрати в електродвигуні (складаються з електричних втрат у обмотках статора та ротора, магнітних втрат у осерді, механічних втрат на тертя

та вентиляцію, додаткових втрат), втрати у системі керування та живлення (втрати у пускорегулюючій апаратурі, кабельних лініях, трансформаторах, реактивна потужність). Орієнтовний розподіл втрат наведено в таблиці 2.1 та на рис. 2.1.

Таблиця 2.1 – Розподіл споживання ЕЕ типовою ВУ

Характеристика	% від загального споживання електроенергії
Корисна енергія	65-70
Втрати у вентиляторі	15-20
Втрати в електродвигуні	8-12
Втрати у системі керування та живлення	2-5



Рисунок 2.1 - Енергетичний баланс типової вентиляційної установки

2.1.1. Традиційні та сучасні методи регулювання продуктивності вентиляційних установок. При зміні продуктивності ВУ можливі наступні методи регулювання: дросельне, зміною кута нахилу лопаток направляючого апарату або робочого колеса (для осьових вентиляторів), байпасування [1].

Дросельне регулювання є найбільш поширеним методом зміни продуктивності вентиляторів на підприємствах олійноекстракційної промисловості. Регулювання здійснюється зміною опору повітряної мережі за допомогою дросельних заслінок або шиберів, встановлених на всмоктувальному або нагнітальному трубопроводі. При прикриванні заслінки зростає гідравлічний опір мережі, що призводить до зміщення робочої точки вентилятора вздовж його аеродинамічної характеристики у бік зменшення продуктивності та зростання тиску. Основним недоліком дросельного регулювання є те, що при зниженні продуктивності споживана двигуном потужність зменшується незначно, оскільки частина енергії марно витрачається на подолання штучно створеного опору. При зниженні продуктивності до 70% від номінальної, споживана

потужність становить (80-85)% від номінальної, тоді як за законами подібності вона могла б бути знижена до 34%. Перевитрата електроенергії становить (45-50) %.

Направляючий апарат дозволяє закручувати потік на вході у робоче колесо, змінюючи його швидкісну структуру та енергію. Цей метод більш ефективний порівняно з дросельним, проте вимагає складної конструкції з системою поворотних лопаток. Економія електроенергії при регулюванні направляючим апаратом становить (15-25)% порівняно з дросельним регулюванням. Однак складність конструкції, необхідність періодичного обслуговування механізму повороту лопаток обмежують застосування цього методу.

Байпасування передбачає перепуск частини повітря з нагнітального патрубку у всмоктувальний через байпасний трубопровід з регулюючим органом. Метод практично не забезпечує енергозбереження, оскільки двигун продовжує працювати з тією ж потужністю, переміщуючи повітря по замкнутому контуру.

До сучасних енергоефективних методів регулювання відносять: частотне регулювання швидкості обертання; застосування енергоефективних двигунів; оптимізація аеродинамічних характеристик; автоматичне керування залежно від фактичної потреби.

Частотне регулювання швидкості обертання шляхом зміни частоти живлення асинхронного двигуна за допомогою перетворювача частоти забезпечує найбільшу енергетичну ефективність. При зниженні швидкості обертання пропорційно зменшується продуктивність, квадратично - тиск, кубічно - споживана потужність.

Регулювання частоти обертання вала вентилятора є значно економічнішим методом керування його продуктивністю порівняно з шибєрним способом, хоча й потребує певних додаткових витрат на обладнання. Споживану електродвигуном вентилятора потужність можна визначити за співвідношеннями (ККД вентилятора не враховується):

для регулювання шиббером:

$$P_{1*} = \frac{1+a \cdot S_{\text{НОМ}}}{1-S_{\text{НОМ}}} \cdot Q_*;$$

для регулювання частотою:

$$P_{1*} = Q_*^3 + \frac{(1+a) \cdot S_{\text{НОМ}}}{1-S_{\text{НОМ}}} \cdot Q_*^2.$$

На рис. 2.2 подано графічні залежності, побудовані згідно з наведеними вище формулами. Пунктиром подано криві з урахуванням ККД електродвигуна. Аналіз графіків демонструє, що частотне регулювання практично по всьому діапазону витрат Q забезпечує нижче споживання електроенергії, за винятком точки номінального режиму, де різниця мінімальна.

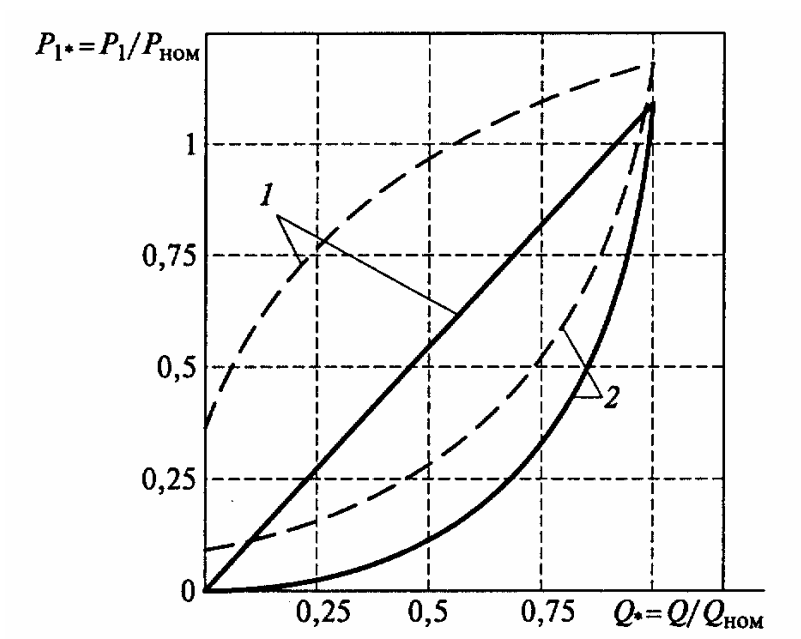


Рисунок 2.2 – Потужність, що споживається ВУ: а) при регулюванні шиббером;
б) при регулюванні частотою.

Застосування енергоефективних двигунів класів ІЕ3, ІЕ4 замість стандартних ІЕ1, ІЕ2 дозволяє знизити втрати у двигуні на (15-30)%. При безперервному режимі роботи термін окупності становить 3-5 років.

Оптимізація аеродинамічних характеристик вентилятора включає: заміну робочих коліс на більш ефективні конструкції, зменшення радіальних та осьових зазорів, застосування профільованих лопаток, поліпшення стану внутрішніх поверхонь корпусу.

Автоматичне керування залежно від фактичної потреби у продуктивності вентиляції на основі вимірювання концентрації забруднюючих речовин, температури, вологості дозволяє уникнути роботи з надлишковою продуктивністю. Економія енергії може становити (20-40)%.

Проведений аналіз свідчить про суттєві переваги частотного регулювання швидкості обертання АД. Розглянемо більш детально його застосування в системах вентиляції ОЕВ.

2.1.2. Аналіз графіків навантаження вентиляційних систем. Детальний аналіз режимів роботи вентиляційних систем типового олійноекстракційного заводу показує значну нерівномірність навантаження як у часі, так і залежно від технологічних режимів. Можна виділити сезонну, добову та технологічну нерівномірність.

Для підприємств, що працюють на місцевій сировині, характерна виражена сезонність з максимальним завантаженням у період заготівлі (серпень-листопад) та зниженням навантаження у міжсезонний період. Коефіцієнт завантаження аспіраційних систем змінюється від 0,9-1,0 у період заготівлі до 0,4-0,7 у міжсезоння.

Навіть при безперервному технологічному процесі спостерігається добова нерівномірність навантаження вентиляційних систем. Загальнообмінна вентиляція працює з підвищеною продуктивністю в денний час (коефіцієнт завантаження (0,8-0,9) і зі зниженою в нічний час (0,4-0,6).

Навантаження аспіраційних систем залежить від режиму роботи технологічного обладнання. При переробці сировини різної вологості, засміченості змінюються вимоги до продуктивності аспірації. Коефіцієнт завантаження може змінюватися від 0,5 до 1,0 протягом зміни.

2.2 Оцінка доцільності встановлення частотнорегульованого електроприводу в системах вентиляції ОЕВ

Розглянемо основні вентиляційні системи ОЕВ з точки зору встановлення регульованого електроприводу.

Аспіраційна вентиляція, що призначена для видалення пилу з транспортних, дробильних та пресових ділянок, має змінний характер навантаження, тобто кількість пилу залежить від подачі сировини, типу насіння, вологості тощо. Частотне регулювання дозволяє адаптивно змінювати продуктивність вентилятора залежно від реальної кількості пилу. Зменшення швидкості обертання при неповному завантаженні знижує споживання енергії до (30–50) %, зменшується шум, знос повітропроводів, навантаження на фільтри.

Можливо зробити висновок, що аспіраційні системи є найбільш доцільним об'єктом для встановлення ПЧ. Частотне регулювання рекомендується впроваджувати в першу чергу.

Сушильна вентиляція призначена для подачі нагрітого повітря у сушильні агрегати для видалення вологи з насіння. Характер навантаження змінюється залежно від вологості сировини, температури навколишнього середовища. Частотне керування може застосовуватись для регулювання інтенсивності сушіння: коли продукт сухий, вентилятор починає працювати на зниженій швидкості. Однак продуктивність сушіння тісно пов'язана з тепловим балансом, надмірне зниження швидкості може порушити рівномірність температурного поля. Тобто, доцільно застосовувати ПЧ у режимі плавного регулювання при автоматичному контролі температури, це призводить до помірної економічної ефективності енергозбереження (10–20%).

Вибухозахищена вентиляція призначена для видалення парів гексану в зонах екстракції, десольвентації, рециркуляції розчинника. Характер навантаження постійний, режим безперервний і критично важливий для безпеки. У таких системах не допускається зміна об'єму повітря нижче нормативного мінімуму, щоб не створити вибухонебезпечну концентрацію. Частотний привід

можна застосовувати лише для плавного пуску та зупинки вентилятора або стабілізації тиску, але не для економії енергії. Двигун і ПЧ мають бути сертифіковані для вибухонебезпечних зон. Це обмежує доцільність частотного регулювання.

Вакуумна вентиляція (вакуум-система) призначена для створення розрідження у процесах екстракції, десольвентації, конденсації парів розчинника. Характер навантаження стабільний, але залежний від стану технологічного процесу. Частотне регулювання дозволяє точно підтримувати розрідження без дроселювання вакуумного насосу. У таких системах важлива стабільність тиску, тому ПЧ застосовується для плавного регулювання, а не для енергозбереження. Частотне регулювання доцільно при необхідності точного стабілізування вакууму, особливо у системах автоматизованого керування.

Загальнообмінна вентиляція призначена для підтримання мікроклімату в цехах, компенсації повітря після аспірації, зниження температури. Характер навантаження змінний (залежить від сезону, кількості працюючого обладнання). Частотне регулювання дозволяє зменшувати продуктивність вентилятора у холодний період або при частковому завантаженні виробництва. Застосовується в поєднанні з датчиками температури, тиску та CO₂. Частотне регулювання ефективно і технічно безпечно.

Загальні висновки про доцільність встановлення частотного регулювання в системах вентиляції ОЕВ наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Підсумкова таблиця доцільності застосування частотного регулювання в системах вентиляції ОЕВ

Тип системи	Режим роботи	Змінність навантаження	Доцільність ПЧ	Очікувана економія
Аспіраційна	Змінний	Висока	Висока	30–50 %
Сушильна	Змінний	Середня	Помірна	10–20 %
Вибухозахищена	Постійний	Мінімальна	Обмежена	≤5 %
Вакуумна	Стабільний	Невелика	Помірна	10–15 %
Загальнообмінна	Сезонно-змінний	Висока	Висока	25–35 %

Проведений аналіз показує, що частотне регулювання швидкості вентиляторів найдоцільніше впроваджувати у аспіраційних системах через високу змінність навантаження та великий потенціал енергозбереження; у загальнообмінних системах для адаптації повітрообміну до реальних умов цеху. Менш ефективним є його застосування у сушильних, вакуумних і особливо вибухозахищених системах, де ключовим фактором є стабільність і безпека, а не економія енергії.

2.3 Сучасні перетворювачі частоти

2.3.1. Загальна характеристика та вибір структури перетворювача.

Сучасні перетворювачі частоти (ПЧ) характеризуються високим рівнем технічного розвитку й широким застосуванням у промислових електроприводах. На ринку представлені як глобальні виробники - *Mitsubishi, Hitachi, ABB, Siemens* - так і невеликі компанії, а з 1990-х років випуск ПЧ активно налагоджено і в Україні.

Стрімкий розвиток перетворювачів пов'язаний із впровадженням новітньої силової елементної бази, зокрема модулів IGBT, IPM та інших напівпровідникових технологій, що забезпечили значне підвищення надійності, ефективності й компактності обладнання.

Більшість сучасних частотних перетворювачів загальнопромислового призначення працюють від трифазних мереж 50/60 Гц з напругою 380...460 В та здатні функціонувати в умовах підвищених вимог до електромагнітної сумісності, вологи, вібрацій та температур (від -10 до +40 °С при відносній вологості до 95 %).

Основні технічні характеристики сучасних ПЧ включають:

- плавне та точне керування динамічними режимами: пуском, гальмуванням та регулюванням швидкості;
- високий ККД і стабільні експлуатаційні параметри;
- широкий частотний діапазон регулювання — до 400 Гц;
- можливість підвищення несучої частоти до 15 кГц;

- підтримку ручного, автоматичного, аналогового чи цифрового керування;
- тривалий допустимий час перехідних процесів до 6000 с.

Система захистів у ПЧ зазвичай охоплює:

- обмеження миттєвих струмових кидків до $3,75 I_{\text{ном}}$;
- захист від тривалих перевантажень струму ($1,2 \dots 1,5 I_{\text{ном}}$ протягом 1 хв кожні 10 хв);
- захист від перенапруги (до $1,3 U_{\text{ном}}$) та зниження напруги (до $0,65 U_{\text{ном}}$);
- контроль втрати фази;
- електронний та програмований захист від перегріву;
- контроль зупинки асинхронного двигуна.

Таким чином, сучасні перетворювачі частоти забезпечують енергоефективне, надійне й точно кероване управління електроприводами, а їх широкий набір функцій та захистів робить їх ключовим елементом сучасних автоматизованих систем.

Залежно від характеру навантаження ПЧ забезпечує різні режими управління електродвигуном, реалізуюючи ту або іншу залежність між швидкістю обертання електродвигуном і вихідною напругою.

Перетворювач частоти приєднується між мережею та двигуном, що впливає на швидкість обертання двигуна, тобто - на потужність, що підводиться до навантаження, завдяки чому виключається необхідність використання інших енергоємних регулюючих засобів.

Частота обертання поля n_0 в двигуні визначається частотою напруги живлячої мережі f_1 :

$$n = n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (2.1)$$

де p - число пар полюсів АД.

Фактична швидкість обертання ротора з урахуванням ковзання s :

$$n = n_0 \cdot (1 - s) = (60 \cdot f_1 / p) \cdot (1 - s). \quad (2.2)$$

Таким чином, зміна частоти живлення f_1 призводить до пропорційної зміни швидкості обертання, що є основою частотного методу регулювання.

Електромагнітний момент асинхронного двигуна описується формулою Клосса [3]:

$$M = \frac{2M_{\max}}{\left(\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s} \right)}, \quad (2.3)$$

де M_{\max} – максимальний (критичний) момент АД; $s_{\text{кр}}$ – критичне ковзання. Максимальний момент, наближено, визначається як [2]:

$$M_{\max} = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2\omega_1(\eta + x_{1\Sigma})}, \quad (2.4)$$

де $\omega_1 = 2\pi f_1$ – кутова частота; U_1 – фазна напруга статора; $x_{1\Sigma}$ – сумарний індуктивний опір розсіювання.

Основний принцип частотного керування полягає у підтриманні постійного магнітного потоку Φ при зміні частоти для забезпечення максимального моменту у всьому діапазоні швидкостей [4]. Оскільки $\Phi \sim U_1/f_1$, необхідно одночасно змінювати напругу та частоту.

Отримані результати суттєво залежать від конкретної реалізації підсистеми «перетворювач - двигун», тобто від того, як організований регульований електропривод.

В сучасних частотнорегулюючих асинхронних електроприводах широко застосовуються дворівневі перетворювачі частоти (ДПЧ) з проміжною ланкою постійного струму. Основними елементами таких перетворювачів є випрямляч, фільтр проміжної ланки постійного струму і автономний інвертор.

Типова структура перетворювача частоти включає наступні основні блоки (рис.2.3) [4]:

- некерований випрямляч (НВ): перетворює змінну напругу мережі (380 В, 50 Гц) у постійну напругу ланки DC (≈ 540 В);

- фільтр ланки постійного струму: згладжує пульсації випрямленої напруги (застосовується конденсаторна батарея великої ємності);
- автономний інвертор напруги (АІН): перетворює постійну напругу у змінну регульованої частоти та амплітуди;
- система керування: генерує керуючі сигнали для силових ключів інвертора.

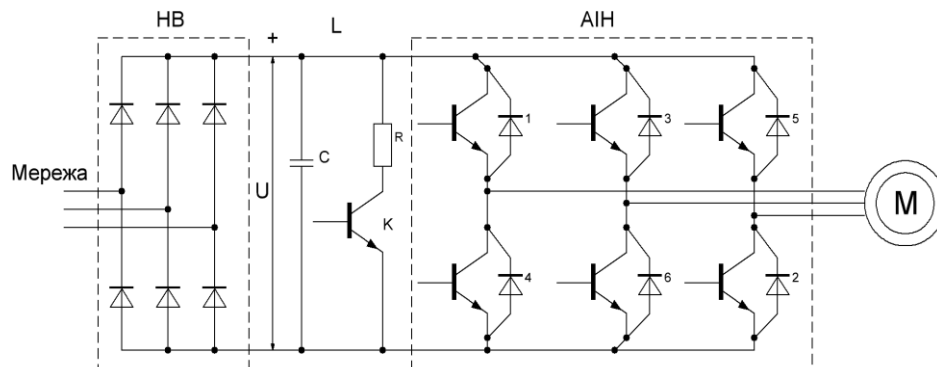


Рисунок 2.3 - Структура силовій частини перетворювача частоти з ШІМ

Автономний інвертор працює в режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) вихідної напруги. У випадку необхідності в схему силових кіл крім головного вимикача, лінійних запобіжників, головного контактора вмикається фільтр електромагнітної сумісності, вхідний комутуючий реактор, синусоїдальний фільтр і вихідний реактор.

Принцип широтно-імпульсної модуляції полягає в формуванні синусоїдальної напруги змінної амплітуди, що здійснюється шляхом високочастотного перемикавання ключів інвертора. Вихідна напруга представляє собою послідовність імпульсів, середнє значення яких за період модуляції відповідає заданій синусоїді.

Коефіцієнт амплітудної модуляції:

$$m_a = U_{m^*}/U_d,$$

де U_{m^*} - амплітуда опорного сигналу; U_d – напруга ланки постійного струму.

Коефіцієнт частотної модуляції:

$$m_f = f_{\text{нec}}/f_1.$$

Для зменшення втрат від комутації та акустичного шуму частота ШІМ зазвичай становить 2-16 кГц.

2.3.2. Класифікація методів частотного керування. За принципом формування керуючих впливів методи частотного керування асинхронними двигунами поділяються на дві основні групи [8]: скалярні та векторні.

Скалярне керування базується на підтриманні заданих співвідношень між амплітудою та частотою напруги (струму) статора без контролю положення вектора потокозчеплення. Характеризується простотою реалізації, але обмеженими динамічними властивостями.

Для підтримання постійного магнітного потоку $\Phi = \text{const}$ необхідно забезпечити [8]:

$$U_1/f_1 = \text{const.}$$

В цьому випадку механічні характеристики $n = f(M)$ при різних частотах мають приблизно однаковий максимальний момент. Це забезпечує можливість роботи двигуна з номінальним навантаженням у всьому діапазоні регулювання швидкості.

Верхня межа діапазону регулювання визначається номінальною частотою $f_{\text{ном}} = 50$ Гц. Подальше підвищення частоти (режим послаблення поля) можливе, але супроводжується зниженням моменту. Нижня межа обмежена зменшенням жорсткості механічних характеристик та погіршенням умов охолодження при зниженні швидкості вентилятора на валу двигуна.

Перевагами скалярного керування являється: простота реалізації (не потребує складних обчислень та високопродуктивних мікропроцесорів); надійність (відсутність зворотних зв'язків за положенням ротора спрощує систему); можливість керування групою двигунів від одного ПЧ; низька вартість (на 20-30% дешевше векторних систем); достатня точність (для більшості технологічних процесів похибка складає 2-5%).

Тоді як до недоліків варто віднести: обмежені динамічні властивості (час реакції на збурення 0,5-2 с); зниження моменту на низьких швидкостях (при $f <$

5 Гц $M \approx 0,4-0,6 M_{\text{ном}}$); чутливість до параметрів двигуна; неможливість точного керування моментом (момент залежить від навантаження); нестійкість при малих швидкостях.

Векторне керування забезпечує незалежне керування складовими струму статора, що відповідають за магнітний потік та момент двигуна, шляхом орієнтації системи координат по вектору потокозчеплення ротора або статора. Характеризується високими динамічними показниками. Концепція роз'єданого керування розглядає можливість незалежного керування потоком та моментом асинхронного двигуна аналогічно двигуну постійного струму з незалежним збудженням.

В асинхронному двигуні струм статора i_s має дві складові: намагнічуючу складову по осі d, що створює потік та моментну складову по осі q, що створює момент.

Для реалізації векторного керування використовуються перетворення Кларка ($abc \rightarrow \alpha\beta$) та Парка ($\alpha\beta \rightarrow dq$) [5]. При перетворенні Кларка трифазна система замінюється двофазною: $i_\alpha = i_a$; $i_\beta = (i_a + 2 \cdot i_b)/\sqrt{3}$. При перетворенні Парка нерухома система замінюється обертовою системою координат:

$$i_d = i_\alpha \cdot \cos(\theta) + i_\beta \cdot \sin(\theta) \quad i_q = -i_\alpha \cdot \sin(\theta) + i_\beta \cdot \cos(\theta),$$

де θ – кут орієнтації системи координат (зазвичай кут вектора потокозчеплення ротора).

До методів векторного керування відноситься пряме векторне керування (з датчиком положення ротора), непряме векторне керування без датчика та прямий контроль моменту (DTC).

У першому варіанті використовується датчик для точного виміру кута повороту ротора θ_r . Це забезпечує найвищу точність керування моментом (похибка $< 1\%$) та швидкодію (час реакції < 20 мс).

У другому варіанті положення вектора потоку ротора θ_ψ обчислюється на основі математичної моделі двигуна за вимірюваними струмами та напругами статора. Для підвищення точності безсенсорного векторного керування

використовуються: спостерігач повного порядку (на основі повної моделі двигуна); спостерігач зниженого порядку (використовує лише вимірювані змінні); розширений фільтр Калмана (оптимальна оцінка стану при наявності шумів); MRAS (Model Reference Adaptive System) (адаптивна система з еталонною моделлю).

Принцип методу прямого контролю моменту базується на безпосередньому керуванні потокозчепленням статора та моментом шляхом вибору оптимальних векторів напруги. До переваг цього методу відноситься відсутність ПІ-регуляторів струму та перетворень координат, надзвичайно швидка реакція на зміну моменту (< 1 мс), проста структура керування, не потребує точних параметрів двигуна. Але присутні і недоліки DTC: змінна частота комутації (підвищений акустичний шум), пульсації моменту та струму, високі вимоги до обчислювальної потужності. Загальне техніко-економічне порівняння систем керування наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Таблиця порівняльних характеристик законів керування

Показник	Скалярне U/f	Векторне без датчика	Векторне з датчиком	DTC
Точність регулювання швидкості	$\pm(2-5)\%$	$\pm(0,5-1)\%$	$\pm(0,2-0,5)\%$	$\pm(0,3-0,7)\%$
Діапазон регулювання	1:(3-5)	1:(50-100)	1:1000	1:(100-200)
Час відгуку на збурення	0,5-2 с	50-200 мс	20-50 мс	5-10 мс
Перевантажувальна здатність	1,5 $M_{ном}$	2,0 $M_{ном}$	2,5 $M_{ном}$	2,2 $M_{ном}$
Момент при $f = 0$	0	0,3 $M_{ном}$	1,8 $M_{ном}$	0,2 $M_{ном}$
Чутливість до параметрів	Низька	Середня	Середня	Низька
Складність реалізації	Низька	Висока	Дуже висока	Висока
Вартість (для 30 кВт)	110 тис. грн	135 тис. грн	180 тис. грн	145 тис. грн

Вибір конкретної моделі частотного перетворювача для систем вентиляції ОЕВ виконується з врахуванням характеру навантаження ВУ, вимог до точності та діапазону регулювання, враховує економічні розрахунки та приведені у третьому розділі.

2.4 Оптимальне керування асинхронним електроприводом з мінімізацією втрат у міді та теплових втрат

2.4.1. Загальна характеристика втрат у системах асинхронного електроприводу. Ефективність функціонування асинхронного електроприводу визначається сумарними енергетичними втратами, які доцільно класифікувати за фізичною природою їх виникнення.

Електричні втрати розділяються на дві основні категорії. По-перше, це втрати в обмотках, що виникають у статорній та роторній обмотках асинхронного двигуна внаслідок протікання струму через активний опір провідників. По-друге, втрати в магнітній системі (втрати в сталі), які включають втрати від індукованих вихрових струмів та втрати, спричинені циклічним перемагнічуванням осередку.

Втрати в силовому перетворювачі частоти формуються з кількох компонентів: динамічні втрати при комутації та статичні втрати на активному опорі напівпровідників ключів інвертора; резистивні втрати в індуктивних елементах та ємнісних фільтрах ланки постійного струму; додаткові втрати від вищих гармонійних складових, величина яких корелюється з методом широтно-імпульсної модуляції та її частотою.

Додаткові втрати представлені втратами на розсіювання та механічними втратами, які обумовлені силами тертя (сухого та в'язкого) в підшипникових вузлах та аеродинамічними втратами на обертання ротора.

Характерною особливістю електричних втрат в обмотках та перетворювачах є їх залежність від режиму навантаження - ці втрати змінюються пропорційно квадрату струму навантаження:

$$P_{Cu} = 3 \cdot (R_s I_s^2 + R_r I_r^2) = \frac{3}{2} \cdot (R_s i_s^2 + R_r i_r^2) \quad (2.5)$$

$$P_{Inv} = \frac{3}{2} \cdot R_{Inv} i_s^2 \quad (2.6)$$

Сучасні напівпровідникові перетворювачі частоти характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії в межах 95-99%, що обумовлює незначну кількість втрат у перетворювачах відповідно до втрат в електродвигуні. З огляду на це, енергетичними втратами в перетворювачі при розрахунках зазвичай нехтують.

Втрати на розсіювання складно піддаються прямому вимірюванню та аналітичному визначенню, проте встановлено їх пропорційну залежність від квадрата струму ротора. Міжнародні стандарти IS та IEC регламентують ці втрати як фіксовану величину 0,5% від загального балансу втрат. Стандарт IEEE-112 диференціює цей показник в межах 0,9-1,8% залежно від номінальної потужності машини. Малі абсолютні значення дозволяють знехтувати цими втратами в інженерних розрахунках.

Втрати в магнітопроводі розраховуються за емпіричним виразом:

$$P_{Fe} = \frac{3}{2} \cdot (k_{ec} \cdot \omega_e^2 \cdot \psi_m^2 + k_h \cdot \omega_e \cdot \psi_m^2),$$

де k_{ec} визначає коефіцієнт втрат від вихрових струмів, k_h - коефіцієнт гістерезисних втрат, а ψ_m представляє потокозчеплення намагнічування.

Для усталеного режиму роботи справедлива спрощена залежність:

$$P_{Fe} = \frac{3}{2} \cdot (k_{ec} e_m^2 + k_h e_m^2 / \omega_e). \quad (2.7)$$

Практична складність застосування цієї формули пов'язана з обов'язковістю визначення параметрів еквівалентної схеми заміщення, які є нелінійними функціями швидкості обертання. У розрахунках цією нелінійністю також можна знехтувати [6].

Експериментальні дослідження підтверджують зростання втрат у магнітопроводі зі збільшенням частоти обертання двигуна. Крім того, їхня питома вага в структурі загальних втрат стає критичною при регулюванні швидкості в зоні послаблення поля.

Механічні втрати формуються із втрат сухого тертя в опорах підшипників та в'язкого тертя, спричинених аеродинамічним опором при вентиляції двигуна, а також гідравлічним або аеродинамічним опором робочого середовища в турбомеханізмах. Ці втрати не корелюються з навантаженням, проте збільшуються при підвищеній швидкості обертання та становлять 8-12% від сумарних втрат. Механічні втрати не підлягають зниженню за рахунок автоматичного керування, їх впливом можливо знехтувати:

При однозонному частотному регулюванні швидкості визначальними є електричні втрати в обмотках, при цьому втрати в міді статора переважають над втратами в міді роторі.

2.4.2. Зменшення втрат у міді та теплових втрат. Для зниження теплових втрат в асинхронному двигуні доцільно забезпечити максимальне відношення електромагнітного моменту до струму статора двигуна [6]. Такий принцип регулювання дає змогу мінімізувати втрати в міді обмотки статора та підвищити ефективність роботи двигуна в усталеному режимі.

Електромагнітний момент можна змінювати як за рахунок корекції складової струму, що формує момент, так і шляхом впливу на потокозчеплення ротора, яке визначається потокоутворюючою складовою струму статора. Тому необхідно визначити таке співвідношення між складовими струму статора, яке забезпечує потрібний момент при найменшій можливій амплітуді струму.

Для визначення даного співвідношення необхідно представити потокоутворюючу складову струму статора (i_{sd}) як функцію потокозчеплення ротора, тоді як моментоутворюючу складову (i_{sq}) слід виразити через електромагнітний момент і потокозчеплення:

$$i_{sd} = \frac{\psi_r}{L_m}, i_{sq} = \frac{T}{(k_T \cdot \Psi_r)}, \quad (2.8)$$

Після перетворення:

$$i_{s.min}(T) = \sqrt{\frac{2T}{k_T \cdot L_m}}. \quad (2.9)$$

Із системи рівнянь (2.8) можна отримати аналітичний вираз i_{sq} як функцію i_{sd} за умови фіксованого значення електромагнітного моменту:

$$i_{sq} = \frac{T}{(k_T \cdot L_m \cdot i_{sd})} \cdot \quad (2.10)$$

На рис. 2.4 представлено сімейство гіперболічних залежностей $i_{sq}(i_{sd})$, побудованих на основі рівняння (2.10) для трьох дискретних значень моменту. На цьому ж графіку зображено три окружності рівних амплітуд струму, радіуси яких визначено за (2.9) для кожного режиму навантаження. Також показано траєкторію, що відповідає критеріям мінімізації теплових втрат у двигуні.

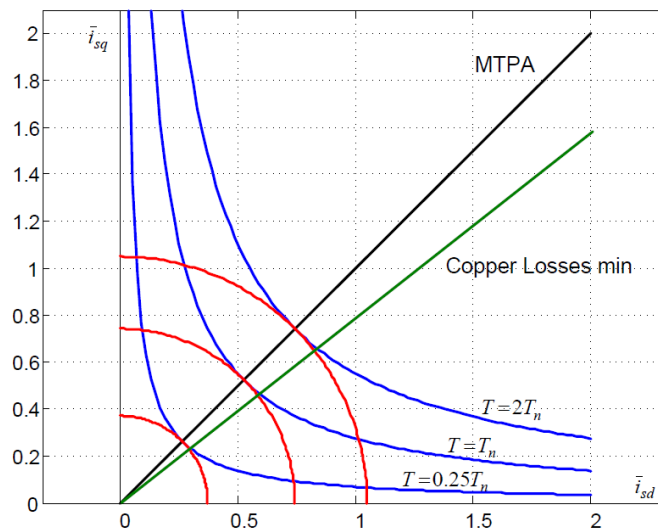


Рисунок 2.4 - Гіперболи постійного моменту, окружності постійного струму та оптимальні траєкторії керування

Підвищення коефіцієнта корисної дії електроприводу досягається шляхом мінімізації сумарних електричних втрат в обмотках статора та ротора в усталених режимах роботи.

$$\Delta P_{\Sigma Cu} = \frac{3}{2} \cdot [R_s i_s^2 + R_r i_r^2] = \frac{3}{2} \cdot [R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2)] \rightarrow \min \quad (2.11)$$

Запишемо поточозчеплення ротора у функції потокоутворюючих компонентів струмів:

$$\Psi_r = L_m i_{sd} + L_r i_{rd}$$

Для усталеного режиму роботи:

$$i_{rd} = 0, \quad i_{rq} = -k_r i_{sq}.$$

Можна спростити рівняння (2.11):

$$\Delta P_{\Sigma Cu} = \frac{3}{2} \cdot \left[R_s i_{sd}^2 + (R_s + k_r^2 \cdot R_r) \cdot i_{rq}^2 \right] \rightarrow \min. \quad (2.12)$$

Досліджуємо на екстремум функцію потокозчеплення. Отримуються результати:

$$\begin{aligned} \Psi_{r opt} &= \sqrt{\frac{2TL_r \lambda}{3z_p}}, & \lambda &= \sqrt{\frac{R_{sr}}{R_s}} = \sqrt{1 + \frac{k_r^2 R_r}{R_s}} > 1; \\ i_{sd opt} &= \sqrt{\frac{T}{k_T L_m}} \lambda, & i_{sq opt} &= \sqrt{\frac{T}{k_T L_m}} \lambda, & \frac{i_{sd opt}}{i_{sq opt}} &= \lambda. \end{aligned}$$

Траекторію, що відповідає мінімальним втратам у міді обмоток статора, зображено на рис. 2.4 позначенням "Copper Losses min".

Мінімальні втрати в міді та коефіцієнт корисної дії, що їм відповідає:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma Cu min} &= \frac{3}{2} \left[R_s i_{sd opt}^2 + (R_s + k_r^2 R_r) i_{sq opt}^2 \right] = \frac{3}{2} \left[R_s \frac{T}{k_T L_m} \sqrt{\frac{R_{sr}}{R_s}} + R_{sr} \frac{T}{k_T L_m} \sqrt{\frac{R_s}{R_{sr}}} \right] = \\ &= \sqrt{R_s R_{sr}} \frac{T}{L_m z_p k_r}, \\ \eta_{opt} &= \frac{P_m}{P_m + \Delta P_{\Sigma Cu min}} = \frac{T\omega}{T\omega + \sqrt{R_s R_{sr}} \cdot \frac{T}{L_m z_p k_r}} = \frac{\omega p k_r L_m}{\omega z_p k_r L_m + \sqrt{R_s R_{sr}}}. \quad (2.13) \end{aligned}$$

Із наведеного виразу випливає, що за умови мінімізації втрат та без урахування інших складових, усталений ККД не змінюється залежно від величини електромагнітного моменту.

У випадку фіксованого потокозчеплення ротора (характерного для стандартних систем векторного керування):

$$\Delta P_{\Sigma Cu} = \frac{3}{2} \left[R_s i_{sd\ opt}^2 + (R_s + k_r^2 R_r) i_{sq\ opt}^2 \right] = \frac{3}{2} \left[R_s \frac{T}{k_T \Psi_{r0}} + R_{sr} \frac{\Psi_{r0}}{L_m} \right],$$

$$\eta_u = \frac{P_m}{P_m + \Delta P_{\Sigma Cu\ min}} = \frac{\omega}{\omega + \frac{3}{2} \left[R_s \frac{1}{k_T \Psi_{r0}} + R_{sr} \frac{\Psi_{r0}}{L_m T} \right]},$$

можна побачити, що зменшення моменту супроводжується падінням коефіцієнта корисної дії.

Номінальне потокозчеплення ротора Ψ_m є тією величиною, що в режимі номінального навантаження забезпечує максимальний ККД і, відповідно, мінімальні сукупні втрати. До цього значення потокозчеплення машина приходить під час прямого пуску при роботі на номінальних параметрах.

У діапазоні $0 < \Psi_r < \Psi_m$ асинхронний двигун зазвичай функціонує на майже лінійній ділянці магнітної характеристики. Проте, коли значення струмових складових відповідають умовам $T_n = T$, машина переходить у режим магнітного насичення. Щоб уникнути цього небажаного явища, потокозчеплення ротора необхідно обмежувати рівнем, що не перевищує номінального. Граничний електромагнітний момент, за якого потокозчеплення сягає встановленої межі, можна визначити з відповідної формули:

$$\Psi_{rMTPA}(T_{lim}) = \sqrt{\frac{2L_r}{3z_p} T_{lim}} = \Psi_m,$$

$$T_{lim\ MTPA} = \frac{3p}{2L_r} \Psi_{rn}^2 = T_n \left(\frac{\Psi_{rn}}{\Psi_{rMTPA}(T_n)} \right)^2.$$

За умови мінімізації повних втрат у міді отримуємо співвідношення:

$$T_{lim\ opt} = \frac{3p}{2L_r \lambda} \Psi_{rn}^2 = T_n \left(\frac{\Psi_{rn}}{\Psi_{r\ opt}(T_n)} \right)^2.$$

Спрощена структурна модель системи, що реалізує зниження втрат у асинхронному приводі, показана на рис. 2.5. У ній контури регулювання струмів за осями d та q (КРС_d і КРС_q) подано у вигляді замкнених ланок, а пропорційний регулятор швидкості формує команду на електромагнітний момент.

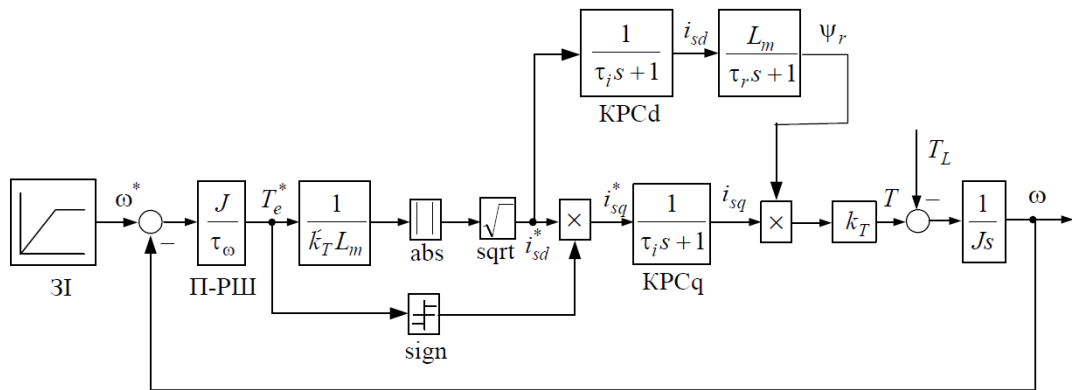


Рисунок 2.5 - Структурна схема базового варіанту системи зменшення втрат в асинхронному двигуні

На схемі позначено постійні часу розімкнених контурів струму та швидкості: τ_i - для струмового регулювання, $\tau_\omega = 2 \tau_i$ - для контуру швидкості. Перехідні процеси, що виникають у такій системі під час зміни навантаження, наведені на рис. 2.6.

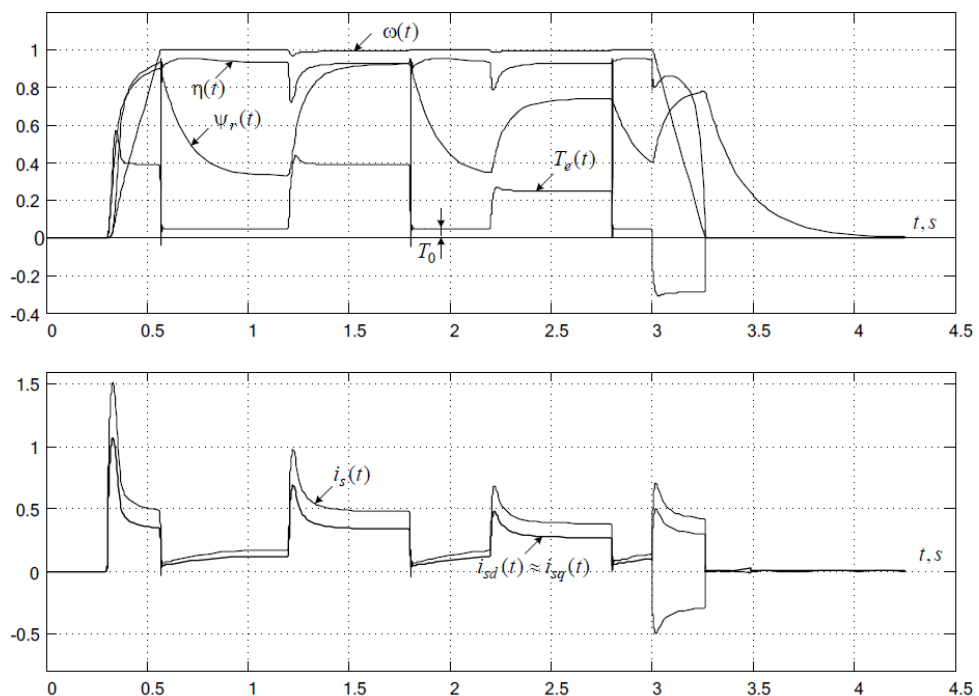


Рисунок 2.6 - Зображення перехідних процесів структурної схеми базового варіанту

Зменшення ККД в системі при зниженні навантаження можна позбутися при безпосередньому регулюванні потокозчеплення ротора у функції моменту, як це показано на структурній схемі рис. 2.7.

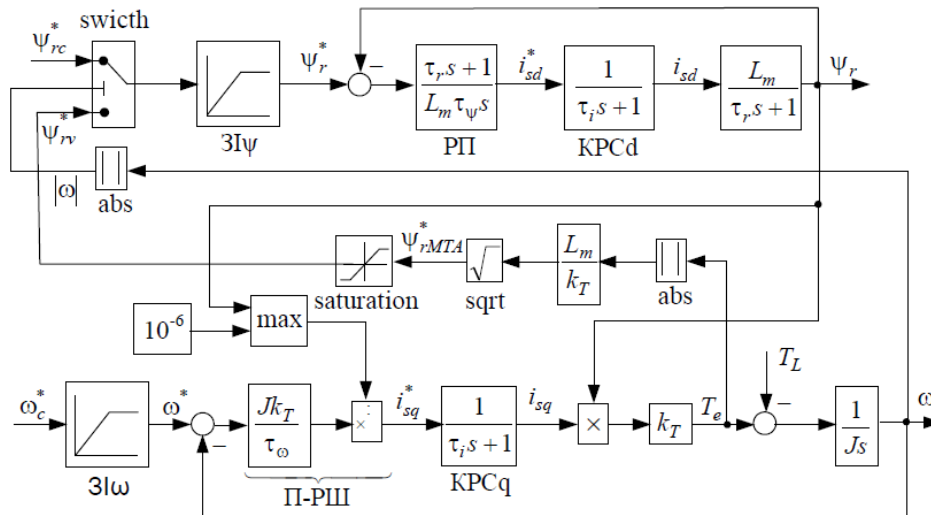


Рисунок 2.7 - Структурна схема алгоритму зменшення втрат для асинхронного двигуна з регулюванням потокозчеплення ротора залежно від моменту

Перехідні процеси у приводі з використанням цієї схеми показано на рис. 2.8.

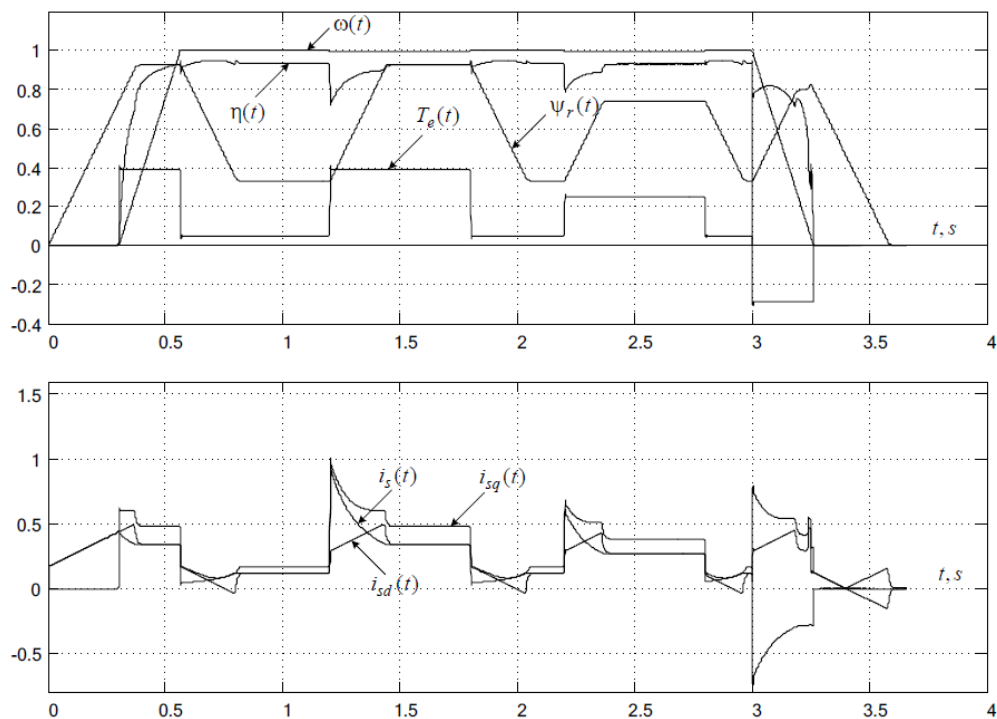


Рисунок 2.8 - Зображення перехідних процесів структурної схеми з регулюванням потокозчеплення ротора залежно від моменту

Завдання на швидкість та потокозчеплення ротора у схемі рис. 2.7 формується задатчиками інтенсивності $3I\omega$ та $3I\psi$ відповідно до лінійного закону. Обмеження значення потокозчеплення реалізується за допомогою блока *saturation*, що фіксує його на номінальному рівні.

За малих або нульових частот обертання завдання на потокозчеплення створюється незалежно від величини електромагнітного моменту. Це забезпечується роботою керованого ключа *switch*, що дає можливість магнітизувати привід перед початком руху та розмагнічувати після зупинки.

У контурі регулювання швидкості передбачено нормування сигналу помилки шляхом ділення на зворотний зв'язок за потокозчепленням ротора. Така адаптація дозволяє компенсувати вплив змін магнітного поля та запобігти зміні динаміки, що підтверджується перехідними процесами на рис. 2.8.

Застосування алгоритму зменшення втрат дає змогу зменшити втрати в міді статора і підтримувати високий коефіцієнт корисної дії у широкому діапазоні навантажень. Хоча при зниженні моменту ККД тимчасово падає, подальше коригування потокозчеплення ротора дозволяє компенсувати ці втрати й забезпечити енергоефективну роботу приводу в усталених та перехідних режимах.

2.5 Оцінка енергетичної ефективності частотного регулювання

Проведемо наближений оціночний аналіз енергетичної ефективності дросельного та частотного регулювання на підставі рівнянь подібності для вентиляторів за формулою (1.1). В розрахунках прийняті такі номінальні параметри вентиляційної системи аспірації:

- продуктивність: $Q_{\text{ном}} = 14000 \text{ м}^3/\text{год}$;
- повний тиск: $\Delta p_{\text{ном}} = 4200 \text{ Па}$;
- ККД вентилятора: $\eta_{\text{вент}} = 0,78$;
- ККД АД: $\eta_{\text{ад}} = 0,92$;
- частота обертання: $n_{\text{ном}} = 2900 \text{ об/хв}$;
- номінальна потужність двигуна: $P_{\text{ном}} = 30 \text{ кВт}$.

Аналіз режимів роботи аспіраційної системи показує, що річний графік навантаження характеризується вираженою сезонною нерівномірністю, що обумовлена циклічністю надходження насіння. Період заготівлі, триває з серпня по листопад (2880 годин) та міжсезонний період, триває з грудня по липень (5880 годин) характеризуються параметрами, що представлені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Характеристика періодів роботи аспіраційної системи

Параметр	Період заготівлі	Міжсезонний період
Інтенсивність переробки	1100-1200 т/добу	400-600 т/добу
Продуктивність аспірації, м ³ /год	$Q = 0,95 \cdot Q_{\text{ном}} = 13300$	$Q = 0,7 \cdot Q_{\text{ном}} = 9800$
Режим роботи, год/добу	тривалий, 20-22	періодичний, 8-12

Добовий графік навантаження у період заготівлі має також змінний характер:

- для робочої зміни 1: $k_3 = 0,90-0,95$ (з 06:00 до 14:00);
- для робочої зміни 2: $k_3 = 0,85-0,90$ (з 14:00 до 22:00);
- для нічної зміни $k_3 = 0,6-0,7$ (з 22:00 до 06:00).

Регулювання продуктивності аспіраційної системи здійснюється вручну дросельною заслінкою, встановленою на всмоктувальному патрубку вентилятора. Оператор змінює положення заслінки залежно від інтенсивності надходження насіння та рівня запиленості повітря в зоні очисного обладнання.

Визначимо споживану електричну потужність двигуна при шиберному та частотному регулюванні для періоду заготівлі ($Q = 0,95 \cdot Q_{\text{ном}}$) та міжсезонного періоду ($Q = 0,7 \cdot Q_{\text{ном}}$) по рис.3.4.4 [1]. Отримані данні зведено до таблиці 2.5.

Загальне річне споживання електроенергії складає:

- при шиберному регулюванні:

$$E_{\text{рік.шиб.}} = E_{\text{рік1шиб}} + E_{\text{рік2шиб}} = 84672 + 132888 = 217560 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

- при частотному регулюванні:

$$E_{\text{рік.чр}} = E_{\text{рік1чр}} + E_{\text{рік2чр}} = 69696 + 84084 = 153780 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Таблиця 2.5 - Наближений аналіз енергетичної ефективності різних видів регулювання

Параметр	Позначення, одиниці виміру	Шибєрне		Частотне	
		Період заготівлі	Міжсезонний період	Період заготівлі	Міжсезонний період
Продуктивність	Q , м ³ /год	13775	10150	13775	10150
Споживана електрична потужність	$P_{ел}$, кВт	29,4	22,6	24,2	14,3
Тривалість періоду	T , год	2880	5880	2880	5880
Річні витрати ел.енергії,	E , кВт·год	84672	132888	69696	84084
Підсумок	E_{Σ} , кВт·год	217560		153780	

Економія електроенергії при переході на частотне регулювання:

$$\Delta E_{рік.Σ} = E_{рік.шиб} - E_{рік.чр} = 217560 - 153780 = 63780 \text{ кВт·год.}$$

При вартості електроенергії для підприємства $C_o = 5,0$ грн/ кВт·год. економія коштів складає:

$$C_{рік.Σ} = C_o \cdot \Delta E_{рік.Σ} = 5,0 \cdot 63780 = 318900 \text{ грн.}$$

Оцінимо термін окупності. Капітальні витрати на впровадження:

- перетворювач частоти АВВ АС5580-01-038А-4 (37 кВт), $K_{пч} = 110000$ грн;
- датчики (тиску, витрати): $K_d = 15\ 000$ грн;
- монтажні матеріали, кабелі: $K_m = 8\ 000$ грн;
- шафа управління: $K_{ш} = 12\ 000$ грн;
- загальні витрати на обладнання: $K_{нов.обл.} = 145\ 000$ грн.
- роботи з монтажу: $K_{р.м} = 0,6 \cdot 145\ 000 = 87000$ грн;
- пусконаладження: $K_{п} = 0,1 \cdot 145\ 000 = 14\ 500$ грн.

Загальні витрати: $K_{\Sigma} = K_{нов.обл.} + K_{р.м} + K_{п} = 145\ 000 + 87\ 000 + 14\ 500 = 246\ 500$ грн.

Простий термін окупності:

$$T_{пч} = \frac{K_{\Sigma}}{C_{рік. \Sigma}} = \frac{246,5}{319,9} = 0,77 \text{ року } (\sim 9 \text{ місяців}).$$

Розрахунок показав, що при шибєрному регулюванні вентиляційної установки з двигуном потужністю 30 кВт річні витрати електроенергії становлять близько 217,6 тис. кВт·год. Застосування частотного регулювання із законом зміни потужності за кубічною характеристикою дозволяє зменшити споживання до 153,8 тис. кВт·год/рік. Орієнтовна річна економія електроенергії становить \approx 64 тис. кВт·год, що відповідає зниженню витрат на електроенергію приблизно на 30%.

Для оцінювання інвестиційної ефективності проєкту виконується фінансовий аналіз, який дає змогу встановити його економічну доцільність та визначити найбільш вигідний варіант серед можливих альтернатив. Під час порівняння інвестиційних рішень застосовують обов'язкові показники ефективності, зокрема: період окупності (*DPP*), чисту приведену вартість (*NPV*), внутрішню норму рентабельності (*IRR*).

Дослідження економічної результативності впровадження ЧРЕП вентиляційної установки здійснюється на основі порівняння витрат на реалізацію проєкту та прогнозованої економії коштів від його роботи.

Розрахунки виконуються за таких передумов: тривалість життєвого циклу приймається 10 років, крок планування - 1 рік, всі розрахунки ведуться у гривнях, повернення інвестицій досягається завдяки щорічному зменшенню витрат на оплату електричної енергії, капітальні вкладення розподіляються рівномірно протягом строку дії проєкту із застосуванням дисконту за внутрішньою ставкою 10 %, річна економія та експлуатаційні витрати не змінюються протягом всього періоду, ставка дисконту враховує прогнозоване підвищення тарифів на електроенергію на рівні 10 %.

Базовим обрано 2024 рік, показники якого використовуються як вихідні дані для оцінювання економічної вигоди впровадження частотнорегульованого електроприводу.

Ефективність проєкту визначається за ключовими критеріями: внутрішньою нормою рентабельності, простим та дисконтованим строками окупності, а також чистою приведеною вартістю.

Дисконтовані грошові потоки:

$$CF_t = \frac{318960}{(1 + 0.1)^t}.$$

Уже за перший рік:

$$CF_1 = \frac{318960}{1.1} = 289055 \text{ грн.}$$

Кумулятивний дисконтований потік після 1-го року:

$$-246\,500 + 289\,055 = 42\,555 \text{ грн} > 0.$$

Тобто проєкт окупається ще до кінця першого року з урахуванням дисконту.

Якщо точніше, дисконтований термін окупності:

$$T_{DPP} = K_{\Sigma} / CF_1 = 246\,500 / 289\,055 = 0,85 \text{ року} \approx 10,2 \text{ місяця}$$

Визначимо чисту приведену вартість (*NPV*):

$$NPV = -K_{инв} + \sum_{i=1}^{10} \frac{E_{рик}}{(1+i)^t} \%.$$

Використовуємо коефіцієнт приведення ануїтету:

$$AF = \frac{1 - (1+i)^{-10}}{i} = \frac{1 - 1.1^{-10}}{0.1} = 6.1446 \%.$$

Розрахунок приведених доходів:

$$PV=318\,960 \times 6,1446 = 1\,957\,871 \text{ грн.}$$

Тоді: $NPV = 1\,957\,871 - 246\,500 = 1\,711\,371$ грн.

Чиста приведена вартість становить $\approx 1,71$ млн грн, що вказує на високу інвестиційну привабливість.

Внутрішня норма рентабельності (IRR) це така ставка r , при якій:

$$0 = -K_{инв} + \sum_{i=1}^{10} \frac{E_{рік}}{(1+r)^i} .$$

Чисельно (методом підбору/ітерацій):

- при $r = 100\%$ NPV ще > 0 ;
- при $r \approx 129\%$ $NPV \rightarrow 0$.

Після розрахунку отримаємо $IRR \approx 1,29 = 129\%$ річних

Внутрішня норма рентабельності $\approx 129\%$ в рази перевищує ставку дисконту 10% .

За умови річної економії експлуатаційних витрат $318,96$ тис. грн та загальних капітальних вкладень у впровадження частотнорегульованого електропривода вентилятора в розмірі $246,5$ тис. грн простий термін окупності проєкту становить близько $0,77$ року (≈ 9 місяців). Дисконтований термін окупності при ставці дисконту 10% становить орієнтовно $0,85$ року (≈ 10 місяців), що свідчить про повернення інвестицій уже в перший рік експлуатації.

Розрахована чиста приведена вартість (NPV) за період 10 років дорівнює близько $1,71$ млн грн, а внутрішня норма рентабельності (IRR) становить приблизно 129% річних, що значно перевищує прийняту ставку дисконту 10% . Таким чином, проєкт модернізації вентиляційної установки із застосуванням перетворювача частоти є високоефективним та інвестиційно привабливим.

Крім отриманого економічного ефекту впровадження регульованого електроприводу вентиляційної установки дозволяє отримати додаткові переваги. До них відносяться: підвищення надійності обладнання, зниження витрат на ремонтні роботи, зниження рівня шуму, зменшення викидів CO_2 .

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ

Загальну структуру частотнорегульованого асинхронного електроприводу вентиляційної установки зображено на рис. 3.1.

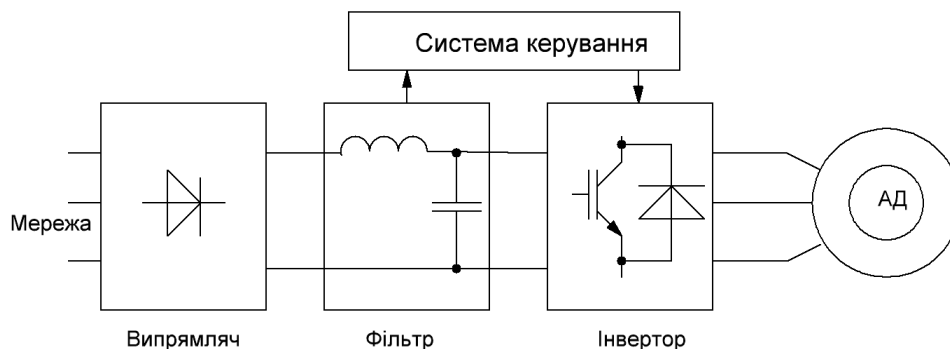


Рисунок 3.1 – Структура ЧР АЕП вентиляційної установки

Основними блоками такої системи являються: перетворювач частоти, асинхронний двигун, система керування, навантаження (вентилятор). Детально розглянемо математичні моделі цих блоків, що обираються для проведення дослідження.

3.1 Математичні моделі асинхронного двигуна в різних системах координат та вибір моделі дослідження

Математичні моделі асинхронного двигуна застосовуються для різних задач. Серед них можна виділити аналіз динамічних процесів (перехідні процеси при пусках та зупинках, зміні навантаження); оцінка енергоефективності системи та втрат; розробка систем керування (U/f, FOC, DTC, МТРА, МРС); симуляція у середовищах (MATLAB/Simulink), ідентифікація параметрів і діагностичні алгоритми [5].

Різні моделі мають різну складність і область застосування. Розглянемо основні моделі, такі як: фазна, нерухома двовимірна, обертова, спрощена або розширена.

Фазна модель (abc) описує пофазні струми, напруги і потоки та застосовується у разі необхідності точної симуляції гармонік, симетрії або асиметрії фаз, переходів з урахуванням конкретних фазних збурень. Така модель містить часозалежні гармоніки, громіздка для контролю та не виділяє незалежні складові потоку і моменту.

Спрощена модель з загальним потоком ротора (flux-oriented) оцінює роторний потік як стан, дозволяє перейти до простих ПІ-регуляторів. Спрощена лінійна модель застосовується для аналізу стійкості, налаштування регуляторів. Спрощена статична модель дозволяє виконувати розрахунок робочої точки ($S-n$, $P-Q$), коли динаміка не важлива.

Розширені моделі виконуються з урахуванням насичення магнітної системи, нелінійних втрат (гістерезис, вихрові струми), температурного залежного опору та використовуються для високо точних досліджень і діагностики.

Нерухома двовимірна модель ($\alpha-\beta$, Clarke) дозволяє виконати двокомпонентний векторний опис у стаціонарній (нерухомій) системі. Це базова модель для аналізу, для простих ПЛК та ПЧ реалізацій або як проміжок перед $d-q$ перетворенням. Така модель простіша за фазну модель, дає компактні рівняння але все ще містить синхронні коливання, не розділяє потік та момент.

Обертова модель у $d-q$ координатах ($d-q$, Park) застосовується для векторного керування (FOC/DTC) та дозволяє незалежно керувати потоком (d) і крутним моментом (q). Вона зручна для регуляторів, оптимізації потоку, мінімізації втрат, точного контролю на низьких оборотах, але потребують відстеження кута поля (датчик або оцінювач).

Для дослідження динамічних процесів у системі «ПЧ–АД–вентилятор» у середовищі *MATLAB/Simulink* застосовують математичні моделі асинхронного двигуна у різних системах координат: нерухомій (abc) та обертовій (dq).

3.1.1. Модель АД у нерухомій системі координат (abc) та в обертовій системі координат ($d-q$). Скалярний (амплітудно-частотний) закон керування ґрунтується на підтриманні сталого співвідношення $U/f=\text{const}$ між напругою

живлення і частотою обертання поля статора. За цього припущення модуль потоку в сталій області практично незмінний, а момент двигуна пропорційний квадрату прикладеної напруги.

Математичний опис у фазній системі координат має вигляд:

$$\begin{cases} u_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt}, \\ u_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\psi_{sb}}{dt}, \\ u_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\psi_{sc}}{dt}, \\ \psi_{s\{a,b,c\}} = L_s i_{s\{a,b,c\}} + L_m i_{r\{a,b,c\}}, \\ T_e = \frac{3}{2} p L_m (i_{sa} i_{rb} - i_{sb} i_{ra}), \end{cases}$$

де $u_{s(a,b,c)}$ - фазні напруги статора;

$i_{s(a,b,c)}$, $i_{r(a,b,c)}$ - фазні струми статора та ротора;

L_s , L_m - індуктивності розсіювання і взаємна індуктивність;

p - кількість пар полюсів,

T_e - електромагнітний момент.

Для імітації скалярного керування у *Simulink* використовується блок *Asynchronous Machine SI Units* (бібліотека *Simscape Electrical / Specialized Power Systems*), що отримує живлення від інвертора PWM. Напруга формується на основі закону U/f , що задається генератором синусоїдальної частоти.

Механічна частина описується рівнянням руху:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L - B\omega_r,$$

де J - момент інерції, T_L - момент навантаження вентилятора, B - коефіцієнт в'язкого тертя.

Для дослідження системи векторного керування зручно використовувати модель у двовісній синхронній системі координат $d-q$, що обертається разом із полем статора. Така модель дозволяє розділити потік збудження та моментну складову струму, аналогічно до розділення у двигунах постійного струму.

Система рівнянь у координатах $d-q$ має вигляд:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_e \psi_{sq}, \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_e \psi_{sd}, \\ \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd}, \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq}, \\ T_e = \frac{3}{2} p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}), \end{cases}$$

де u_{sd} , u_{sq} - проекції напруги статора в системі $d-q$;

ω_e - електрична кутова швидкість;

i_{sd} , i_{sq} - струми статора;

ψ_{sd} , ψ_{sq} - потокозчеплення по осях d та q .

Напруги ротора (в $d-q$):

$$\begin{aligned} 0 &= R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{rq}, \\ 0 &= R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{rd}. \end{aligned}$$

Потокозчеплення у матричній формі:

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}.$$

Електромагнітний момент:

$$M_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_{sq}.$$

Векторне керування реалізується шляхом незалежного регулювання струмів i_d та i_q за допомогою ПІ-регуляторів, перетворення координат $abc \leftrightarrow d-q$ та генерації ШІМ сигналів для інвертора.

У *Simulink* для реалізації FOC-системи використовують блок *Asynchronous Machine (d-q)* або той самий *Asynchronous Machine SI Units* із додатковими перетвореннями координат. У першому випадку рівняння реалізуються безпосередньо у просторі $d-q$, що спрощує побудову алгоритму, у другому - порівнюються динамічні характеристики для однакової фізичної моделі двигуна.

Порівнювальну характеристику двох моделей наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Порівняльна характеристика моделей

Ознака	Скалярна модель (U/f)	Векторна модель (FOC)
Система координат	abc (нерухома)	$d-q$ (обертається)
Тип керування	Відкрита система, без зворотного зв'язку	Замкнена система, розділення потоків
Основний блок Simulink	Asynchronous Machine SI Units	Asynchronous Machine (dq)
Реакція на зміну навантаження	Повільна, з ковзанням	Швидка, із компенсацією моменту
Енергоефективність	Середня	Вища на 10–25 %
Складність реалізації	Низька	Висока (ПІ-регулятори, перетворення координат)

Таким чином, для моделювання системи електропривода вентилятора в середовищі *MATLAB/Simulink* доцільно використовувати однакоку фізичну структуру «ПЧ–АД–вентилятор», змінюючи лише закон керування. Для скалярного керування застосовується модель у фазних координатах з підтриманням співвідношення $U/f=\text{const}$, тоді як для векторного - модель у координатах $d-q$, що забезпечує незалежне регулювання потужності та моменту, підвищуючи швидкодію та енергоефективність системи.

3.1.2. Ідентифікація параметрів асинхронного двигуна. В якості силового електромеханічного перетворювача вентиляційної установки обрано асинхронний двигун серії AIP180M2 номінальною потужністю 30 кВт з синхронною частотою обертання 3000 об/хв. Технічні параметри обраного електродвигуна систематизовано в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Технічні характеристики асинхронного двигуна вентиляційної установки

Параметр	Марка двигуна	$U_{\text{ном}}$	$P_{\text{ном}}$	n	$M_{\text{п}}/M_{\text{н}}$	$\cos\varphi$	$M_{\text{max}}/M_{\text{н}}$	$\eta_{\text{ном}}$	$J_{\text{д}}$
Од.вимір.	-	В	кВт	об/хв	-	-	-	-	кг·м ²
Значення	AP 180 M2	380	30	2950	2,0	1,15	2,3	0,914	0,07

Розрахунок параметрів математичної моделі асинхронного двигуна здійснено з використанням вбудованої функції програмного середовища Matlab «power_Asynchronous Machine Params». Дана функція забезпечена графічним користувацьким інтерфейсом і дозволяє визначити параметри еквівалентної схеми заміщення асинхронної машини на основі каталогових даних.

Аналітична залежність, що описує механічну характеристику відцентрового вентилятора, має вигляд:

$$\begin{aligned}
 M_c &= M_0 + (M_{\text{ном}} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 = 2,93 + (97,78 - 2,93) \left(\frac{\omega}{314,16} \right)^2 = \\
 &= 2,93 + 94,85 \cdot \left(\frac{\omega}{314,16} \right)^2
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

де M_c – електромагнітний момент опору на валу асинхронного двигуна, Н·м;
 $M_{\text{ном}}$ – номінальний момент асинхронного двигуна, Н·м; M_0 – момент холостого ходу асинхронного двигуна, Н·м:

$$M_0 = 0,03 \cdot M_{\text{ном}} = 0,03 \cdot 97,78 = 2,93 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Програмна реалізація блоку імітаційної моделі механічної характеристики вентиляційної установки в середовищі Simulink представлена в наступних підрозділах роботи.

3.2 Математична модель вентиляційного навантаження

Об'єктом керування в досліджуваній системі електроприводу є відцентровий вентилятор типу ВЦ 6-28 №10. Основні технічні параметри даної вентиляційної установки систематизовано в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Технічні параметри відцентрового вентилятора ВЦ 6-28 №10

Тип ВВ	ЕД		L_1 , мм	L_w , дБА
	тип	Потужність, кВт		
ВЦ 6-28 №10	АІР180М2	30	1000	107

Функціональна залежність статичного тиску P від об'ємної витрати повітря Q формує напірну (аеродинамічну) характеристику вентилятора. Конфігурація цієї залежності визначається конструктивними особливостями конкретної моделі вентиляційної установки та документується виробником у вигляді табличних даних або графічних залежностей у технічній документації на обладнання.

Використання Q-P характеристик у табличному або графічному форматі створює значні обмеження для побудови адекватної математичної моделі системи. Тому доцільним є застосування аналітичного виразу, що описує аеродинамічну характеристику вентиляційної установки.

Для визначення аналітичної форми Q-P залежності застосовано метод лінійного регресійного аналізу. Запропоновано апроксимувати аеродинамічну характеристику вентиляційної установки поліноміальною функцією другого порядку.

На рис. 3.2 представлено порівняння Q-P характеристик вентиляційної установки: вихідної залежності, побудованої за каталожними даними виробника, та апроксимуючої функції у вигляді квадратичного поліному.

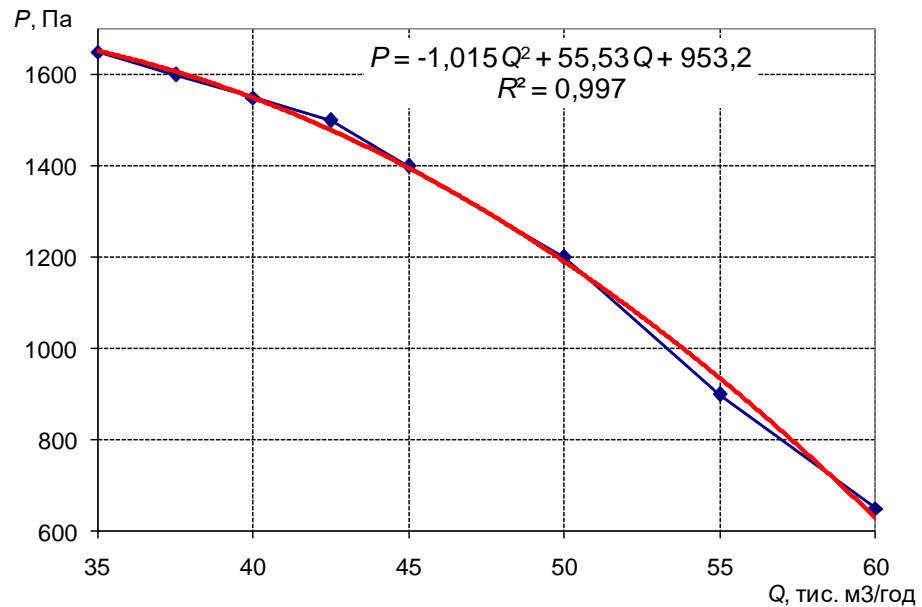


Рисунок 3.2 - Аеродинамічні характеристики вентиляційної установки:
1 – каталожні дані виробника; 2 – апроксимація квадратичним поліномом

З урахуванням закону подібності для вентиляторів, аналітичний вираз аеродинамічної характеристики вентиляційної установки для довільної швидкості обертання має вигляд:

$$\begin{aligned}
 P(\omega, Q) &= (a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 = \\
 &= (953,2 - 55,53Q - 1,015Q^2) \left(\frac{\omega}{303,68} \right)^2,
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

де P – статичний тиск, Па;

Q – об'ємна витрата повітря, м³/год;

ω – поточна кутова швидкість обертання валу асинхронного двигуна, рад/с;

$\omega_{\text{ном}}$ – номінальна кутова швидкість обертання валу асинхронного двигуна, рад/с;

a_0, a_1, a_2 – коефіцієнти регресійної моделі.

Сімейство Q - P характеристик вентиляційної установки для різних частот обертання валу асинхронного двигуна та відповідні апроксимуючі залежності представлено на рис. 3.3.

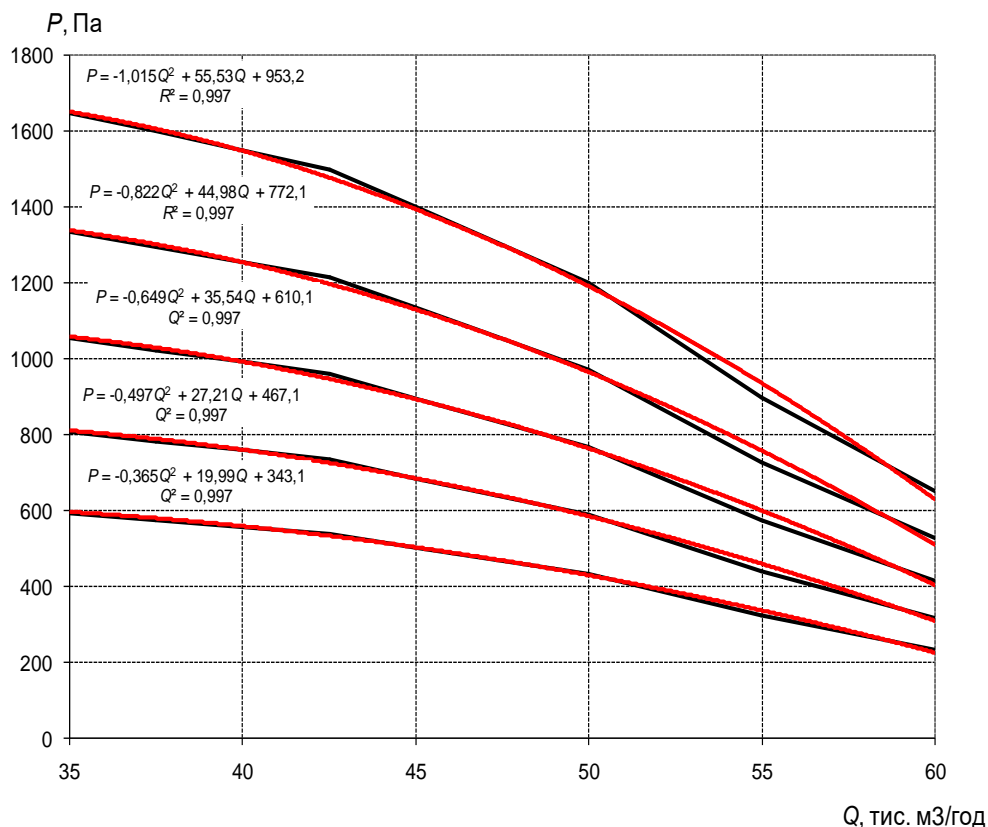


Рисунок 3.3 - Аеродинамічні характеристики вентиляційної установки для різних частот обертання та їх поліноміальна апроксимація

Аналітичний вираз (3.1) формує математичну модель об'єкта керування. Слід зазначити, що запізнювання у часі, яке виникає в процесі регулювання тиску при зміні витрати або швидкості обертання, може бути знехтуване внаслідок його незначної величини порівняно з домінуючими постійними часу системи. За цих умов модель об'єкта керування доцільно представити у вигляді безінерційної (підсилувальної) ланки. Програмна реалізація залежності (3.1) у вигляді імітаційної моделі в середовищі Matlab Simulink наведена в наступних підрозділах роботи.

3.3 Моделювання перетворювача частоти

3.3.1. Вибір частотного перетворювача. При виборі частотного перетворювача для регульованого електроприводу систем вентиляції ОЕВ потрібно враховувати характер навантаження, вимоги до динаміки, діапазон регулювання та економічні міркування. Аналіз зведено до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Вимоги до вибору перетворювача частоти вентиляційних систем ОЕВ

Параметр	Аспірація ОЕЗ	Припливно-витяжна вентиляція
Середовище	Запилене, вибухонебезпечне	Чисте приміщення
Ступінь захисту ЧРП	IP54 (в шафі)	IP20-IP21
Тип керування	Скалярне (достатньо)	Скалярне або векторне
Режим роботи	Безперервний S1	Періодичний S3
Діапазон регулювання	50-100% (25-50 Гц)	30-100% (15-50 Гц)
Комунікація	Modbus RTU	ВАСnet, Modbus
Додаткові функції	Енергооптимізація	Каскад, баланс, PID
Вартість	Середня-висока	Середня
Пріоритет	Надійність	Комфорт, економія

Для типових аспіраційних вентиляторів з двигунами 15-75 кВт та квадратичною характеристикою навантаження скалярне керування є оптимальним вибором, оскільки:

- забезпечує економію електроенергії 40-60% (лише на 3-5% менше векторного);
- має достатню динаміку для технологічного процесу;
- відрізняється простотою налаштування та обслуговування;
- забезпечує нижчу вартість на 30-40% (порівняно з векторним) та має високу надійність.

Векторне керування доцільне лише для спеціальних випадків: системи з вимогами до високої динаміки, широкого діапазону регулювання або складним характером навантаження.

На підставі проведеного аналізу можливо запропонувати декілька моделей перетворювачів частоти для асинхронного двигуна аспіраційної системи зі скалярним керуванням (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 - Порівняльна таблиця рекомендованих моделей ПЧ

Параметр	ABB ACS580	Siemens G120C	Schneider ATV320	Danfoss FC-102
Потужність	37 кВт	37 кВт	37 кВт	37 кВт
Скалярне U/f	+	+	+	+
Векторне FOC	+	+	+	+
Частота ШІМ	4 кГц (2-12)	4 кГц (2-16)	4 кГц	4 кГц
Документація	Відмінна	Відмінна	Добра	Добра
Вартість	110 тис.	115 тис.	80 тис.	90 тис.
Підтримка в UA	Висока	Висока	Середня	Середня

Остаточного обираємо частотний перетворювач ABB ACS580, який надає найкращий баланс функціональності, документації та підтримки. Модель: ACS580-01-038A-4 (37 кВт, 380 В). Характеристики моделі представлено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Характеристики моделі ACS580-01-038A-4

Параметр	Одиниці виміру	Значення
Потужність	кВт	37
Напруга	В	380
Номінальний струм	А	76
Алгоритми	-	Скалярне U/f + векторне FOC
Частота ШІМ	кГц	4 кГц (регульована 2-12 кГц)
Ступінь захисту	-	IP21 (в металевому шафі IP54)
Вбудовані функції	-	ПД-регулятор, режим "сон", енергооптимізація
Комунікація	-	Modbus RTU (стандарт), Profibus/EtherNet (опція)

Перевагами даної моделі перетворювача являється :

- підтримка обох типів керування;

- програма для налаштування: DriveStudio;
- спеціальний режим для вентиляторів/насосів (Pump Control);
- можливість емуляції в ABB DriveSize, надійність та підтримка в Україні.

3.3.2. Математична модель частотного перетворювача для системи вентиляції. Математична модель ACS580 представляє собою модель силової частини (випрямляч, DC-шина, інвертор) та модель керування (U/f або FOC PWM). Перетворювач частоти ACS580 математично описується як 6-пульсний ПЧ.

Математична модель силової частини ПЧ ACS580 має 6-пульсний діодний випрямляч, який можливо описати наступними виразами:

$$U_{dc} \approx 1.35 \cdot U_{LL};$$

$$i_d(t) = \frac{u_{AC}(t) - u_{dc}(t)}{R_s + L_s \frac{d}{dt}},$$

де R_s, L_s - еквівалентний опір та індуктивність мережі і дроселя.

Модель DC-звена:

$$C_{dc} \cdot \frac{du_{dc}}{dt} = i_d - i_{inv},$$

де i_d - струм випрямляча; i_{inv} - струм, який забирає інвертор.

Для ACS580-01-038A-4: $C_{dc} \approx 3400\text{--}4200 \mu\text{F}$; $U_{dc} \approx 540\text{--}580 \text{ В}$.

PWM-інвертор математично описується матрицею перемикачів:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{2} \begin{bmatrix} s_1 - s_4 \\ s_3 - s_6 \\ s_5 - s_2 \end{bmatrix}$$

де $s_i \in \{0,1\}$ - стан ключів.

$$s_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } v_{control} > v_{carrier}(t) \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

Математична модель керування для скалярного режиму:

$$U_s(f) = k \cdot f,$$

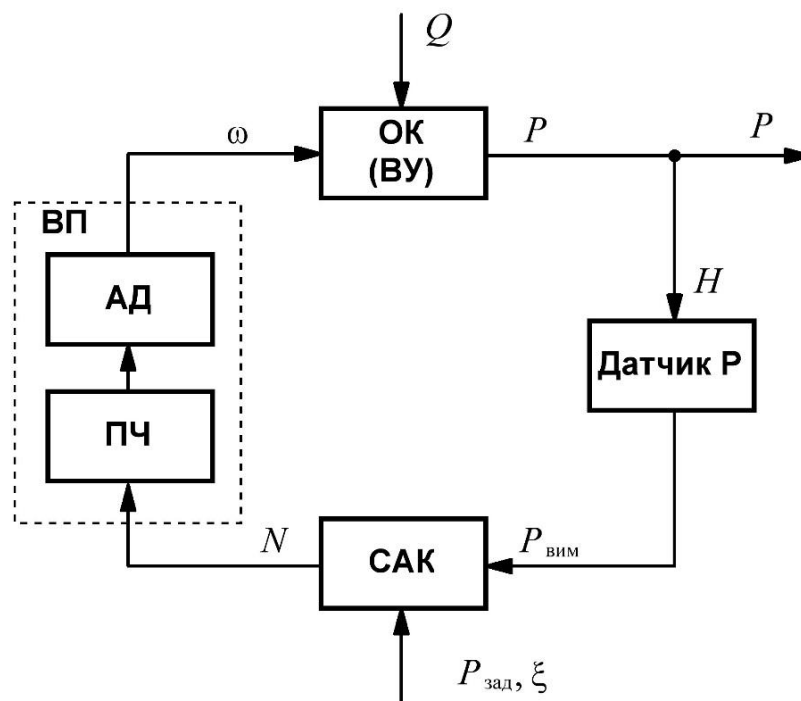
де $k = \frac{U_n}{f_n} = \frac{400}{50} = 8 \text{ В/Гц.}$

Математична модель реального перетворювача частоти ACS580-01-038A-4 описується універсальною моделлю напівпровідникового 6-пульсного випрямляча з DC-ланкою та трифазним PWM-інвертором (VSI). Управління реалізується відповідно до обраного закону: скалярного (U/f).

3.4 Узагальнена модель дослідження

Структурна схема такої моделі (рис.3.4) буде включати до свого складу такі основні блоки:

- блок асинхронного двигуна (АД);
- блок вимірювання тиску (датчик P);



Рисунку 3.4 - Структурна схема моделі дослідження регульованого асинхронного електроприводу вентилятора

- блок навантаження (вентиляційна установка ВУ);
- блок перетворювача частоти (БПЧ);
- блок системи автоматичного керування (САК).

Позначення параметрів системи:

P - фактичний тиск у магістралі (вихідна координата об'єкта керування), м;

$P_{\text{вим}}$ - значення тиску, зафіксоване датчиком;

N – частота обертання вала асинхронного двигуна (вихідний сигнал блоку автоматичного керування);

ω – кутова швидкість обертання вентилятора (керуючий вплив на об'єкт), рад/с;

ξ – набір параметрів, які задають роботу системи автоматичного керування;

$P_{\text{зад}}$ – необхідне (задане) значення тиску у магістралі, %.

Принцип роботи системи. При зміні зовнішніх умов (наприклад, зміна продуктивності Q) змінюється фактичний тиск вентиляційної установки. Датчик тиску вимірює це значення і передає його до блоку керування. У блоці, відповідно до вибраного алгоритму САК, формується керуючий сигнал N - необхідна швидкість обертання двигуна, що компенсує різницю між заданим та фактичним тиском.

Сформований сигнал N надходить до виконавчого пристрою, тобто частотного перетворювача електроприводу, який генерує значення керованої кутової швидкості ω для приведення вентилятора у потрібний режим роботи.

Для аналізу роботи вентиляційної установки на базі частотно-регульованого електроприводу за допомогою комп'ютерного моделювання необхідно створити моделі всіх вузлів САК: модель об'єкта керування; модель блоку керування; модель виконавчого пристрою.

4 РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Вибір моделі у програмному середовищі MATLAB

Для проведення досліджень обираємо програмне середовище MATLAB, яке надає можливість прийняти необхідний варіант моделювання, в залежності від особливостей процесу дослідження. Наприклад, моделювання АД можливо виконати на структурній моделі. На рис.4.1 наведено структурну схему АД з КЗ ротором у нерухомій системі координат.

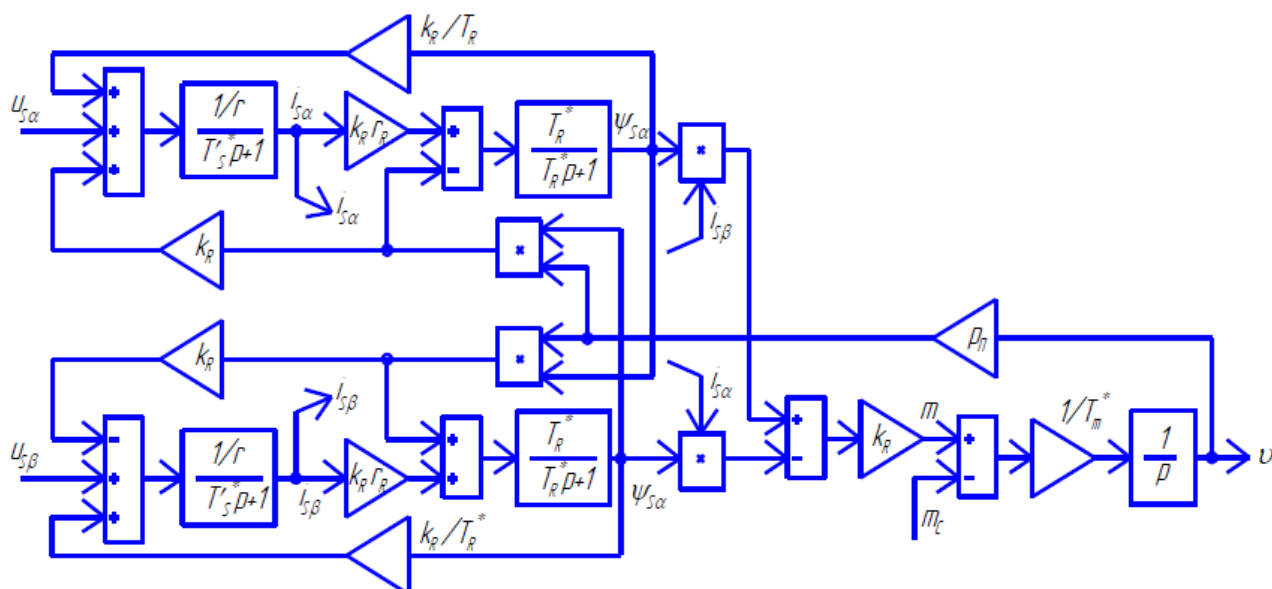


Рисунок 4.1 - Структурна схема АД з КЗ ротором в нерухомій системі координат

Цій схемі відповідає модель в середовищі MATLAB (рис.4.2).

Існує також можливість провести дослідження АД на віртуальній моделі з використанням додатку Simulink. В цьому додатку розміщені блоки віртуальних електричних машин, вибираємо АД з КЗ ротором (рис.4.3). Можливо обрати також механічний вхід АД: з Simulink-портом по моменту навантаження T_m (Torque) (рис.4.3 а), по швидкості ω (Speed) (рис.4.3, б), з Simscape-портом S (рис.4.3, в).

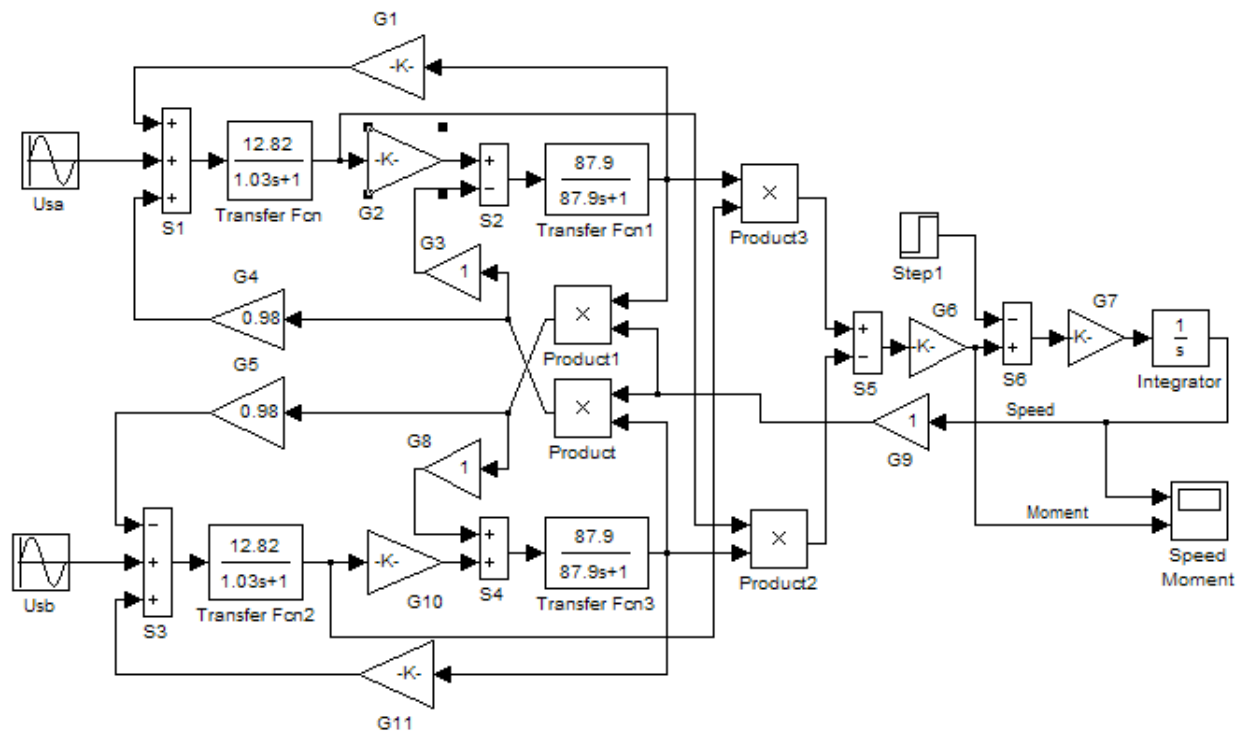


Рисунок 4.2 - Модель в MatLab АКЗ в нерухомій системі координат

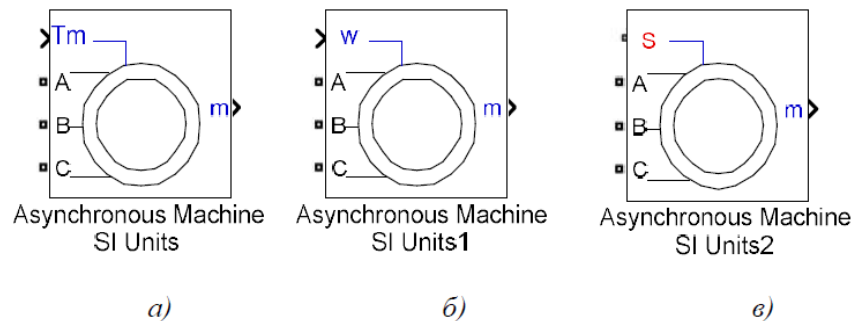


Рисунок 4.3 – Вибір блоку віртуальної АМ з КЗ ротором та різними механічними входами: а) по моменту навантаження; б) по швидкості; в) з Simscape-портом S

Узагальнену віртуальну модель для дослідження АД з короткозамкненим ротором (що включає блок Asynchronous Machine) наведено на рис. 4.4.

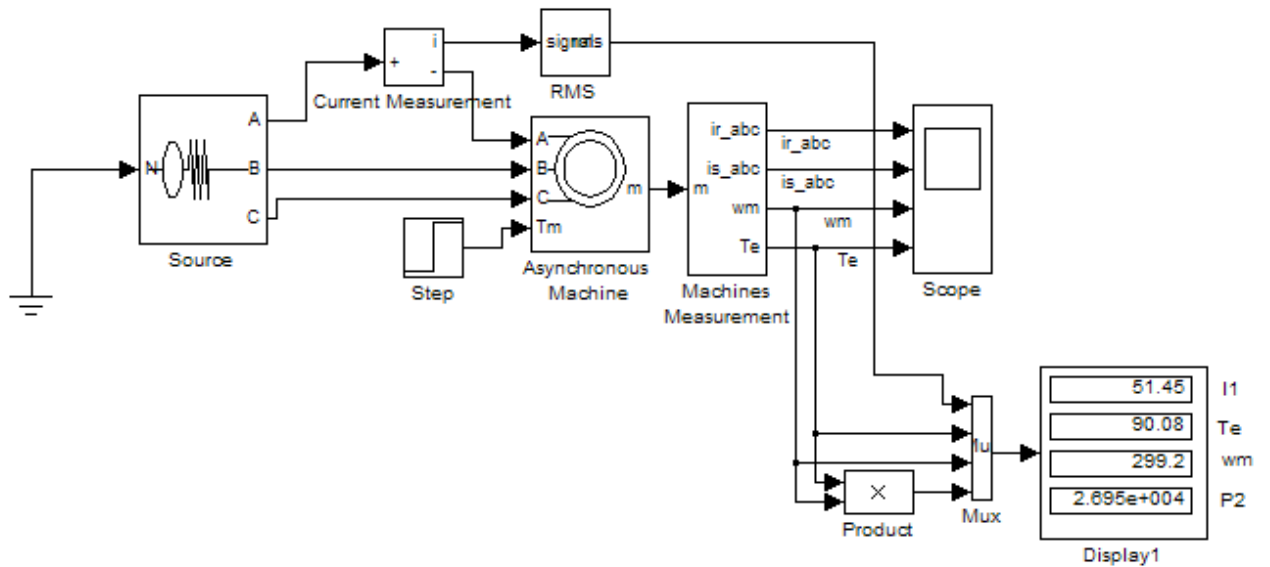


Рисунок 4.4 - Віртуальна модель для дослідження трифазного АД з КЗ ротором

У структурі моделі використовуються такі основні елементи Simulink:

- Трифазна асинхронна машина (Asynchronous Machine з бібліотеки Power System Blockset/Extras/Machines), що виступає об'єктом дослідження та відтворює електромагнітні та механічні процеси в двигуні;
- Трифазне джерело напруги (Source з бібліотеки Power System Blockset/Extras/Electrical Sources), призначене для живлення асинхронної машини синусоїдною напругою необхідних параметрів;
- Блок Scope (Simulink/Sinks), який забезпечує візуалізацію миттєвих струмів статора і ротора, швидкості обертання та електромагнітного моменту двигуна;
- Блок зняття параметрів машини Machines Measurement, що дозволяє одночасно реєструвати основні електричні та механічні величини моделі трифазного двигуна;
- Блок Step (Simulink/Sources) для задання зміни навантажувального моменту на валу машини у визначений момент часу;
- Вимірювач струму Current Measurement, який фіксує миттєве значення струму у фазах джерела живлення;
- Блок RMS, що визначає діюче значення фазного струму живлення I_1 ;

- Блок Display, який відображає числові значення ключових параметрів - струму джерела, моменту, частоти обертання та потужності на валу;
- Блок Mux (із Simulink/Signal&Systems), що об'єднує кілька окремих сигналів у єдиний вектор для подальшої спільної обробки або передачі в інші блоки.

Аналіз досліджень, що виконані за допомогою цих двох моделей, підтверджує їх ідентичність [8]. Це дозволяє вибрати для проведення досліджень системи «мережа-ПЧ-АД-вентилятор» імітаційну модель з програмного середовища MATLAB/Simulink.

Імітаційна модель дозволяє відтворити повну динаміку системи без ризику для обладнання. Основними перевагами імітаційного підходу є безпечність (не потрібно випробовувати реальний привод в екстремальних режимах); гнучкість (можна швидко змінювати параметри двигуна, навантаження, схему керування); оптимізація налаштувань (дозволяє підібрати ПІ-регулятори, частотні характеристики, алгоритми енергозбереження); можливість інтеграції (модель можна включати в більші системи); економія часу і коштів (до початку експериментів у реальній установці вже відомі оптимальні параметри).

Імітаційне моделювання є доцільним і ефективним методом дослідження асинхронного електроприводу вентилятора, оскільки: дозволяє глибоко проаналізувати взаємодію електричних і механічних процесів; забезпечує безпечне тестування алгоритмів керування; допомагає підвищити енергоефективність системи без дорогих експериментів; дає змогу оптимізувати частотне регулювання під конкретне вентиляційне навантаження.

4.2 Створення імітаційної моделі системи в програмному середовищі MATLAB/Simulink

Для реалізації моделі у програмі MATLAB/Simulink використовуємо бібліотеки:

- Simscape Electrical → Specialized Power Systems;

- Simulink → Continuous;
- Simscape → Electrical → Machines.

Основні елементи моделі:

- блок Asynchronous Machine;
- блок PWM Voltage Source або модель інвертора;
- PI-регулятори для швидкості та струмів;
- блоки Clarke Transform та Park Transform;
- механічна підсистема з нелінійним навантаженням.

В таблиці 4.1 наведено перелік основних блоків моделі та їх реалізацію.

Таблиця 4.1 - Основні блоки моделі «Мережа-ПЧ-АД-вентилятор»

Назва блоку	Входи	Виходи	Реалізація
Блок асинхронного двигуна	u_α, u_β	$i_\alpha, i_\beta, \omega_m, M_e$	диференціальні рівняння в α, β координатах
Блок механічної частини:	M_e, M_c	ω_m, θ_m	інтегратор з обмеженнями
Блок навантаження (вентилятор):	ω_m	$M_c, Q, \Delta p$	нелінійна функція
Блок ЧРП	U_{ref}, f_{ref}	u_α, u_β	ШІМ або ідеалізований перетворювач
Блок системи керування:	$\omega^*, Q^*,$ фідбеки	керуючі сигнали	ПІ-регулятори

Узагальнену комп'ютерну імітаційну модель для скалярного автоматичного керування рівнем тиску на основі ЧР АЕП представлено на рис. 4.5.

У даній моделі блоки перетворювача частоти та асинхронного двигуна об'єднані у єдиний блок АЧП.

4.2.1. Комп'ютерна імітаційна модель частотнорегульованого АЕП.

Відповідно до алгоритму керування швидкістю обертання валу АД (векторне чи скалярне керування) відрізняються моделі асинхронного частотного електроприводу.

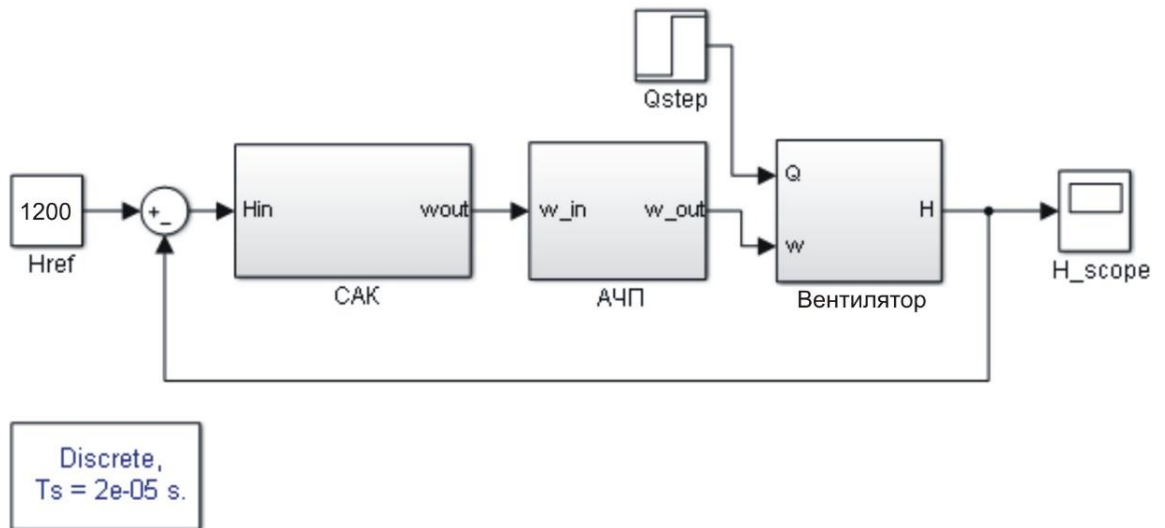


Рисунок 4.5 - Узагальнена комп'ютерна імітаційна модель для скалярного автоматичного керування рівнем тиску на основі ЧР АЕП.

Побудова точної імітаційної моделі ЧР асинхронного електроприводу являється достатньо складною інженерною задачею. Це пов'язано із складністю математичного опису процесів, які відбуваються в частотному перетворювачі через наявність у ньому великої кількості нелінійних елементів. Не менш складною науково-технічною задачею являється побудова математичної моделі АД, в якому динаміку процесів можна описати системою диференціальних рівнянь Парка-Горєва.

Для дослідження режимів скалярного ЧП асинхронного електроприводу в середовищі Matlab/Simulink доцільно скористатись блоком «Six-Step VSI Induction Motor Drive» бібліотеки SimPowerSystems. В основі зазначеного блоку є детальна математична модель трифазного ПЧ та модель асинхронного двигуна, що описується диференціальними рівняннями Парка-Горєва.

Зовнішній вигляд цього блоку наведено на рис. 4.6.

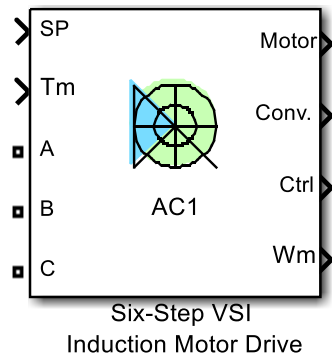


Рисунок 4.6 - Зовнішній вигляд блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive».

Узагальнену структурну схему для силової частини блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive» зображено на рис. 4.7.

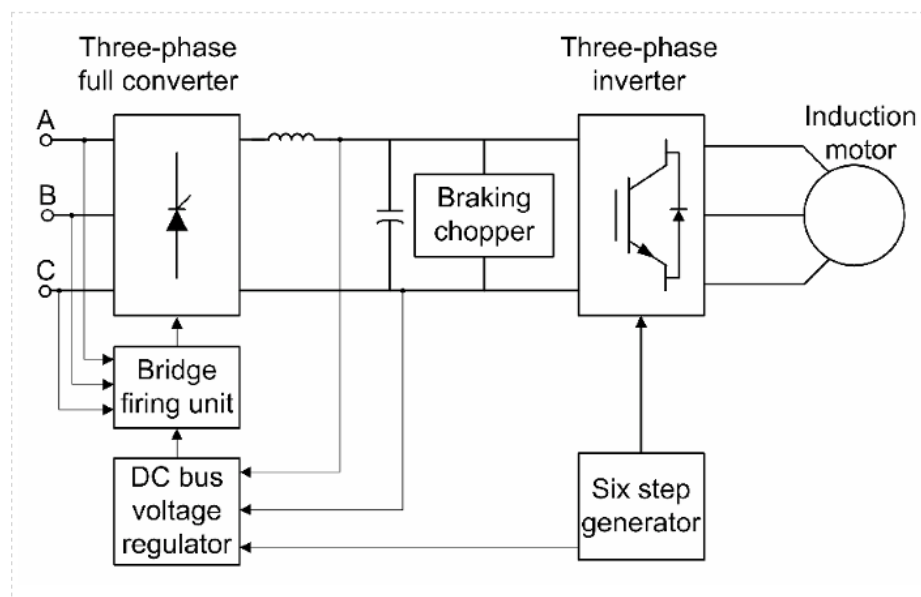


Рисунок 4.7 - Силова частина блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive».

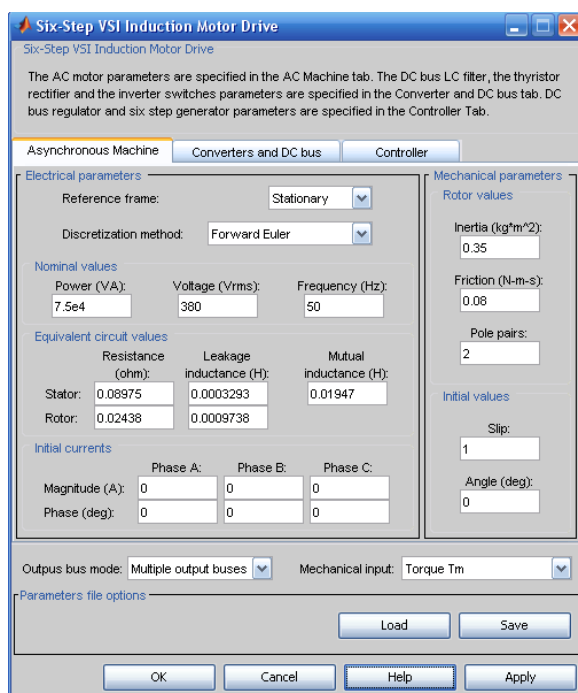
Блок «Six-Step VSI Induction Motor Drive» представляє собою готову модель електроприводу змінного струму, що включає:

- трифазний інвертор напруги (VSI - Voltage Source Inverter);
- асинхронний двигун;
- систему керування з шестикроковою комутацією (Six-Step Control).

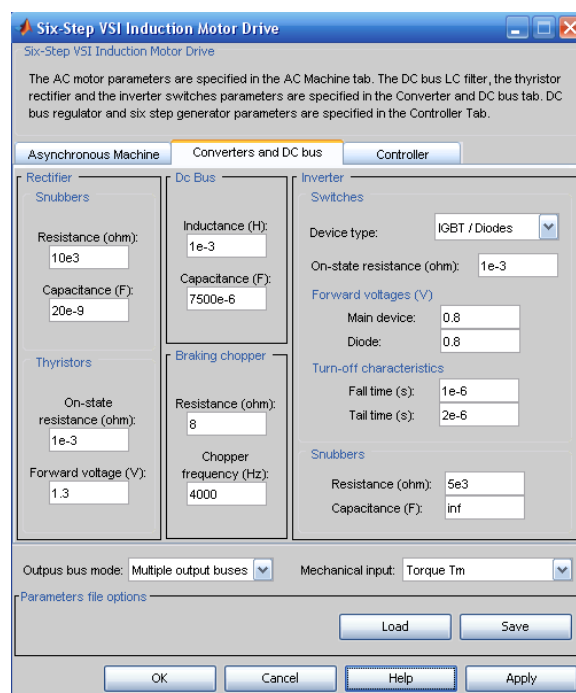
VSI (Voltage Source Inverter) є інвертором джерела напруги, який перетворює постійну напругу DC в трифазну змінну напругу з регульованою частотою та амплітудою. Six-Step (шестикрокова комутація) є найпростішим методом керування інвертором, де кожен з 6 ключів інвертора перемикається один раз за період вихідної напруги. В кожен момент часу ввімкнені рівно 2 ключі (один верхнього плеча, один нижнього).

В блоці Six-Step VSI регулювання швидкості відбувається тільки зміною частоти комутації. Для частотного регулювання з підтримкою V/f Control, потрібний додатковий DC/DC конвертор, що не входить в базовий блок.

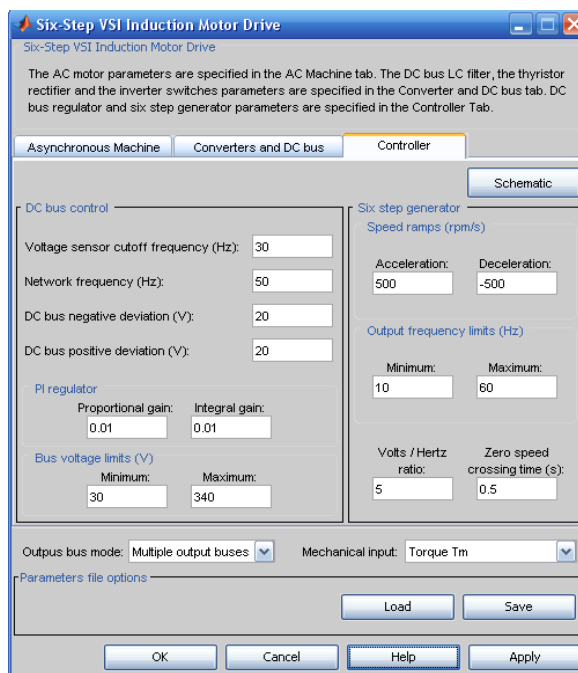
Введення параметрів блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive» виконується за допомогою діалогових вікон, що зображені на рис. 4.8. Виконується введення по трьом вкладкам: Asynchronous Machine (рис. 4.8 а); Converter and DC bus (рис. 4.8 б); Controller (рис. 4.8 в).



а)



б)



в)

Рисунок 4.8 – Зовнішній вигляд діалогових вікон налаштування параметрів блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive»: а) вкладка Asynchronous Machine; б) Converter and DC bus; в) Controller

На вкладці "Asynchronous Machine" налаштовуються параметри асинхронного двигуна. В таблиці 4.2 наведено основні з них.

Таблиця 4.2 – Налаштування параметрів АД

Назва параметра	Пояснення	Значення
Nominal power Pn	Номінальна потужність	30e3 Вт
Voltage (Vrms line-line)	Лінійна напруга	380 В
Frequency (Hz)	Номінальна частота	50 Гц
Stator resistance Rs	Опір обмотки статора	0.015 Ом
Stator inductance Ls	Індуктивність статора	0.12 Гн
Rotor resistance Rr	Опір обм.ротора (приведений)	0.009 Ом
Rotor inductance Lr	Індуктивність ротора	0.12 Гн
Mutual inductance Lm	Взаємна індуктивність	0.11 Гн
Inertia J (kg.m ²)	Момент інерції	0.8 кг·м ²
Friction factor F	Коефіцієнт тертя	0.01
Pole pairs	Число пар полюсів	1

Параметри комп'ютерної моделі асинхронного двигуна визначені за допомогою функції Matlab «power_Asynchronous Machine Params», що має зручний графічний інтерфейс і дозволяє формувати модель шляхом введення паспортних характеристик машини.

Загальний вигляд узагальненої моделі блоку АЧП наведено на рис. 4.9.

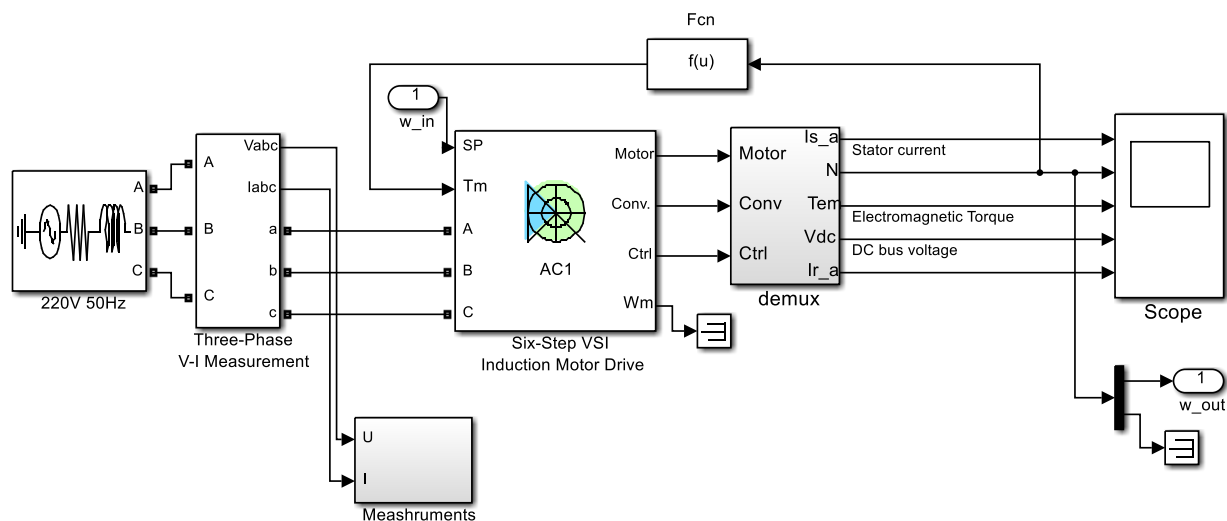


Рисунок 4.9 – Загальний вигляд моделі блок «АЧП»

Загальний вигляд блоку «Вентиляційне навантаження» наведено на рис. 4.10.

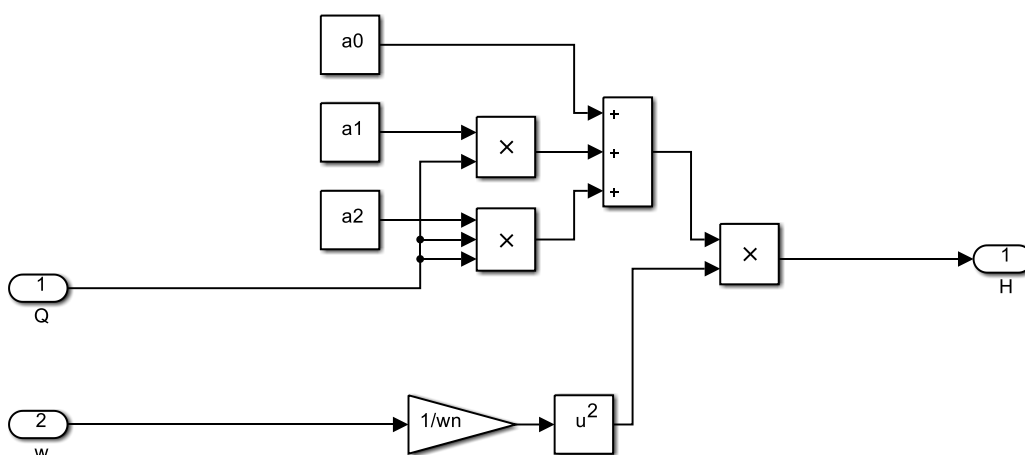


Рисунок 4.10 – Загальний вигляд моделі блоку «Вентиляційне навантаження»

4.2.2. Синтез САК тиску вентиляційної установки. Під час розробки САК тиску вентиляційної установки можуть застосовуватися різні підходи. Найбільш поширені серед них:

- ПІД-регулювання - традиційний і найбільш уживаний метод;
- Оптимальне керування (методи Понтрягіна, Белмана), яке забезпечує високі показники якості, однак рідше використовується через складність реалізації та налаштування.

Хоча оптимальні регулятори дозволяють досягати більш досконалої якості керування, у системах підтримання тиску вони майже не застосовуються. Основною причиною є складність моделювання та синтезу таких регуляторів. Натомість ПІД-алгоритми залишаються практичною та надійною альтернативою.

У випадку вентиляційної установки швидкодія перехідного процесу не є вирішальним параметром. Тому в законі керування можна не використовувати диференційну складову, а реалізувати САК тиску на основі ПІ-регулятора, що значно спрощує систему та полегшує її налаштування.

Для синтезу ПІ-регулятора підтримання тиску необхідно:

- виконати лінеаризацію нелінійних елементів САК (об'єкта керування та виконавчого пристрою) у робочій точці, оскільки ПІ-регулятор належить до класу лінійних систем керування;
- застосувати відомі методики синтезу ПІ-регуляторів для отримання необхідних параметрів.

Частотнорегульований асинхронний електропривод у першому наближенні можна подати у вигляді послідовного з'єднання аперіодичної ланки першого порядку та ланки чистого запізнення. Відповідно, його приведена передаточна функція має вигляд:

$$W_{\text{чп}}(p) = \frac{k_m}{T_1 p + 1} e^{-p\tau} \quad (3.3)$$

де k_m – значення коефіцієнту підсилення; T_1 – значення постійної часу, с.

Значення параметрів k_m та T_1 визначають або розрахунковим шляхом, або експериментально. Для моделювання вентиляторної установки типу ВЦ 6-28 №10 у відносних одиницях прийнято: $k_m = 1$; $T_1 = 0,093$ с.

Ключовим етапом синтезу ПІ-регулятора є визначення його коефіцієнтів - пропорційної (K_p) та інтегральної (K_i) складових. Саме ці параметри формують якість регулювання і забезпечують необхідну динаміку процесу.

Існує кілька способів визначення параметрів ПІ-регулятора:

- ручний підбір коефіцієнтів на основі досвіду та оцінки реакції системи;
- інженерні методи, що спираються на таблиці та стандартні рекомендації (методи Зіглера–Нікольса, Куна, Конакава тощо);
- комп'ютерне імітаційне моделювання, яке дозволяє автоматично та найбільш точно підбирати параметри за реальною динамікою об'єкта.

У кваліфікаційній роботі використовувався саме третій підхід - метод синтезу ПІ-регулятора на основі комп'ютерної моделі САК тиску вентиляційної установки.

На рис. 4.11 наведено структурну схему лінеаризованої системи автоматичного керування тиском.

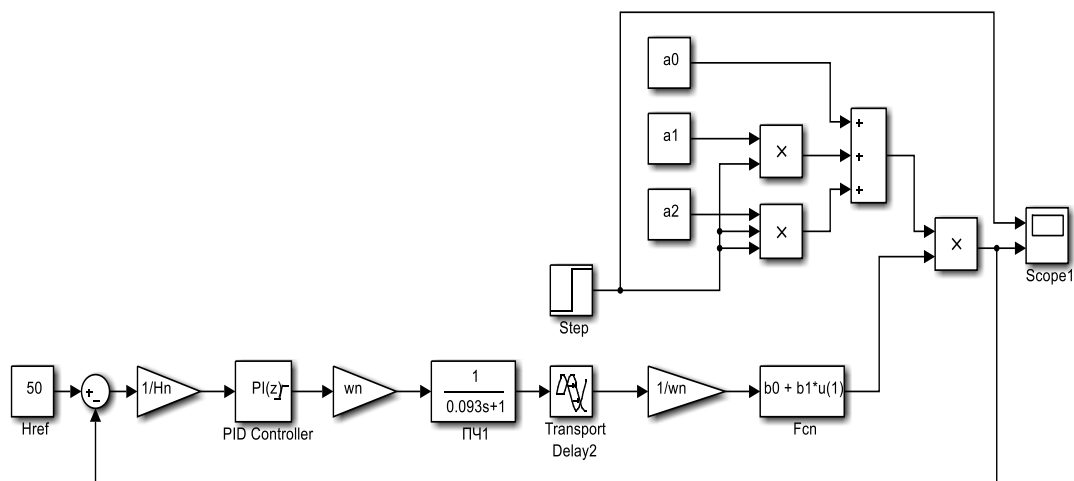


Рисунок 4.11 - Схема моделі САК тиском вентиляційної установки

Блок “PID Controller” реалізує дискретний ПІ-алгоритм. Його діалогове вікно з параметрами показано на рис. 4.12.

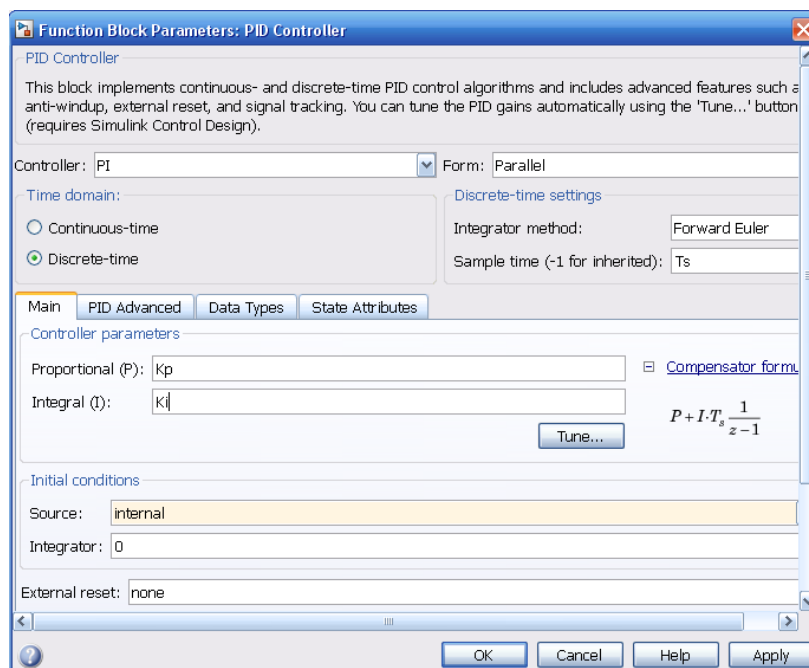


Рисунок 4.12 - Вікно налаштувань блоку “PID Controller”

Для визначення оптимальних значень коефіцієнтів застосовано інструмент PID Tuner, який викликається кнопкою «Tune...» у вікні налаштувань контролера. Інтерфейс PID Tuner подано на рис. 4.13.

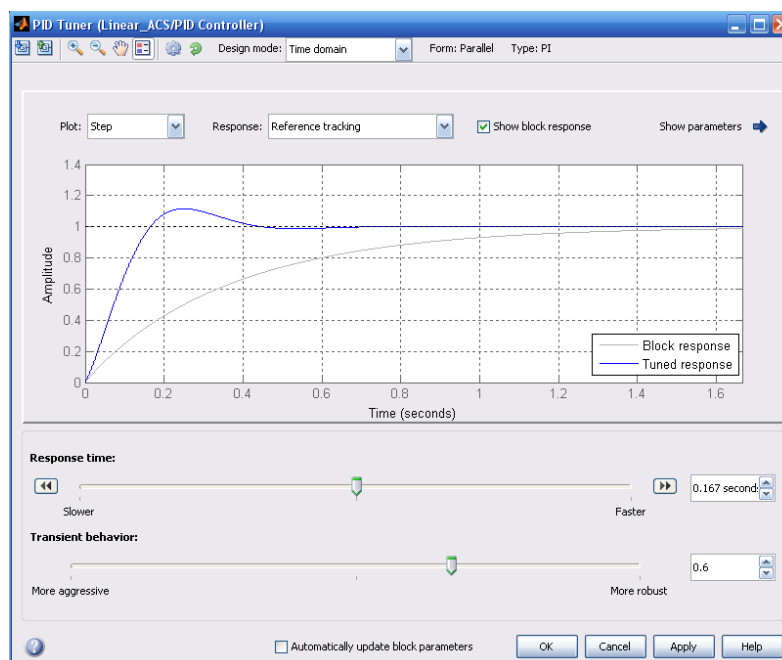


Рисунок 4.13 - Зовнішній вигляд діалогового вікна інструменту «PID tuner»

У результаті автоматичного розрахунку отримано такі значення коефіцієнтів ПІ-регулятора: $K_p = 0,163$; $K_i = 1,615$.

Узагальнену модель блоку «САК» представлено на рис. 4.14.

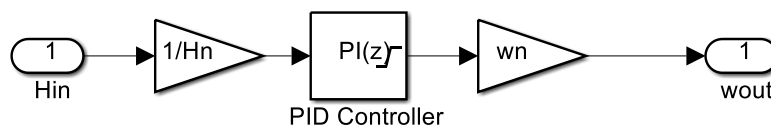


Рисунок 4.14 – Узагальнена модель блоку «САК»

Використання математичного пакету Matlab/Simulink допомагає в зрозумілій формі налаштувати потрібні характеристики перехідного процесу САК.

4.3 Моделювання режимів роботи вентиляційної установки на основі частотнорегульованого електроприводу

Функціонування вентиляційної установки вимагає забезпечення постійного тиску при змінних значеннях продуктивності. Результати моделювання, представлені на рис. 4.15 - 4.16, ілюструють залежність тиску від продуктивності вентилятора. Аналіз показує, що при $t_1=8,0$ с відбувається зниження тиску від P_{\max} до P_{\min} , внаслідок чого його значення становить $0,875 P_m$. Процес стабілізації завершується при $t_2=12$ с.

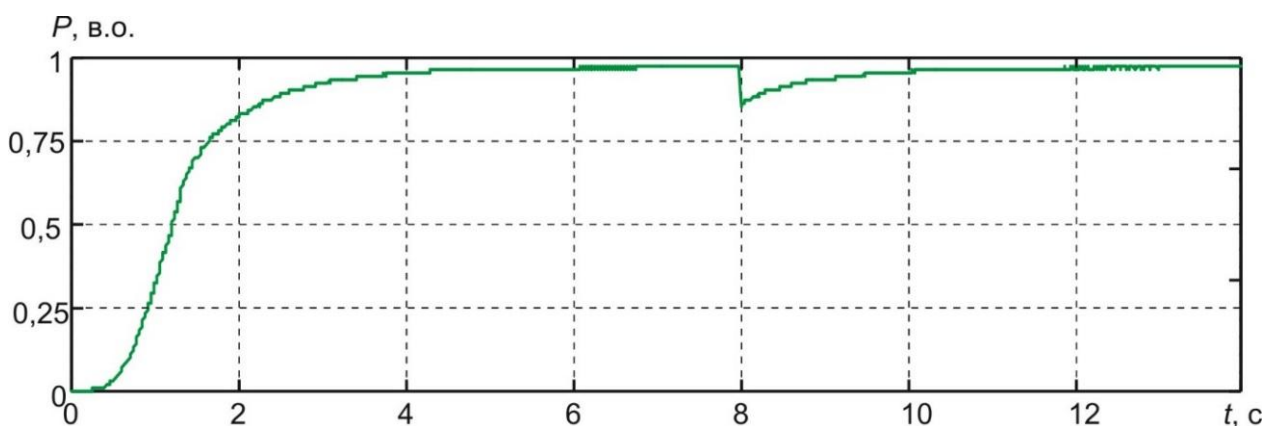


Рисунок 4.15 – Динаміка зміни тиску вентиляційної установки

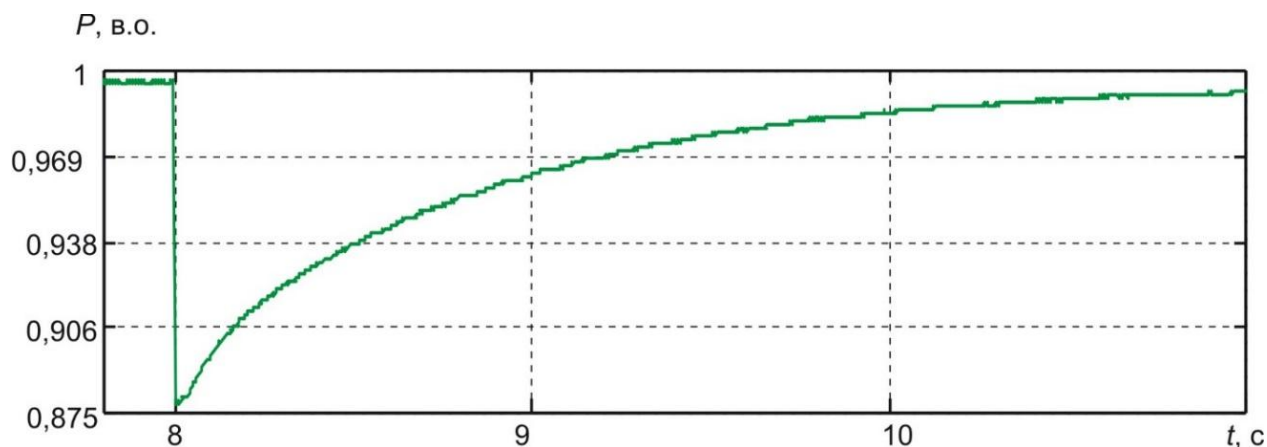


Рисунок 4.16 - Зображення зміни тиску у збільшеному масштабі

Об'єктом дослідження є перехідні процеси в системі «перетворювач частоти – асинхронний двигун - вентилятор». У ході імітаційного моделювання отримано залежності електромагнітного моменту та кутової швидкості обертання ротора від часу, графічне представлення яких наведено на рис. 4.17–4.19. Досліджувався режим пуску на холостому ході за умови $M_c=0$ з наступним прикладанням номінального навантаження $M_c=M_n$. У момент часу $t=8$ с відбувалася зміна витрат від мінімального до максимального значення ($Q_{\min} \rightarrow Q_{\max}$).

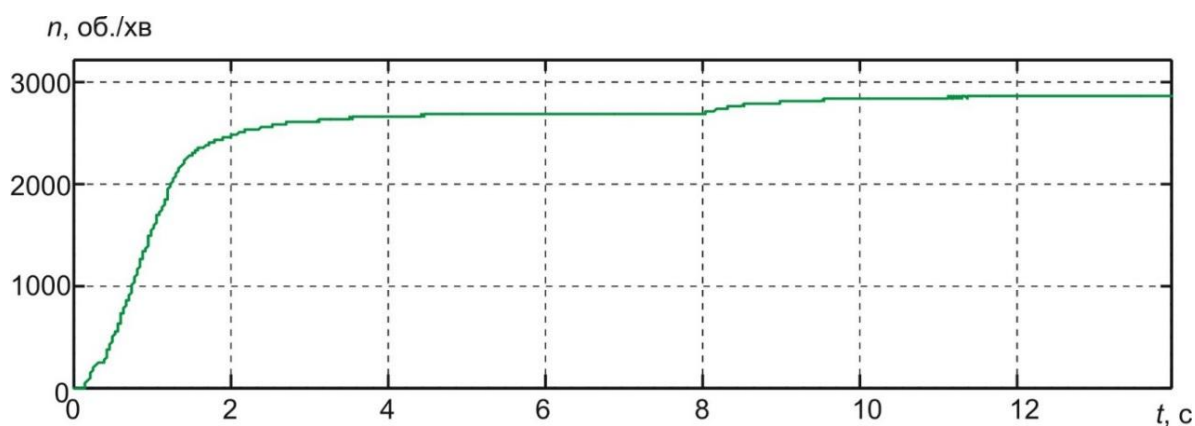


Рисунок 4.17 – Динаміка зміни кутової швидкості обертання ротору

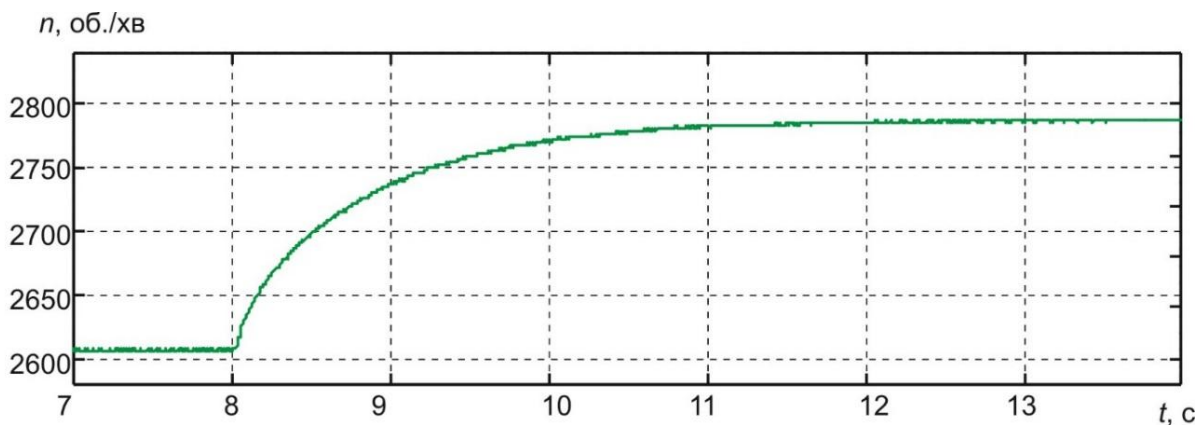


Рисунок 4.18 - Динаміка зміни кутової швидкості обертання ротору
(збільшений масштаб)

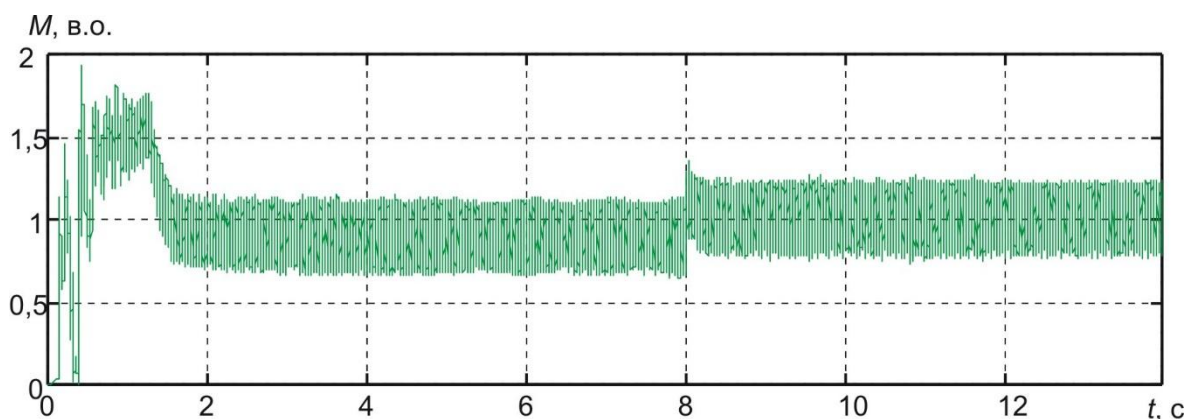


Рисунок 4.19 - Динаміка зміни електромагнітного моменту в системі за умови
 $M_c=0$ та набросі навантаження $M_c=M_H$

Динаміка зміни струму статора асинхронного двигуна представлена на рис. 4.20, а активної потужності - на рис. 4.21.

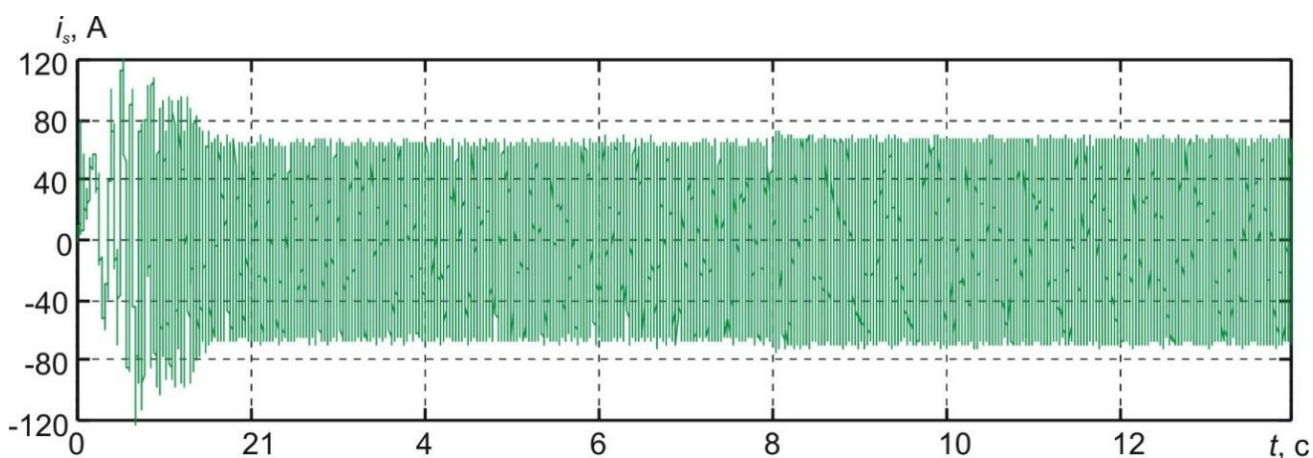


Рисунок 4.20 - Динаміка зміни струму статора у функції часу.

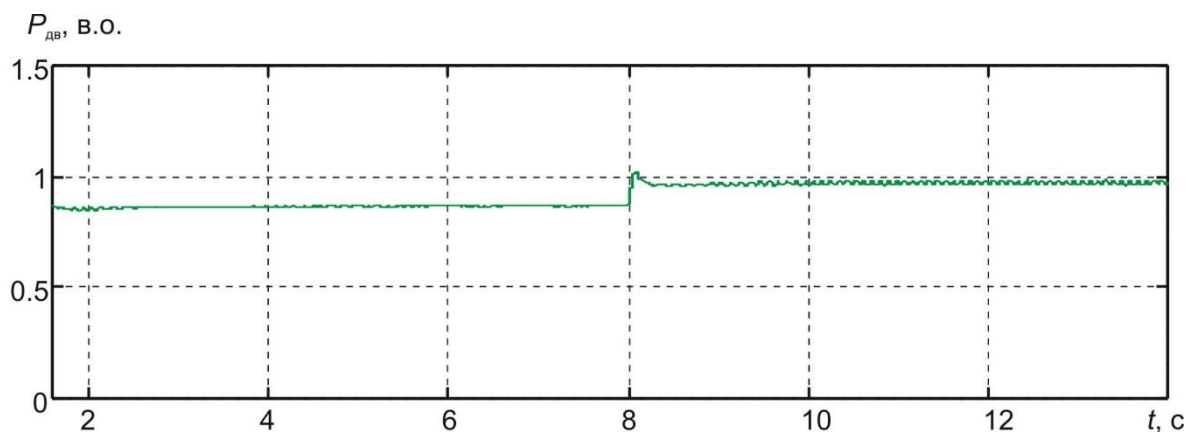


Рисунок 4.21 - Динаміка зміни активної потужності у функції часу

Механічні характеристики асинхронного двигуна потужністю 30 кВт за різними фіксованими значеннями частоти живлення показано на рис. 4.22.

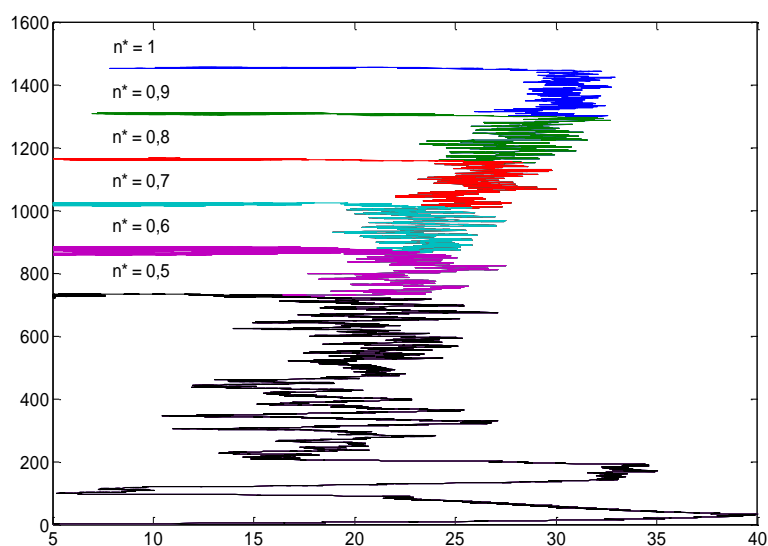


Рисунок 4.22 - Механічні характеристики АД потужністю 30 кВт за різними фіксованими значеннями частоти живлення

Аналіз отриманих механічних характеристик свідчить про те, що варіація частоти в області $0,5 \leq \omega_{1*} \leq 1$ не викликає суттєвих змін критичного моменту та критичного ковзання двигуна.

Подальше зниження частоти живлення призводить до погіршення механічних характеристик: зниження критичного моменту при одночасному збільшенні критичного ковзання.

Скалярний закон керування асинхронним двигуном виду $U/f = const$ використовується у більшості приводів вентиляторного навантаження. Підтримання сталого відношення напруги до частоти дозволяє зберігати постійну величину магнітного потоку в машині, що забезпечує стабільність моменту та високий коефіцієнт корисної дії в номінальному та середньочастотному діапазонах.

Однак у діапазоні малих частот ($f < 10-15$ Гц) асинхронний двигун піддається значним втратам магнітного потоку внаслідок падіння напруги на активному опорі статора R_s . У таких умовах двигун може не реалізовувати необхідного моменту для запуску та стабільної роботи вентилятора аспіраційної системи.

Для компенсації цих ефектів застосовується низькочастотний підйом напруги або Voltage Boost.

Закон керування з підйомом напруги описується залежністю:

$$U(f) = U_{\text{boost}} + k \cdot f,$$

де U_{boost} - додаткова низькочастотна напруга; $k=U_n/f_n$ — коефіцієнт лінійного закону U/f .

У сучасних перетворювачах частоти параметр Voltage Boost реалізується у вигляді додавання фіксованого підйому напруги (3...10 % від номінальної напруги), діючого лише в діапазоні малих частот та плавно зменшуваного до нуля при досягненні певної частоти (типово 10–15 Гц). Таким чином, загальний закон $U(f)$ має вигляд, показаний на рис.4.1.

На малих обертах момент навантаження невеликий, але через зниження магнітного потоку двигуна, зростання падіння напруги на опорі обмоток, інерцію робочого колеса, додатковий опір пилових фільтрів, двигун без Voltage Boost може втратити здатність створювати необхідний пусковий момент.

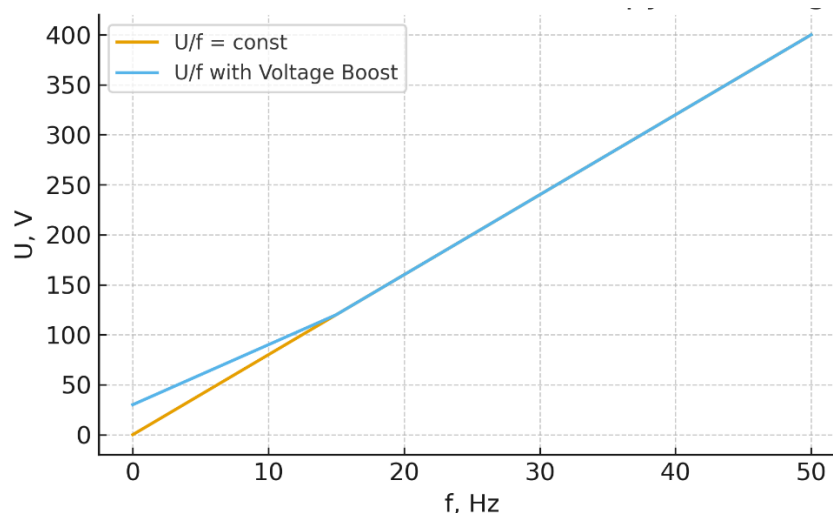


Рисунок 4.23 – Залежність $U(f)$ з низькочастотним підйомом напруги

Це призводить до нестабільного запуску, провалів тиску у аспіраційній системі, циклів «пуск–зупинка», коливань ПІД-регулятора тиску, перегрівання двигуна. Застосування підйому напруги усуває ці недоліки.

Voltage Boost є модифікацією основного закону U/f . Усі сучасні ПЧ автоматично застосовують Boost лише в нижньочастотному діапазоні, плавно переходять на стандартний U/f при зростанні частоти, забезпечують єдиний безперервний закон керування.

Закон U/f із підйомом напруги (Voltage Boost) є необхідною корекцією у низькочастотному діапазоні роботи асинхронного двигуна. Для вентиляторів аспіраційної системи така корекція забезпечує надійний пуск, стабільний момент та відсутність провалів тиску. Правильне застосування Boost покращує роботу PID-регулятора тиску та підвищує енергоефективність електропривода.

Проведене імітаційне моделювання роботи системи «мережа-ПЧ-АД-вентилятор» підтверджує коректність роботи САК при зміні параметрів вентиляційної установки.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС МОНТАЖУ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ОЕВ

5.1 Аналіз умов праці

Розглянемо модернізацію системи припливно-витяжної вентиляції виробничого приміщення. Серйозною проблемою є зниження концентрації кисню і в той же час збільшення вуглекислого газу і неприємних запахів.

Це призводить до задухи, втоми, поганого самопочуття, зниження працездатності співробітників і в підсумку виливається до втрати часу і фінансових доходів.

Способи подачі припливного повітря системою вентиляції і розміщення припливних отворів повітроводів повинні бути спроектовані так, щоб повністю виключити утворення «застою» в повітряному потоці і в той же час не викликати відчуття протягу. Вентиляція повинна забезпечувати максимально рівномірний розподіл повітря [21], що поступає по всьому приміщенню.

Рекуператори зазвичай використовуються в припливно-витяжній прямоточній системі вентиляції. За допомогою цієї системи в приміщення подається чисте і свіже повітря з вулиці. Витяжне та припливне повітря проходить по різних каналах і не змішується (рис.5.1). У процесі вентиляції відбувається міжканальна теплопередача, що забезпечує енергетичну ефективність системи в будь-який період року. А комфорт в приміщеннях буде забезпечений завдяки регулюванню кількості припливного і витяжного повітря.

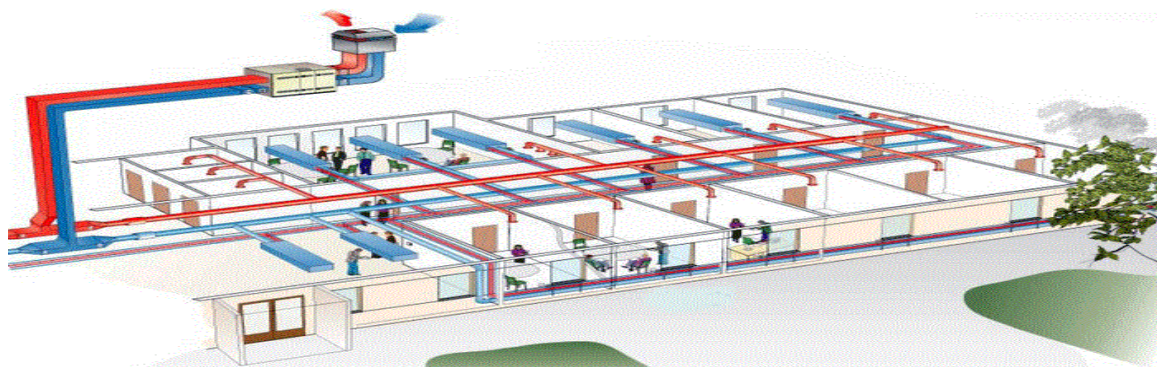


Рисунок 5.1 – Схема припливно-витяжної системи вентиляції

Виконаємо орієнтовний розрахунок централізованої системи вентиляції з рекуператором для забезпечення свіжим повітрям адміністративного приміщення ОЕВ. Кількість фіксованих робочих місць складає 95, також приймаємо, що протягом робочого дня у приміщенні приблизно 5 відвідувачів. З врахуванням норми свіжого повітря ($L_1=30$ м³/год на 1 людину) отримаємо кількість необхідної витрати повітря:

$$L_{\text{вигр.}} = L_1 \cdot N = 30 \cdot 100 = 3000 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Приймаємо до встановлення припливно-витяжна установка з рекуперацією тепла типу «Вентс ВУТ 3000 ПБЕ ЕС А21» [23]. Технічні характеристики такої установки наступні: продуктивність - 3000 м³/год; тип рекуператора – пластинчастий; ефективність рекуперації ≈ 75 %; споживана потужність вентиляторів ~ 2 кВт; монтаж - стельовий/підвісний.

Для адміністративної будівлі з одночасним перебуванням 100 працівників, при нормі 30 м³/год свіжого повітря на одну особу, розрахункова витрата припливного повітря становить 3000 м³/год. З урахуванням технічних характеристик припливно-витяжної установки з рекуперацією тепла «Вентс ВУТ 3000 ПБЕ ЕС А21» продуктивність становить 3000 м³/год. Це дозволяє виконати нормативні вимоги щодо повітрообміну та створити комфортні умови праці в адміністративних приміщеннях.

Монтаж та експлуатація припливно-витяжних та аспіраційних систем проводиться у приміщеннях виробничих цехів, на покрівлях, міжповерхових перекриттях або у вентиляційних камерах. Умови праці характеризуються:

- роботою на висоті;
- підвищеною запиленістю (особливо аспірація);
- наявністю шуму та вібрацій;
- роботою з електрообладнанням;
- малою освітленістю та замкнутими просторами.

Монтаж повітроводів, підвісних кріплень, вентиляторів часто виконується на висоті 3-12 м. Це потребує використання спеціальних підйомників, риштувань і страхувальних систем. Під час демонтажу старих повітроводів, встановлення нових рукавних фільтрів, циклона або аспіраційних магістралей, концентрація промислового пилу може перевищувати ГДК у 5-50 разів. Вентилятори середнього та високого тиску спричиняють шум 75-95 дБ, що перевищує допустимі рівні. Підключення вентилятора, перетворювача частоти, шафи керування виконується в умовах небезпеки ураження електричним струмом. Монтаж часто проводиться у технічних приміщеннях: вентиляційних камерах, шахтах, підпідлогових просторах.

Необхідно знати, що монтаж системи вентиляції комплексний процес, який проводиться в кілька етапів [20]. Кожен з них пов'язаний з монтажем кількох дрібних елементів в одну систему. Серед цих дрібних елементів: численні вентилятори, димарі, трубопроводи, фільтри, фіксатори і кріплення. З усією відповідальністю варто поставитися до налагодження системи автоматизації, адже в подальшому вона буде відповідати за контроль над всією системою.

Крім підготовчого етапу, монтаж вентиляції включає в себе початкові монтажні роботи, під час яких пробиваються отвори під вентиляційні короба; прокладаються магістральні повітропроводи; виконується встановлення електрообладнання, розводки електромережі, безпосередній монтаж обладнання для вентиляції. Останніми етапами є установка різних датчиків, систем автоматики, а також запуск і налаштування системи.

5.2 Шкідливі та небезпечні чинники на виробництві

Специфіка олійноекстракційного виробництва полягає у поєднанні пилонебезпечних і вибухо- та пожежонебезпечних процесів (насіння, макуха, шрот, розчинники типу гексан), високої запиленості та застосування інтенсивних аспіраційних та припливно-витяжних систем вентиляції.

Виробничі шкідливі та небезпечні чинники можна поділити на декілька груп: фізичні чинники; хімічні чинники; пожежо- та вибухонебезпечні чинники; механічні та психофізіологічні чинники.

До фізичних чинників відносяться: підвищена запиленість повітря; підвищений рівень шуму; небезпека падіння з висоти; електрична небезпека та вібрації.

Джерелами підвищеної запиленості повітря є приймання й очищення насіння, дроблення, транспортування, пресування, шротні склади, аспіраційні та рукавні фільтри. Переважає органічний пи́л рослинного походження (лущина, пи́л насіння, шрот), який може бути вибухонебезпечним (пилові вибухи у циклонах, рукавних фільтрах, силосах). Вміст пи́лу в повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК) для конкретного виду пи́лу; для речовин без встановлених ГДК застосовують орієнтовно безпечні рівні дії. Підвищена запиленість призводить до захворювання органів дихання, алергічних реакцій, подразнення слизових, ризику вибуху пилоповітряних сумішей. Аспіраційні системи є основним засобом зниження концентрації пи́лу до нормативних рівнів, передбачених галузевими санітарними правилами для олійноекстракційних підприємств.

Джерела шуму: вентилятори середнього та високого тиску, екстрактори, преса, дробарки, пневмотранспорт, компресори. Рівні шуму у венткамерах та виробничих приміщеннях можуть досягати 85–95 дБА, що наближається до верхніх допустимих меж [19]. Вібрації передаються через фундаменти від вентиляторів, пресів, дробарок. Ці явища можуть спричинити порушення слуху, підвищену втома, негативний вплив на опорно-руховий апарат та нервову систему.

До хімічних чинників відноситься пи́л рослинного походження, органічні аерозолі, леткі органічні сполуки при роботі з герметиками та лакофарбовими матеріалами.

Для олійноекстракційного виробництва одною з ключових груп є пожежо- та вибухонебезпечні чинники. Пи́л органічного походження (насіння, шрот,

лушпиння) у суміші з повітрям в певній концентрації може утворювати вибухонебезпечні пилоповітряні суміші, особливо у замкнених об'ємах: циклонах, фільтрах, силосах, аспіраційних магістралях. Пари гексану утворюють вибухонебезпечні газоповітряні суміші, тому приміщення екстракційних цехів відносять до категорії вибухопожежної небезпеки, а обладнання і вентиляційні системи мають виконуватись у відповідному вибухозахищеному виконанні.

Загоряння може виникнути у разі перегріву підшипників і електродвигунів вентиляторів, іскри від електрообладнання, інструменту, зварювальних й газополум'яних робіт.

До механічних чинників відносяться рухомі частини вентиляторів, транспортерів, шнеків, пресів, що створюють ризик затягування, ударів, порізів. Робота в умовах підвищеного шуму, теплового навантаження, високої концентрації пилу, а також напружений ритм технологічних операцій призводять до підвищеної втоми, зниження уваги й реакції, що додатково підвищує травмонебезпечність.

Таким чином, умови праці на олійноекстракційному виробництві характеризуються комбінованою дією фізичних чинників (запиленість, шум, вібрація, несприятливий мікроклімат), хімічних чинників (пил рослинного походження, пари органічних розчинників, продукти термічної деструкції), пожежо- та вибухонебезпечних чинників (пилові й газоповітряні суміші), механічних та психофізіологічних чинників. Їх кількісна оцінка здійснюється відповідно до чинних документів [18,19].

Це дозволяє обґрунтувати вибір комплексу техніко-організаційних заходів і засобів індивідуального захисту для монтажників та обслуговуючого персоналу систем аспіраційної та припливно-витяжної вентиляції на ОЕВ.

5.3 Вибір техніко-організаційних заходів і засобів індивідуального захисту для запобігання впливу на працівників шкідливих і небезпечних виробничих чинників

Монтаж та експлуатація вентиляційних систем пов'язані з дією комплексу шкідливих і небезпечних чинників: пил, шум, електробезпека, робота на висоті, механічні травми. Для аспіраційних систем характерним є додатковий ризик пилового вибуху, що потребує спеціальних технічних заходів (ЕХ-виконання, очищення повітроводів). Ефективна система охорони праці включає організаційні, технічні заходи та застосування ЗІЗ.

До організаційних заходів відноситься видача наряду-допуску, контроль стану обладнання, встановлення знаків безпеки. Робітники повинні пройти інструктаж з електробезпеки, робіт на висоті, у замкнутих просторах, у вибухонебезпечних зонах (аспірація), пожежної безпеки. Перед пуском вентилятора перевіряється обертання робочого колеса, зазори, закріплення. Встановлюються знаки безпеки: “Вибухонебезпечно”, “Робота на висоті”, “Електробезпечно”.

Технічні заходи включають (заземлення вентилятора, ПЧ і металевих повітроводів, використання вибухозахищених вентиляторів у аспірації (виконання ЕХ, антипилові підшипники, неіскрові лопатки); антивібраційні вставки та шумоізоляція; огороження рухомих частин (кожухи ремінних передач, сітки на всмоктуванні); вентиляція робочої зони при монтажі; використання інструменту з подвійною ізоляцією або 42 В.

Всі прилади та інструменти (дрилі, молотки, плоскогубці), які використовуються під час роботи, повинні бути справні, електричні прилади не повинні мати оголених кінців. Застосовування техніки тільки за призначенням.

Освітлення в робочих зонах (монтажу повітропроводів та встановлення рекуператорів на горищі) слід організувати таким чином, щоб обслуговуючий персонал зміг без перешкод бачити всі покази приладів та щоб це відповідало нормам в 300 лк.

Залежно від умов праці під час монтажу та експлуатації систем вентиляції для захисту робітників слід використовувати засоби індивідуального захисту [8]:

- для захисту органів дихання: респіратори протипилові РУ-60М; протиаерозольні маски для пилових робіт;
- для захисту слуху: протишумові навушники або беруші (шум до 95 дБ);
- для захисту рук: рукавиці з антипроколом, рукавички з діелектричним покриттям при роботі в електричних мережах; бавовняні рукавиці марки «SILK» з ПВХ-точкою (з 100% бавовняної нитки, без швів, завдяки чому руки не відчувають роздратування і постійно контактують з повітрям);
- для захисту очей та обличчя: окуляри закриті з прямою вентиляцією типу ЗП2-84, ЗПЗ-84, ЗПІІ-90 (для захисту очей від механічних часток, пилу) або щиток;
- засоби для робіт на висоті: запобіжний пояс, каска з підборідним ременем, каска захисна MSA V-Gard, Fas-Trac;
- захисний одяг: пилозахисний комбінезон, куртка або халат з щільної тканини, захисні черевики загального призначення.

Дотримання вимог охорони праці забезпечує безпечні умови монтажу та подальшої експлуатації вентиляційної системи.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі досліджено підвищення енергетичної ефективності асинхронних електроприводів вентиляційних систем переробного виробництва шляхом математичного моделювання та аналізу енергоощадних режимів роботи.

Проведено комплексний аналіз вентиляційних систем переробного виробництва, який показав, що енергоспоживання вентиляційних установок становить до 40% від загальних витрат електроенергії підприємства.

Виконано аналіз методів підвищення енергоефективності вентиляційних установок. Обґрунтовано переваги частотного регулювання продуктивності порівняно з традиційними методами (шиберне регулювання, зміна кута нахилу лопатей). Доведено, що застосування частотнорегульованого електроприводу дозволяє знизити енергоспоживання на 25-40% порівняно з нерегульованими системами. Таким чином, асинхронні електроприводи з частотним регулюванням є найбільш перспективними для систем вентиляції завдяки можливості плавного регулювання продуктивності відповідно до технологічних потреб.

Досліджено структуру втрат потужності в системах асинхронного електроприводу. Встановлено, що при частотному регулюванні швидкості визначальними є втрати у міді в обмотках статора та ротора, які становлять основну частку сумарних втрат. Розроблено алгоритм оптимального керування з мінімізацією втрат у міді, який забезпечує незмінність коефіцієнта корисної дії відносно величини моменту навантаження.

Виконано аналіз сучасних перетворювачів частоти та обрано оптимальну структуру ПЧ для систем аспірації. Розглянуто скалярні й векторні методи керування та визначено, що для аспіраційних систем доцільно застосовувати скалярний закон $U/f = \text{const}$ з функцією Voltage Boost на малих частотах, тоді як для систем з жорсткими динамічними вимогами більш ефективним є векторне керування.

Розроблено математичні моделі компонентів системи частотнорегульованого електроприводу: асинхронного двигуна в обертовій системі координат, вентиляційного навантаження, перетворювача частоти з широтно-імпульсною модуляцією. Виконано ідентифікацію параметрів асинхронного двигуна потужністю 30 кВт з використанням функції Matlab «power_Asynchronous Machine Params».

Побудовано математичну модель аеродинамічної характеристики відцентрового вентилятора методом регресійного аналізу. Апроксимація Q-P залежності квадратичним поліномом забезпечує адекватне відтворення характеристик вентилятора при різних частотах обертання з урахуванням принципу подібності.

Створено комплексну імітаційну модель системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун – вентилятор» в середовищі MATLAB/Simulink. Виконано синтез системи автоматичного керування тиском з ПІ-регулятором, що забезпечує підтримання заданого значення тиску незалежно від зміни продуктивності вентилятора.

Проведено імітаційне моделювання перехідних процесів у різних режимах роботи вентиляційної установки: пуск на холостому ході, наброс номінального навантаження, зміна витрати від мінімального до максимального значення. Отримано часові залежності електромагнітного моменту, кутової швидкості обертання, струму статора та активної потужності. Результати моделювання підтвердили працездатність розробленої системи керування та її здатність забезпечувати стабілізацію тиску при змінному навантаженні.

Досліджено механічні характеристики асинхронного двигуна при фіксованих частотах живлення. Встановлено, що в певному діапазоні частот критичний момент та критичне ковзання залишаються практично незмінними, що підтверджує ефективність керування. При подальшому зниженні частоти спостерігається погіршення механічних характеристик - зменшення критичного моменту при одночасному збільшенні критичного ковзання.

Проаналізовано умови праці при монтажі та експлуатації вентиляційних систем на переробному підприємстві. Ідентифіковано основні шкідливі та небезпечні виробничі чинники. Розроблено комплекс техніко-організаційних заходів та обґрунтовано засоби індивідуального захисту персоналу, що забезпечують безпечні умови праці відповідно до чинних нормативних документів.

Виконано оцінку економічної ефективності впровадження частотнорегульованого електропривода вентиляційної системи аспірації. На основі розрахунків визначено, що річна економія становить 319 тис. грн, а загальні інвестиції - 247 тис. грн. Простий термін окупності становить приблизно 9 місяців, дисконтований - 10 місяців, чиста приведена вартість при ставці дисконту 10 % складає близько 1,71 млн грн. Це свідчить про високу інвестиційну привабливість проекту.

У роботі доведено, що застосування частотнорегульованого електропривода в системах вентиляції переробного виробництва є технічно обґрунтованим, енергетично ефективним та економічно доцільним рішенням. Створена математична та імітаційна модель дозволяє досліджувати режими роботи системи й синтезувати оптимальні закони керування. Отримані результати підтверджують значний потенціал для підвищення енергоефективності вентиляційних установок та зменшення експлуатаційних витрат підприємств переробної промисловості.

Результати дослідження мають практичну цінність для модернізації існуючих та проектування нових вентиляційних систем переробних підприємств.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [О.І. Соловей, В.П. Розен, П.Г. Плешков, С.В. Серебренніков, В.Ф. Ткаченко, К.Г. Петрова]; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
2. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник.-К:Кондор, . - 408 с.2005
3. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Ч. 1 : навч. посіб. — Вінниця : ВНАУ, 2020. — 387 с.
4. Худяєв О. А., Обруч І. В., Асмолова Л. В. Частотне керування асинхронним електроприводом : навч. посіб. — Харків : Право, 2023. — 250 с.
5. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електропривода : навч. посіб. — Київ : НТУУ «КПІ», 2016.
6. Оптимальне керування в електромеханічних системах [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» з дисципліни «Системи оптимального та інтелектуального керування» / О. І. Толочко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. - Електронні текстові дані (1 файл: 2865 кБ). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 116 с.
7. Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й., Сисюк Г. Ю., Садовой О. В. Моделювання електромеханічних систем : підруч. - Кременчук, 2001. - 376 с.
8. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Санченко О.В. Романенко О.І. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. – К.: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.
9. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів [Електронний ресурс].–Режим доступу: https://dnaop.com/html/29590_20.html
- 10.Офіційний сайт Schneider Electric [Електронний ресурс].–Режим доступу: <https://www.se.com/ua/uk/>
11. Офіційний сайт Siemens [Електронний ресурс].–Режим доступу: <https://www.siemens.com>.

12. Яцун М.А. Електричні машини: Навч. посібник- Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004.-440с.
13. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник / М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К.: Знання, 2009. – 399 с.
14. Ловейкін В.С. Частотне керування асинхронним приводом / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. – Ніжин.: Міланік, 2011. – 98 с.
15. Промислові вентилятори [Електронний ресурс].–Режим доступу: <https://ukrvent.com/c6-28-10-html/>
16. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с. – Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/13066>
17. Охорона праці та промислова безпека. Монографія / К. Н. Ткачук, Л.Д.Третьякова, Д. В. Зеркалов, О. І. Полукаров, С. Ф. Каштанов // К.: Основа, 2014.– 123с.
18. Klimat-group Монтаж систем вентиляції. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://klimat-ua.com/ua/montazh_sistem_ventilyacii
19. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. // К.: 2014.- 141с.
20. ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень».
21. Джеджула В. В. Вентиляція та кондиціонування громадських об'єктів : навч. по б. - Вінниця : ВНТУ, 2021. - 71 с.
22. Інструментальний енергоаудит : навч.-практ. посіб. / Юрченко Є. Л. та інш. - Електрон. вид. – Дніпро : Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2025. – 277с.
23. Припливно-витяжна установка з рекуперацією тепла. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vents-shop.com.ua/>
24. Верба В.А, Загородніх О.А. Проектний аналіз: Підручник. Київ: КНЕУ, 2000. -332с.