

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

НУБІП України

УДК 631.171:621.311

ПОГОДЖЕНО

Директор ІНІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

проф. Д.Т.Н.
вчене звання, науковий ступінь

КАПЛУН В.В.

підпис

” ” 2023 р.
число місяць рік

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій

доц. К.Т.Н.

вчене звання, науковий ступінь

ОКУШКО О.В.

підпис

” ” 2023 р.
число місяць рік

НУБІП України

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ
ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ

НУБІП України

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код / назва)

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

НУБІП України

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Усенко С.М.

(ПІБ)

Керівник магістерської роботи

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Чусько Р.М.

(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Бірюченко Б.Г.

(ПІБ)

НУБІП України

КИЇВ – 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій

У.Т.Н. доцент
науковий ступінь, вчене звання

/ОКУШКО О.В./

підпис

ГПБ

2023 року

число

місяць

рік

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Бірюченку Богдану Григоровичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Підвищення енергоефективності електроприводу вентиляторної установки»

затверджена наказом ректора НУБіП України від “ ” 2023 р. № “ ”

Термін подання завершеної роботи на кафедру

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи:

- Результати науково-дослідницької роботи кафедри ЕЕЕ.
- Публікації співробітників кафедри ЕЕЕ.
- Результати навчально-дослідницької практики.
- Система ПЗР і ТО електрообладнання сільськогосподарських підприємств
- Нормативні документи: ПУЕ, ПТЕЕС та ПБЕЕС, ДСТУ, ДБН тощо.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

- Аналітична частина.
- Технологічна частина.
- Електротехнічна частина.
- Розробка питань електропостачання та енергозбереження.
- Дослідницька частина.
- Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Перелік графічного матеріалу (за потреби)

Дата видачі завдання “ ” 2023 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Чуєнко Р.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

Бірюченко Б.Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали студента)

Реферат

Пояснювальна записка: 75 сторінок, 25 рисунків, 16 таблиці, 8 використаних джерел.

Актуальність теми. У зв'язку з тим що серед регульованих електроприводів домінуюче становище займають частотно-регульовані асинхронні електроприводи, їх масове застосування дозволяє вирішувати не тільки технологічні завдання, а й проблему енергозбереження. В останні роки в багато країн в цьому зацікавлені та приділяється велика увага теоретичним і практичним питанням енергозбереження. Це пов'язано в першу чергу з тим, що оцінюють литомі витрати енергії на одиницю вартості валового внутрішнього продукту (ВВП).

В деяких літературних джерелах в систематизованому вигляді викладено комплекс питань, пов'язаних з можливостями енергозбереження при використанні частотно-регульованих асинхронних електроприводів, головним чином досягги підвищення енергетичних показників, шляхом застосування енергозберігаючого електроприводу. Намічені схемні рішення, що забезпечують енергозбереження при управлінні різними технологічними процесами і вентиляційними механізмами.

Мета кваліфікаційної магістерської роботи. Підвищення енергетичних показників частотно-регульованого електроприводу для вентиляції.

Об'єкт дослідження. Електротехнічні системи і комплекси, що включають в себе вентиляційні установки та частотно-регульований електропривод.

Новизна роботи.

- Всебічний аналіз проблем проектування установок місцевого провітрювання.

- Економія електроенергії при роботі вентилятора місцевого провітрювання за рахунок застосування частотно-регульованого електропривода.

- Проведено імітаційне моделювання та аналітичні розрахунки, які підтверджують підвищення енергетичних показників електроприводу.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- розглянути проблеми експлуатації вентиляторів головного провітрювання та місцевого провітрювання;

- ознайомлення з сучасними регульованим електроприводом вентиляторів;

- розглянути енергоефективні способи регулювання і стабілізації режиму роботи вентилятора за критерієм мінімум втрат енергії;

- визначити особливості конструкції та ознайомлення з розповсюдженим для провітрювання тупикових виробок вентилятором місцевого провітрювання типу ВМ;

- скласти універсальну імітаційну модель для визначення споживання електроенергії вентиляторним агрегатом місцевого провітрювання з регульованим електроприводом.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНЦІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. БАЗОВІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВЕНТИЛЯТОРІВ МІСЦЕВОГО ПРОВІТРЮВАННЯ З ЧАСТОТНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	7
1.1 Вентилятори місцевого провітрювання	7
1.2 Частото-регульований асинхронний електропривод.....	9
1.3 Шляхи збільшення енергоефективності асинхронних двигунів	16
РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД МЕТОДИК ТА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВЕНТИЛЯЦІЇ.....	24
2.1 Розрахунок вентиляції тупикових виробок	24
2.2 Мінімізація втрат у частотно-регульованому приводі вентиляції	25
2.2.1 Система скалярного частотного управління приводом вентилятора	26
2.2.2 Вплив режиму роботи вентилятора на втрати енергії в приводі.....	28
2.2.3 Енергозберігаючий алгоритм управління частотно-регульованим приводом	30
2.3 Підвищення ККД вентиляторів та систем електроприводу	35
2.4 Проблеми проектування установок місцевого провітрювання	37
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВЕНТИЛЯТОРА МІСЦЕВОГО ПРОВІТРЮВАННЯ ТА ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	40
3.1 Вибір вентилятора та особливості конструкції	41
3.2 Обґрунтування вибору регульованого електроприводу вентиляційних установок.....	43
3.2.1 Вибір і визначення параметрів електродвигуна.....	46
3.2.2 Розрахунок робочих параметрів вентилятора при зміні кутової швидкості робочого колеса.....	47

3.2.3 Структурна схема вентиляторного агрегату з частотно-регульованим електроприводом.....	51
3.3 Розрахунок частотно-регульованого електропривода вентилятора місцевого провітрювання	53
3.3.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна.....	54
3.3.2 Розрахунок параметрів структурної схеми частотно-регульованого електроприводу.....	57
3.3.3 Розрахунок статичних характеристик асинхронного частотно-регульованого електроприводу вентилятора агрегату	60
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВЕНТИЛЯТОРА МІСЦЕВОГО ПРОВІТРЮВАННЯ Й ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ	68
4.1 Розробка структурної моделі частотно-регульованого електропривода вентиляційної установки місцевого провітрювання.....	68
4.2 Розробка імітаційної моделі регульованого та нерегульованого електроприводу вентиляційних установок для визначення споживання електроенергії.....	69
ВИСНОВОК.....	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКРОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АД – асинхронний двигун

АВК – асинхронний-вентильний каскад

АСУ – автоматизована система управління

АІН – автономний інвертор напруги

АІС – автономний інвертор струму

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ВГП – вентилятори головного провітрювання

ВМП – вентилятор місцевого провітрювання

ГВУ – головна вентиляційна установка

ДМ – датчик потужності

ЕРС – електрорушійна сила

ЗН – задаючий пристрій

ЗІ – датчик інтенсивності

ККД – коефіцієнт корисної дії

ОУ – об'єкт управління

ПЧ – перетворювач частоти

ПІ-регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

ПЧ – перетворювач частоти

РН – регулятор напруги

САУ – систему автоматичного управління

НУБІП України

НУБІП України

ВСТУП

Актуальність даної теми визначається домінуванням частотно-регульованих асинхронних електроприводів серед регульованих

електроприводів. Використання цих електроприводів масово вирішує не лише технологічні завдання, але й сприяє вирішенню проблеми збереження енергії.

Останнім часом багато країн виявляють інтерес до цього питання та приділяють велику увагу теоретичним і практичним аспектам енергозбереження. Ця

зацікавленість пояснюється перш за все оцінкою питомих витрат енергії на одиницю вартості валового внутрішнього продукту.

Деякі літературні джерела містять упорядковану інформацію щодо питань, пов'язаних із можливостями зменшення споживаної енергії при використанні частотно-регульованих асинхронних електроприводів. Головною метою є

підвищення продуктивності використання електроенергії шляхом застосування ефективних електроприводів, які спрямовані на зменшення енергетичних витрат.

Також у цих джерелах розглядаються можливі схемні рішення для досягнення ефективного енергозбереження під час керування різними технологічними процесами та системами вентиляції.

Зменшення витрат енергії стало однією з передових стратегій у сфері технологічної політики у всіх розвинених країнах світу. Це обумовлено кількома

факторами. По-перше, зростає свідомість про обмеженість і вичерпуваність основних джерел енергії. По-друге, зростають труднощі та витрати на видобуток

цих ресурсів. По-третє, зростає усвідомлення глобальних екологічних проблем, пов'язаних з використанням енергії.

Частотно-регульований привід вирізняється високою точністю та можливістю широкого діапазону регулювання швидкості обертання

електродвигуна. Він також здатний забезпечувати плавний пуск і гальмування, що робить його найбільш ефективним методом управління. Оптимальним

рішенням є використання частотного управління, яке не лише підвищує загальний коефіцієнт корисної дії вентилятора, але й допомагає мінімізувати

втрати в приводі за допомогою енергозберігаючих алгоритмів управління.

Мета роботи: Збільшення показників ефективності частотно-регульованого електроприводу для систем вентиляції.

Для досягнення цілі було сформульовано такі завдання:

Аналіз проблем експлуатації вентиляторів головного провітрювання та місцевого провітрювання.

Вивчення сучасних регульованих електроприводів для вентиляторів.

Розгляд енергоефективних методів регулювання та стабілізації робочого режиму вентилятора з акцентом на мінімізацію енергетичних втрат.

Аналіз конструкційних особливостей та ознайомлення з поширеними вентиляторами місцевого провітрювання типу ВМ, які використовуються в системах провітрювання.

Створення універсальної імітаційної моделі для оцінки споживання електроенергії вентиляторним агрегатом місцевого провітрювання з використанням регульованого електроприводу.

Об'єкт дослідження: Системи та комплекси в галузі електротехніки, що включають в себе вентиляційні установки та частотно-регульований електропривід.

Область дослідження: принципи та інструменти для керування електротехнічними комплексами та системами.

Предмет дослідження: управління вентиляційною установкою з частотно-регульованим електроприводом.

Кваліфікаційна магістерська робота складається з: вступу, п'яти розділів який складається з підрозділів, висновків та списку використаних джерел. У магістерській роботі міститься 16 таблиць і 25 зображень.

РОЗДІЛ 1. БАЗОВІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВЕНТИЛЯТОРІВ МІСЦЕВОГО ПРОВІТРЮВАННЯ З ЧАСТОТНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

1.1 Вентилятори місцевого провітрювання

На сьогоднішній день жодне велике виробництво не може обійтися без вентиляції місцевого провітрювання, яке б воно не було, чи гірничорудне підприємство, чи вугільна шахта. Використання вентиляції місцевого провітрювання значно зменшує ризик вибуху газових сумішей в дальніх тупикових частинах гірських виробок. Тому для того, щоб не було нещасних випадків з вибухами газових сумішей потрібен грамотний і правильний вибір установок вентиляторів у вентиляційні мережі шахт – тому це буде не тільки гарантією безпеки для працівників які там будуть працювати, але ще й буде важливою виробничо-економічною складовою гірничорудного промислу.

У цей же час у будь-якій шахті є дуже велика кількість тупикових просторів, в яких накопичується газопоилова суміш. Для того, щоб доставляти повітря в ці проблемні місця, встановлюють спеціальні вентилятори, які називаються вентиляторами місцевого провітрювання. У цього устаткування є дуже специфічні вимоги, які обумовлені деякими властивостями функцій і умовами їх експлуатації [1].

Вентилятори місцевого провітрювання мають мати малі габаритні розміри для того, щоб їх можна було розмістити у виробках площа перетину яких може бути дуже обмеженою. Спеціальні місця для їхнього розміщення робляться тільки для масивних вентиляторів які мають результативність $10 \text{ м}^3/\text{с}$ і навіть більше [2].

Вентилятори, що використовуються для місцевого провітрювання також повинні мати змогу з'єднуватись з трубопроводом, по якому вони будуть подавати та відсмоктувати повітря. У колодцях, в яких встановлено устаткування, може відбуватися виділення метану. Цей факт може показати ще

одну особливість вентиляторів місцевого провітрювання: вони мають бути виконані з вибухобезпечного матеріалу.

Основними конструкціями вентиляторів місцевого провітрювання являються:

- Висока надійність роботи і економічність, за рахунок їхньої великої аеродинаміки та меридіонального прискорення;

- Ця система має чутливе налагодження кількості подачі повітря в глухий кут;

- При мінімальних габаритних розмірах та вазі, колодязний вентилятор має високі показники аеродинамічності;

- Простий при обслуговуванні та ремонті, за рахунок простого доступу до всіх вузлів та деталей;

- Має високі показники безпеки пристрою тутешнього провітрювання.

Шахтний вентилятор складається з таких елементів, як асинхронний електродвигун, робоче колесо та патрубок який має антивибуховий пристрій (пристрій поміщений в захисний кожух). Робоче колесо шахтного вентилятора

бере участь у налагодженні тиску у робочій зоні вентилятора, регулювання тиску

робочої зони вентилятора може проводитися тільки при зупинці вентиляційного

пристрою. Також колодязний вентилятор має комплектно теплого та вібраційного захисту [3].

При збільшенні довжини вироблення, буде збільшуватися довжина трубопроводу, що веде до збільшення витоків в ньому. Усе це змушує до

необхідності збільшення продуктивності шахтного вентилятора. З цього можна

зробити наступний висновок, що вентилятор місцевого провітрювання зобов'язаний бути також налагоджувальним.

Найвідоміші моделі шахтних вентиляторів місцевого провітрювання в нинішній час є вентилятори серії ВМЕ які діляться на моделі, як (ВМЕ-5, ВМЕ-6, ВМЕ-8, ВМЕ-12).

Вентилятори цієї серії використовуються для провітрювання глухих кутів гірничих виробок у рудних та вугільних шахтах, щільність повітря яких до

1,3 кг/м³, температури від -20 до +35°C, запиленість до 50 мг/м³ та вологість до 95% (при температурі +25°C).

Ті перераховані моделі шахтних вентиляторів які були наведені раніше, мають дуже великий ряд переваг:

- це можливість відключення вентилятора коли в шахті перевищена нормальна температура;
- це можливість їх застосування при вентиляції невеликих виробок;
- конструктивна властивість вентиляторів дозволяє з'єднувати два вентилятора послідовно для утворення великого тиску в трубопроводі;
- вентилятору можуть також комплектуватись глушником шуму;
- конструкцією вентилятора передбачений противбуховий пристрій, що дає змогу вентилятору розширити область роботи в шахті.

1.2 Частото-регульований асинхронний електропривод.

Основною перевагою асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в порівнянні з двигунами постійного струму є висока надійність, менша економічна вартість та простота у виготовленні та експлуатації. При поєднанні з високими налагоджувальними і динамічними показниками та асинхронний частотно-регульований електропривод в високоєфективний тип регульованого електроприводу. Велике застосування якого може дозволити вирішити питання не тільки технологічного характеру, а й питання енергозбереження [1].

Трифазний асинхронний електродвигун (АД) дуже відомий тип електричної машини. Частота обертання магнітного поля n_0 в електричній машині визначається частотою мережі живлення f_1 :

$$n = n_0 = \frac{60 f_1}{p};$$

де p - число пар полюсів.

Відмінність частоти обертання ротора n від n_0 визначається за допомогою ковзання s :

НУБІП України

Звідси ми отримаємо частоту обертання короткозамкненого ротора:

$$n = n_0 - n_0 s = (0,96 \dots 0,98) n_0.$$

З даного виразу випливає, що єдиний раціональний спосіб плавно налагоджувати швидкість асинхронного двигуна буде зміна частоти до його обмоток по яким протікає напруга (рис 1.1). Інакші способи регулювати швидкість асинхронного двигуна – це кількісна зміна числа пар полюсів або амплітуди напруги. Також припускається використання спеціальних і економічно не вигідного двигуна, які пов'язані з дуже великим погіршенням енергетичних характеристик.

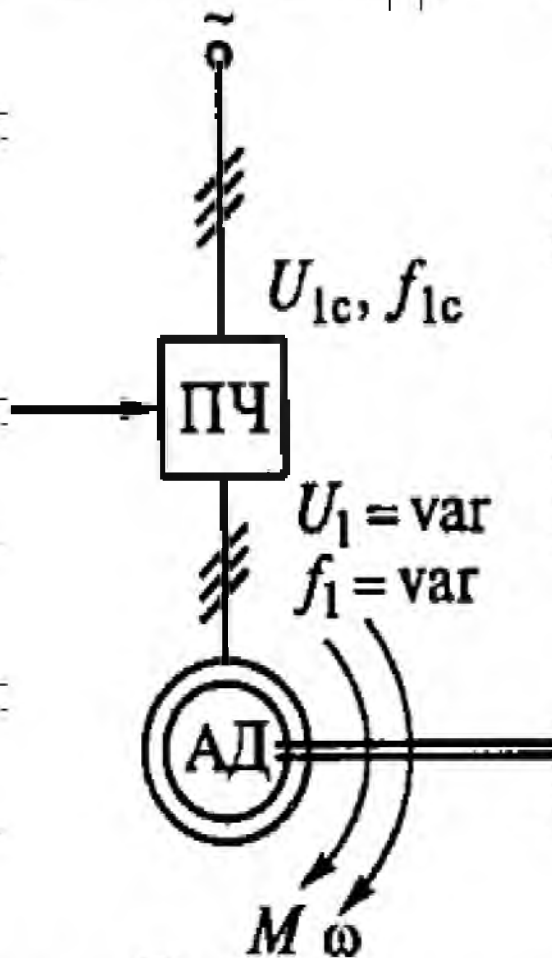


Рис. 1.1 – Структура частотно-регульованого електроприводу

Коли зменшуєш частоту від номінальної необхідно також змінювати амплітуду напруги. Тому що ЕРС яка наводиться в обмотках статора, буде приблизно дорівнювати:

$$E_1 = 4,44\Phi f_1 w_1 k_{об} = U_1,$$

(1.1)

для того щоб зберегти номінальний магнітний потік і максимальний момент при зміні частоти потрібно виконати умову [5]:

$$\Phi = \Phi_{ном} = \frac{U_1}{f_1} = const.$$

(1.2)

Якщо не буде дотримуватися ця умова, тобто зменшення частоти вниз при номінальній напрузі, недопустимо, тому що магнітний потік почне зростати відповідно до кривої намагнічування і буде різке зростання струму I_μ .

Для досягнення максимальної продуктивності вибирається приводний двигун, залежно від потужності. Якщо потрібне регулювання продуктивності і технологічних параметрів, то використовуються наступні методи управління процесом:

- У випадку електроприводу без можливості регулювання через механічну частину (наприклад, за допомогою дроселів, засувки, клапанів і інших засобів).

- У разі наявності регульованого електроприводу використовується система управління електроприводом, яка забезпечує необхідні процеси запуску та гальмування, а також регульовані режими залежно від швидкості [1].

Характеристики асинхронного двигуна при частотному регулюванні представлені у формі, поданій на рисунку 1.2.

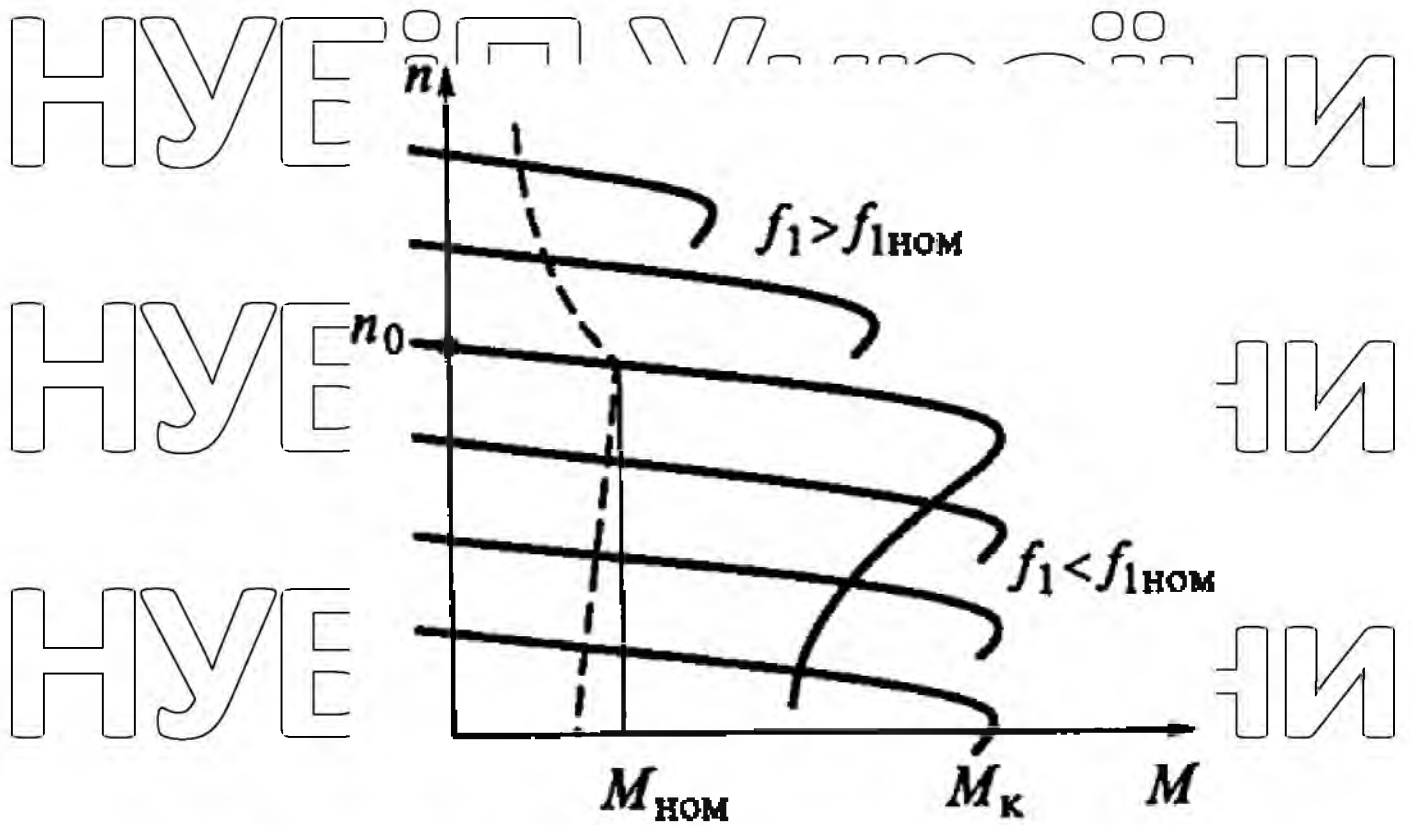


Рис. 1.2 – Механiчна характеристики асинхронного двигуна при частотному регулюваннi

Для компенсацiї падiння напруги в обмотках статора i збереження сталого моменту крутного оберту при низьких частотах збiльшують напругу, як показано на рисунку 1.3.

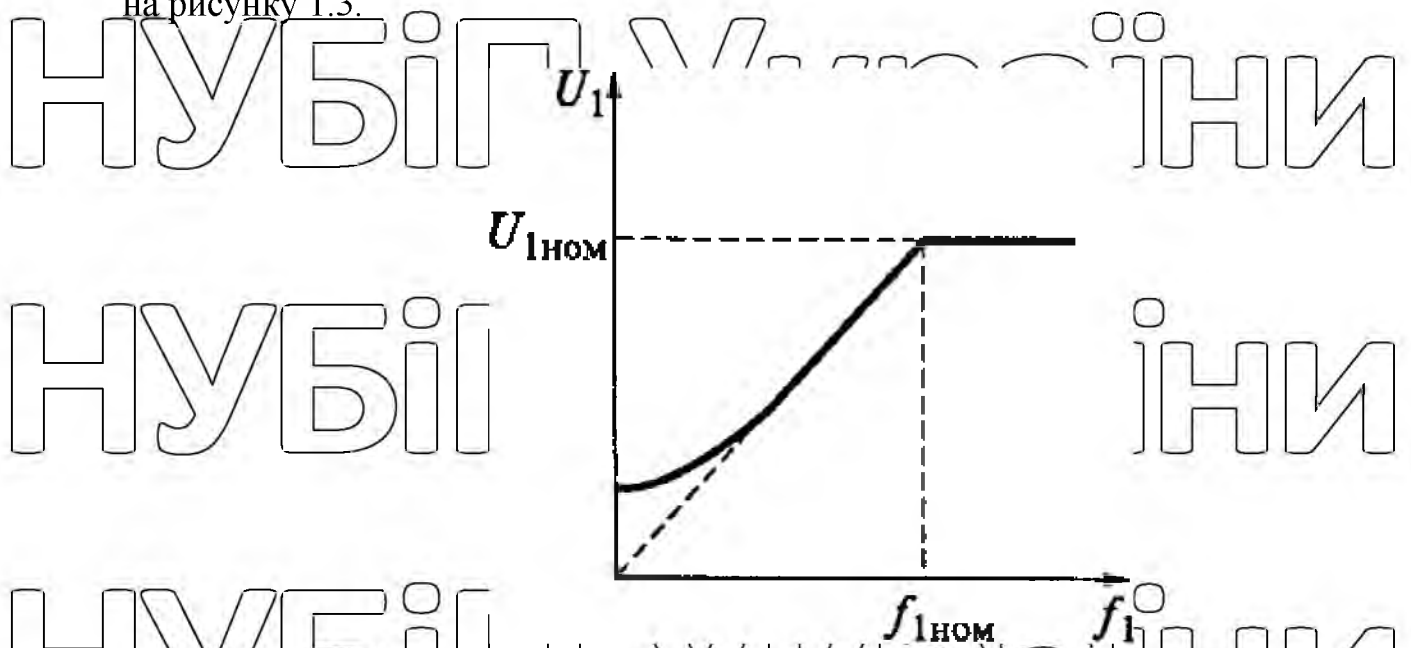


Рис. 1.3 – Залежнiсть напруги вiд частоти при частотному регулюваннi

Допустимий момент тривалості, який може витримати двигун при частотному регулюванні, зменшується при низьких швидкостях через погіршення вентиляції і зменшується обернено-пропорційно швидкості при високих швидкостях через зменшення магнітного потоку[4].

Відомо, що використання регульованого електроприводу, спільно з системами технологічної автоматики, дозволяє набагато більш плавно, динамічно, гнучко і енергоефективно впливати на виробничий процес. Це призводить до постійного зростання популярності та розширення використання регульованих електроприводів. Ця тенденція дозволяє досягти найвищих стандартів якості виробничого процесу та значного зниження витрат енергії та інших ресурсів[1].

Регулювання частоти має ще одну важливу перевагу - можливість точного керування швидкістю при пусках і зупинках, що сприяє підвищенню ефективності та збереженню ресурсів.

Також ця технологія дозволяє враховувати особливості роботи обладнання та забезпечує гладкий перехід між режимами роботи для забезпечення стабільності процесу.

Під час частотного регулювання можна налаштовувати швидкість зміни поля $\omega_0(t)$ за будь-яким заданим темпом. На рисунку 1.4 наведено приклади двох варіантів запуску: прискореного (1) і уповільненого (2). Швидкість ротора $\omega(t)$ відстає від швидкості поля $\omega_0(t)$ на величину, що дорівнює електромеханічній сталій часу T_M .

$$T_M = \frac{J \Sigma \Delta \omega}{\Delta M},$$

що визначається по робочій ділянці механічної характеристики двигуна.

Момент, який розвивається двигуном на основній ділянці перехідного процесу буде пропорційний прискоренню:

$$M_{дин} = J \Sigma \varepsilon = J \Sigma \frac{d\omega_0(t)}{dt}$$

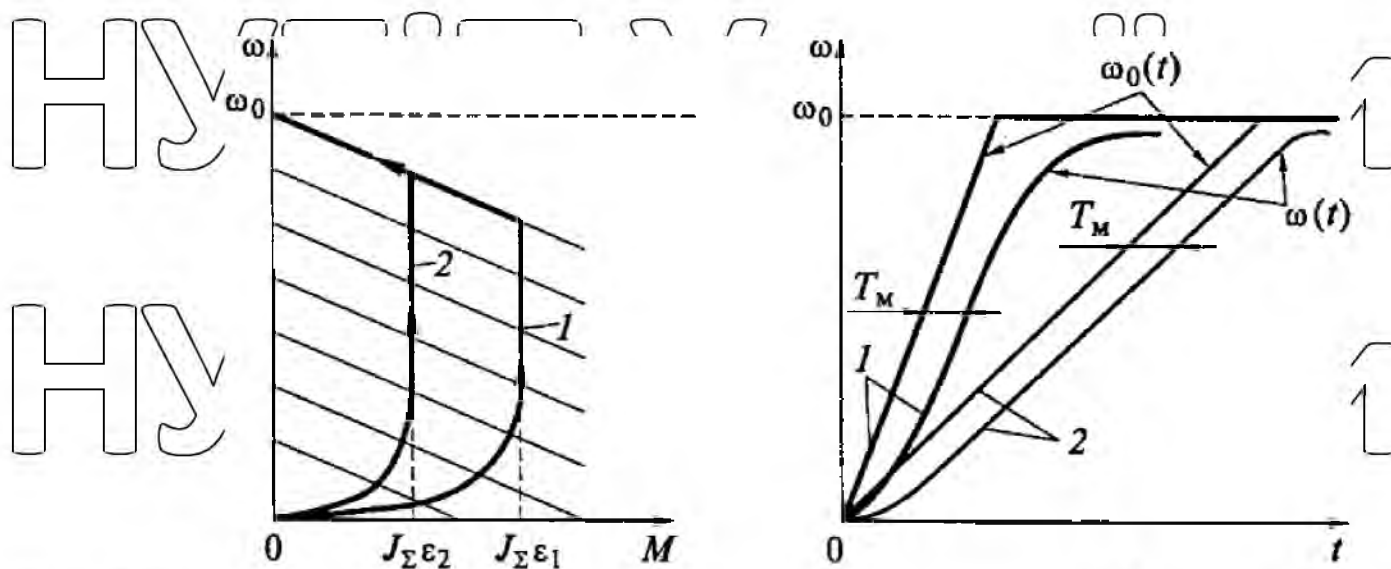


Рис. 1.4 – Графіки частотного пуску асинхронного двигуна в координатах

$\omega - M$ (а) та $\omega - t$ (б)

У сучасних системах електроприводу контроль параметрів зазвичай здійснюється за допомогою різних типів напівпровідникових перетворювачів. Отже, при визначенні основних параметрів приводу важливо враховувати математичний опис та моделі обраних перетворювачів, а також систем управління ними. Цей підхід дозволяє здійснювати аналіз процесів в системі "перетворювач - асинхронний двигун" та забезпечує ефективну регулювання та контроль роботи електроприводу.

Аналіз процесів може бути проведений з урахуванням послідовного складу напруги живлення, який виникає при використанні напівпровідникових перетворювачів. Також, аналіз може проводитися, враховуючи лише гладку складову напруги живлення. Додатково, можливий аналіз з урахуванням насичення магнітного кола асинхронної машини або при вваженні, що параметри залишаються сталими [5]. Такий аналіз допомагає зрозуміти та прогнозувати роботу системи електроприводу в різних умовах і підтримувати її оптимальну ефективність.

Втрати енергії під час пуску можуть бути представлені як площа фігури, яка утворюється між кривими електромагнітної потужності $P_{em} = M\omega_0$ та потужності на валу $P_2 = M\omega$. Ця фігура наявна на рисунку 1.5 [1].

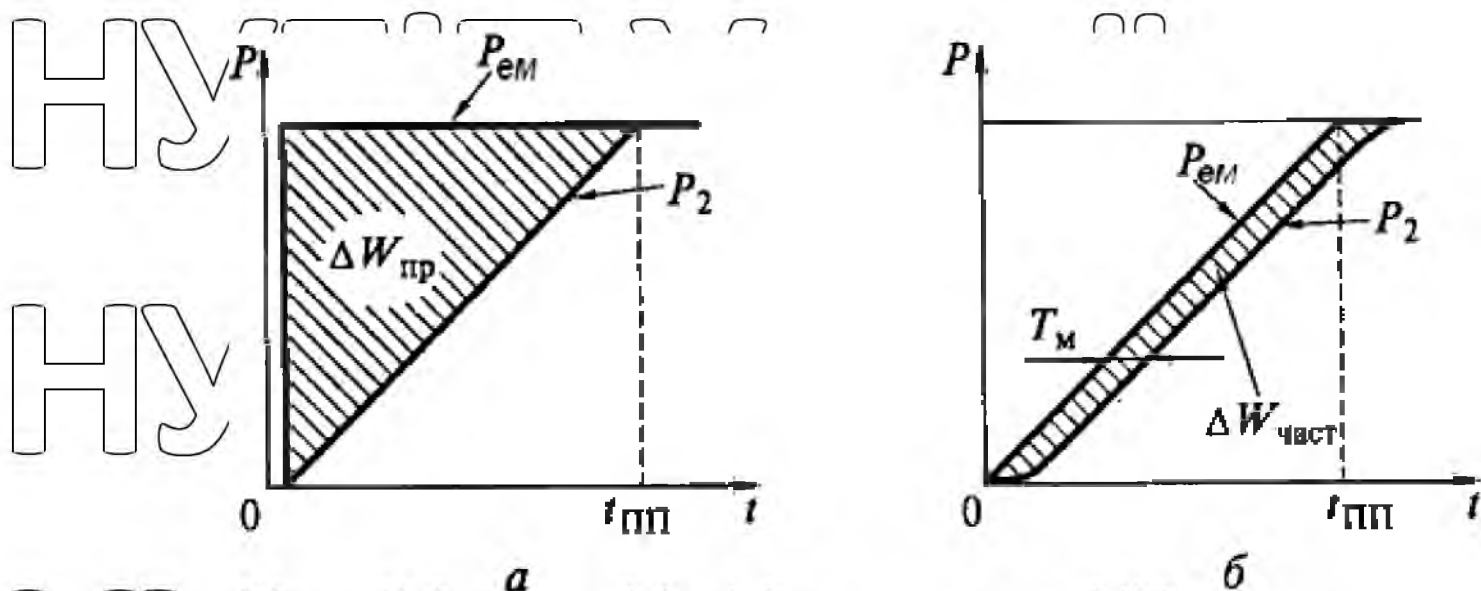


Рис. 1.5 – Втрати енергії при прямому (а) та частотному (б) пуску

При прямому пуску або гальмуванні електромагнітна потужність майже миттєво зростає, тоді як потужність на валу, яка пропорційна швидкості, збільшується у некерованому темпі перехідного процесу. Втрати енергії можна визначити за допомогою площі трикутника, який видно на рисунку 1.5 (а) [1].

Втрати енергії під час частотного пуску (гальмування) визначаються заштрихованою областю на рисунку 1.5 (б) і залежать від керованого часу перехідного процесу $t_{mн}$:

$$\Delta W_{\text{част}} = \Delta W_{\text{пр}} \cdot 2 \frac{T_M}{t_{mн}}$$

Отже, частотно-регульований асинхронний електропривід у своїй найпростішій реалізації (згляньте на рисунок 1.2) дозволяє регулювати швидкість в обох напрямках від основної, яка відповідає частоті 50 Гц, з мінімальними можливими втратами. Він також дозволяє керувати часом перехідних процесів і зменшувати втрати енергії, пов'язані з цими перехідними процесами, до бажаного рівня [5]. Така система дозволяє досягати високої ефективності та точності в управлінні роботою електроприводу.

1.3 Шляхи збільшення енергоефективності асинхронних двигунів

Вибір правильної потужності асинхронного двигуна дійсно є одним із ключових заходів для зменшення споживання енергії та ефективного енергозбереження.

Однак, крім цього, існують інші напрями та системи керування асинхронними електроприводами, які сприяють зниженню споживання енергії.

Перший напрямок, пов'язаний зі зниженням втрат в електроприводі, стосується виконанням заданих технологічних операцій з використанням певних тахограм і режиму занурення. Цей напрямок застосовується до електроприводів, які функціонують в режимах пуску та гальмування або в тривалих режимах з повільним змінням навантаження, зокрема, для систем вентиляції. В таких електроприводах можлива значна економія електроенергії завдяки зменшенню втрат як у сталих, так і у перехідних режимах роботи [1].

Другий напрямок пов'язаний зі зміною технологічного процесу, шляхом переходу до більш сучасних методів регулювання електроприводу і параметрів самого технологічного процесу. Це призводить до зменшення споживання енергії електроприводом. Прикладом можуть бути електроприводи турбомеханізмів, такі як вентилятори. У багатьох випадках ефект цього підходу не обмежується лише економією електроенергії в електроприводі, а також може призводити до економії інших ресурсів, наприклад, води [1]. Такий підхід спрямований на комплексне покращення процесу та ефективного використання ресурсів.

Для обох зазначених напрямків енергозбереження характерно те, що вони спрямовані на зниження споживання енергії саме в системі електроприводу, перший напрямок коли споживання енергії зменшується завдяки зниженню втрат енергії в електроприводі, що відбувається за рахунок оптимізації режимів роботи, переходу до більш ефективних методів регулювання та збільшення точності управління, а другий напрямок коли споживання енергії зменшується через використання менш енерговитратних методів управління технологічним процесом, що дозволяє оптимізувати роботу самого процесу і, відповідно,

зменшити навантаження на електропривід. В двох випадках споживання енергії у системі електроприводу є центральним пунктом впливу на ефективність та енергозбереження, і обидва напрями спрямовані на зменшення цього споживання.

Перший напрямок для зниження втрат енергії в асинхронному електроприводі, який включає в себе обґрунтований вибір встановленої потужності двигуна, є критично важливим для досягнення ефективності та енергозбереження. Основні шляхи в цьому напрямку включають наступні аспекти

1. Обґрунтований вибір потужності, важливо визначити потужність двигуна так, щоб вона точно відповідала реальним потребам керованого механізму. Надмірно велика або занижена потужність може призвести до неефективного використання електроенергії. Оптимальний вибір потужності допомагає зменшити непотрібне споживання енергії. Перевірка по нагріванню, важливо враховувати режими навантаження та перевіряти двигун на нагрівання. Надмірне нагрівання може бути ознакою неправильного вибору потужності або низької ефективності роботи. Підвищення кваліфікації персоналу важливо навчати та підвищувати кваліфікацію розробників, проектувальників та обслуговуючого персоналу, щоб вони могли зрозуміти та виконувати правильний вибір потужності та ефективно керувати електроприводом ці заходи спрямовані на покращення ефективності електроприводу та зниження споживання енергії, що є важливими для досягнення енергозбереження в системах автоматизації і електроприводу.

2. Перехід на більш економічні двигуни, які використовують покращені матеріали і технології, може бути дієвим способом підвищення ефективності та енергозбереження в системах електроприводу. Основні аспекти цього напрямку включають, збільшення маси активних матеріалів, використання більше заліза та міді може покращити ефективність двигунів, оскільки ці матеріали мають високу провідність і допомагають зменшити втрати енергії. Застосування більш досконалих матеріалів і технологій, використання новітніх матеріалів та

технології може дозволити створити більш ефективні двигуни з меншими втратами енергії, підвищення номінального значення ККД і коефіцієнта потужності, оптимізація дизайну двигуна для досягнення вищого коефіцієнта корисної дії (ККД) і коефіцієнта потужності може покращити його ефективність.

Хоча вартість таких модернізованих двигунів може бути високою, економія енергії, яку вони можуть забезпечити протягом тривалого періоду служби, може перевищити початкові капітальні витрати. Ця стратегія особливо приваблива в ситуаціях, коли вартість спожитої електроенергії значно вища за вартість двигуна та його модернізації, що може бути особливо актуально для довготривалих проєктів і промислових систем.

3. Перехід до більш досконалої з енергетичної точки зору системи електроприводу є важливим кроком для зменшення втрат енергії в системі. Для

досягнення цього можна використовувати різні методи регулювання

електроприводу. Основні аспекти цього напрямку включають реостатне регулювання. Цей метод регулювання може призводити до значних втрат енергії, оскільки велика частина потужності витрачається на розігрівання в реостаті. Такі

системи можуть бути менш ефективними з енергетичної точки зору. Системи

ТПН-АД (трансформаторного пуску-гальмування асинхронного двигуна). Ці

системи можуть забезпечувати кращий контроль і зменшення втрат при пуску та гальмуванні, порівняно з реостатним регулюванням. Втрати енергії менше, але можуть бути вищі, ніж у частотно-регульованих системах. ПЧ-АД

(преобразователь частоты-асинхронный двигатель): Ці частотно-регульовані

системи надають найбільш точний та ефективний спосіб регулювання електроприводу. Вони дозволяють значно знизити втрати енергії в перехідних режимах, забезпечуючи ефективніше використання електроенергії.

Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, і вибір конкретного методу регулювання залежить від конкретних вимог і потреб системи електроприводу. У разі, коли ефективність та енергозбереження є важливими факторами, частотно-регульовані електроприводи можуть бути оптимальним варіантом.

4. Використання спеціальних технічних засобів для мінімізації втрат енергії в електроприводі є ефективним способом підвищення ефективності системи. Основні аспекти цього підходу включають. Регулятори напруги на основі тиристорного перетворювача напруги (ТПН). Ці пристрої дозволяють регулювати напругу, подаючи її на статор двигуна відповідно до рівня навантаження. Це дозволяє зменшити втрати енергії в системі, особливо при роботі зі змінним навантаженням. Крім того, ТПН можуть виконувати інші важливі функції, такі як управління режимами пуску, гальмування, захист та діагностика, що підвищує технічний рівень приводу. Перетворювачі частоти з режимом енергозбереження. Деякі перетворювачі частоти мають режим енергозбереження, який дозволяє оптимізувати роботу електроприводу для зменшення втрат енергії. Ці пристрої можуть бути економічно доцільними, особливо для систем зі змінним навантаженням, навіть при їх відносно високій вартості. Обираючи між регуляторами напруги і перетворювачами частоти з режимом енергозбереження, слід враховувати конкретні потреби системи електроприводу і ефективність відповідного обладнання. Обидва підходи можуть бути корисними для підвищення енергоефективності систем електроприводу зі змінним навантаженням.

5. Удосконалення алгоритмів керування електроприводом і перехід до регульованого електроприводу є важливими шляхами для зменшення споживання енергії в системах електроприводу. Для цього можуть бути використані такі підходи:

- Розробка ефективних алгоритмів керування: Розробка алгоритмів керування електроприводом, які базуються на енергетичних критеріях оцінки, дозволяє оптимізувати роботу системи для зменшення споживання енергії. Це може включати в себе оптимізацію режимів пуску, гальмування та роботи в сталому режимі з метою зниження втрат.

- Регулювання технологічних параметрів: Перехід до регульованого електроприводу, який дозволяє включати в контур регулювання різні технологічні параметри, такі як тиск, витрати, температура, може сприяти

зменшенню споживання енергії в системі. Це дозволяє оптимізувати процеси виробництва та регулювати їх відповідно до потреб.

-Комплексний підхід: Для досягнення максимального ефекту в енергозбереженні в електроприводі слід враховувати кілька можливих шляхів одночасно. Комплексний підхід дозволяє оптимізувати всі аспекти роботи системи електроприводу і забезпечити максимальну енергоефективність.

-Оптимізація моменту інерції: Оскільки вентилятори мають великий момент інерції, оптимізація цього параметра може бути важливою для зменшення втрат енергії під час пуску. Це може включати в себе вибір правильного розміру приводного двигуна або використання інших технічних рішень для зниження моменту інерції.

Загальною метою всіх цих заходів є підвищення енергоефективності електроприводу та зменшення споживання енергії в системах зі змінним навантаженням, таких як вентилятори.

Зміна швидкості вентилятора для регулювання подачі повітря є одним із широко використовуваних методів контролю вентиляційних систем. Якщо подачу вентилятора регулювати зміною швидкості, то можна використовувати формулу, в якій потужність споживача (вентилятора) визначається як добуток реактивного опору і квадрата струму на виході вентилятора. В такому випадку формула має вигляд $H = RQ^2$. Коефіцієнт корисної дії (ККД) вентилятора може залишатися відносно постійним у всьому діапазоні регулювання, оскільки він характеризує відношення активної потужності (корисної роботи) до загальної потужності (споживаної від мережі), і зміна швидкості роботи вентилятора може зберігати це відношення сталим. Змінюючи швидкість вентилятора, ви змінюєте обсяг подачі повітря та споживану потужність, але при цьому ККД вентилятора може залишатися сталим, що вказує на ефективне використання енергії в системі.

Потужність яку споживає з мережі асинхронний двигун, можна оцінити за виразом:

НУБІП України

частотне регулювання:

$$P_1 = \frac{1 + a S_{ном} Q}{1 - a S_{ном}} Q^3;$$

НУБІП України

Зображений на рисунку 1.6 графік ілюструє споживану потужність вентилятора в залежності від витрати повітря (Q) при використанні частотно-регульованого електроприводу порівняно з регулюванням шибером. Пунктирна

НУБІП України

лінія на графіку показує споживану потужність двигуна. З урахуванням коефіцієнта корисної дії (ККД) вентилятора. З цього графіка видно, що при використанні частотно-регульованого електроприводу споживана потужність вентилятора значно нижча, ніж при регулюванні шибером, майже на всьому

НУБІП України

діапазоні витрати повітря (Q). Це свідчить про те, що частотно-регульований електропривід дозволяє ефективно знижувати споживану потужність при різних режимах роботи вентилятора, зокрема, при низьких витратах повітря. Такий

НУБІП України

підхід дозволяє забезпечити більшу енергоефективність і керованість вентиляційною системою, що є важливим для економії енергії та оптимізації роботи системи вентиляції в промислових та комерційних додатках.

НУБІП України

НУБІП України

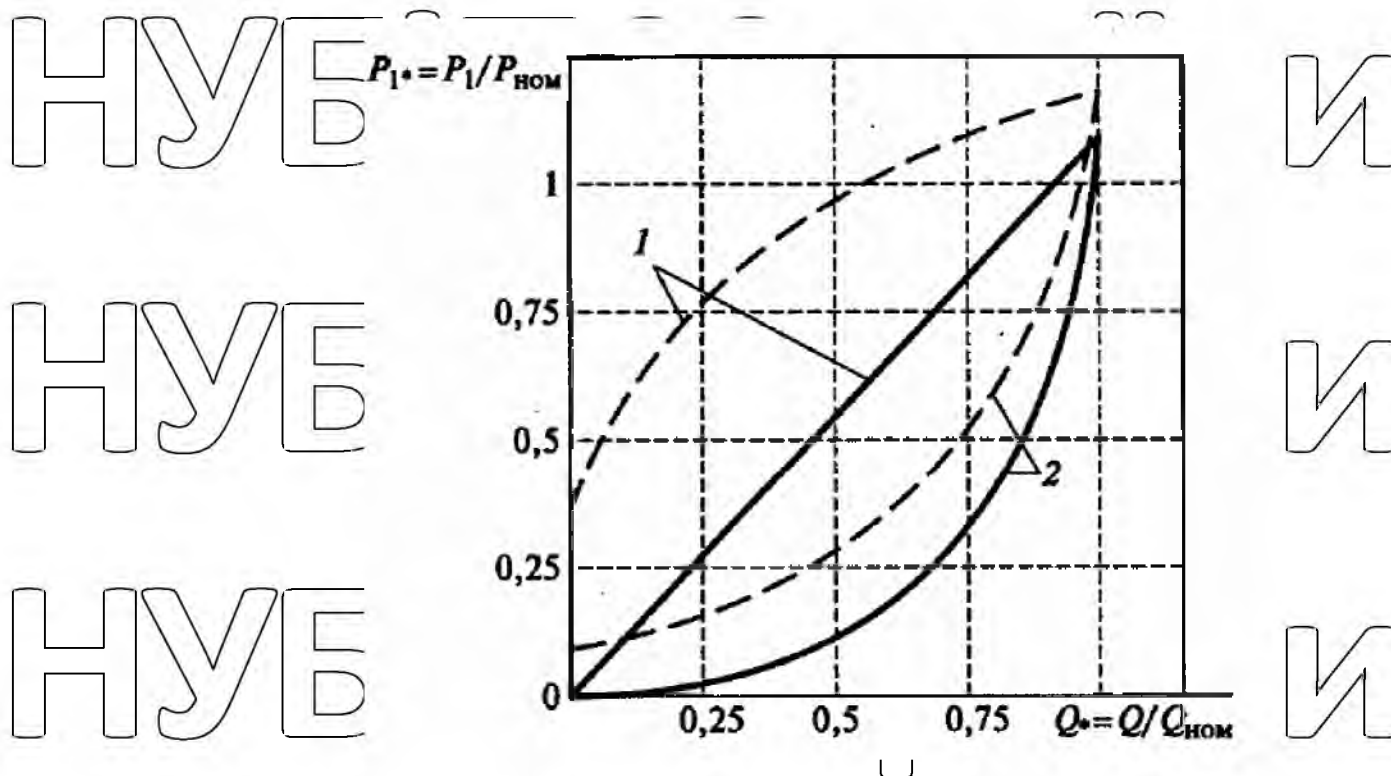


Рис. 1.6 – Залежність зміни потужності, яка використовується

електроприводом вентилятора, при регулюванні шибером (1) і частотним регулюванні (2)

Застосування регульованого електроприводу має особливе значення для вентиляторів. Деякі дані показують, що ККД вентиляторів при використанні регульованого електроприводу в середньому більше на 12% в порівнянні з нерегульованим електроприводом. Крім того, використання регульованого приводу для вентиляторів може спростити конструкцію турбомашин, дозволяючи виключити направляючий апарат, і забезпечує можливість одночасної роботи двох або більше вентиляторів[4].

Зазвичай діапазон регулювання швидкості для вентиляторів обмежується значенням, яке не перевищує 2:1. Глибоке регулювання, яке виходить за ці межі, застосовується рідко. Це обумовлено тим, що споживана потужність вентиляторів залежить від частоти обертання кубічно, і глибоке регулювання може бути менш ефективним і менш доцільним з енергетичної точки зору.

Пуск вентилятора може проводитися в двох режимах: при закритому спрямовуючому апараті, коли машина розвантажена, і при повністю відкритому спрямовуючому апараті. У першому випадку максимальний момент при пуску

двигуна вентилятора становить приблизно 0,4 номінального моменту, а в другому - у деяких випадках майже номінальний момент. При пуску потужних вентиляторів з великим діаметром робочого колеса, зазвичай встановлюють обмеження на прискорення, щоб уникнути появи надмірних динамічних навантажень на лопатках робочого колеса.

Вентилятори є механізмами з тривалим режимом навантаження та великою тривалістю роботи протягом року. Навантаження на валу приводного двигуна незначне, і перевантажень не виникає. Важливо враховувати, що вентилятори мають значний момент інерції, і це необхідно враховувати при розрахунках пускових характеристик електроприводів для них.

Оскільки частотно-регульовані асинхронні електронприводи переважають серед регульованих систем, їх масове застосування вирішує не лише технологічні завдання, але й важливу проблему енергозбереження. Тому, зазвичай, для відповідності цим вимогам, використовуються прості та доступні системи частотного регулювання.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД МЕТОДИК ТА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВЕНТИЛЯЦІЇ

2.1 Розрахунок вентиляції тупикових виробок

Розрахунок вентиляції закінчених приміщень проводиться наступним чином.

1. Визначається метод провітрювання, який обирається залежно від гірничо-геологічних і технологічних умов.

2. Обчислюється необхідний об'єм повітря, при цьому витрата повітря визначається наступним чином: враховуються природне газовиділення, кількість працюючих осіб, мінімальна швидкість руху повітря і тепловий фактор. Для

окончаткового розрахунку використовується максимальна витрата повітря. У

разі будівництва шахт також проводиться розрахунок витрати повітря, що

враховує гази, що утворюються під час зварювальних робіт. Для тупикових

виробок довжиною до 300 метрів і незалежно від глибини проводиться

розрахунок одразу для максимальної довжини. У випадку тупикових виробок

більшої довжини розглядається розрахунок для окремих інтервалів, таких як 300,

600, 900 метрів, включаючи максимальну довжину.

Обчислення обсягу повітря виконується окремо для забійного простору (Q_{3n}) і загалом для видобутку (Q_{rt}).

3. Здійснюється визначення аеродинамічного опору трубопроводу.

4. Депресія (в Паскалях, Па) для повної розрахункової довжини трубопроводу визначається за певною формулою.

$$h = R_m Q_e^2$$

де R_m - аеродинамічний опір трубопроводу, Н·с² / м⁸.

5. Здійснюється вибір вентилятора на основі розрахункових значень h_B і

Q_B , після чого ці значення наносяться на характеристики вентиляторів для

місцевого провітрювання. Обирається вентилятор, який відповідає значенням h_B і Q_B і при цьому має максимальний коефіцієнт корисної дії[6].

2.2 Мінімізація витрат у частотно-регульованому приводі вентиляції.

Провітрювання підземних виробок є значним споживачем енергії на гірничому підприємстві, і воно може становити до 50% від загальної енергії, що споживається. Частина витрат у собівартості продукції також дорівнює 30%.

Висока енергосмітність процесу вентиляції шахт є результатом низької ефективності головних вентиляційних установок (ГВУ) шахт і значних витрат енергії на різних етапах її передачі та перетворення. Основним способом підвищення енергетичної ефективності ГВУ шахт є впровадження сучасних концепцій провітрювання, які відповідають реальним потребам шахти у свіжому повітрі. Ефективність цього процесу також залежить від того, на якому етапі гірських робіт вона впроваджується, оскільки це може вплинути на ефективність та витрати енергії.

Другий за важливістю спосіб зекономити енергію полягає в мінімізації витрат вентиляторів головного провітрювання (ВГП). Більшість цих вентиляторів працюють з ККД нижче межі придатності для промислового використання, яка становить $\eta = 60\%$. Для підвищення ККД запропоновані методи, що включають в себе частотне або комбіноване управління ВГП та вибір вентилятора відповідно до умов, які гарантують оптимальний ККД. За допомогою частотного управління можливо не лише підвищити ККД вентилятора, але й мінімізувати втрати енергії в системі приводу завдяки використанню екстремальних законів управління. Мінімізація витрат у системі приводу також сприяє додатковій економії енергії.

Таким чином, розробка оптимальних правил управління та їх впровадження в існуючі системи керування є актуальною задачею. Для реалізації цих методів рекомендується використовувати високовольтний частково-регульований електропривід ВГП, побудований на базі багаторівневого інвертора і багаторівневого активного випрямляча. Це дозволить досягти більшого рівня керованої ефективності та знизити витрати енергії, що відпрацьовуються системою.

2.2.1 Система скалярного частотного управління приводом вентилятора

Система управління вентиляцією головного провітрювання (ВПГ), яка реалізує комплекс енергозберігаючих заходів, включає в себе кілька аспектів, які варто розглянути окремо. По-перше, необхідно розглянути спосіб регулювання та стабілізації роботи ВПГ в умовах зміни параметрів вентиляційної мережі. Другий аспект полягає в методах оптимального управління двигуном з метою мінімізації втрат енергії. Кількість подаваного повітря на виробку визначається системою контролю, яка враховує план гірських робіт, стан атмосфери у шахті та кількість працюючого персоналу. Крім того, обсяг подачі повітря може змінюватися на різних етапах робіт. Важливо, щоб ВПГ мала можливість швидкого та ефективного регулювання цього процесу відповідно до потреб і умов на місці.

Випадкові коливання параметрів вентиляційної мережі, такі як зміни температури зовнішнього повітря, рух внутрішньо-шахтного транспорту, відкриття та закриття дверей і перемичок, мають значний вплив на режим провітрювання. Це створює потребу в стабілізації цього режиму. З цією метою система автоматичного управління (зображена на рис. 2.1) забезпечує оперативне регулювання та стабілізацію режиму провітрювання ВПГ.

Ця система управління має два рівні контролю. Зовнішній контур служить для підтримки заданої продуктивності вентилятора. Датчик продуктивності порівнює виміряні значення з бажаними і, у разі відхилення, регулятор генерує команду на регулювання швидкості двигуна для внутрішнього контуру. Використання ІП-регулювання допомагає усунути статичні помилки і забезпечує точність регулювання при збуреннях в вентиляційній мережі.

Внутрішній контур відповідає за регулювання швидкості двигуна і фактично є скалярною системою управління частотно-регульованим електроприводом з використанням широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

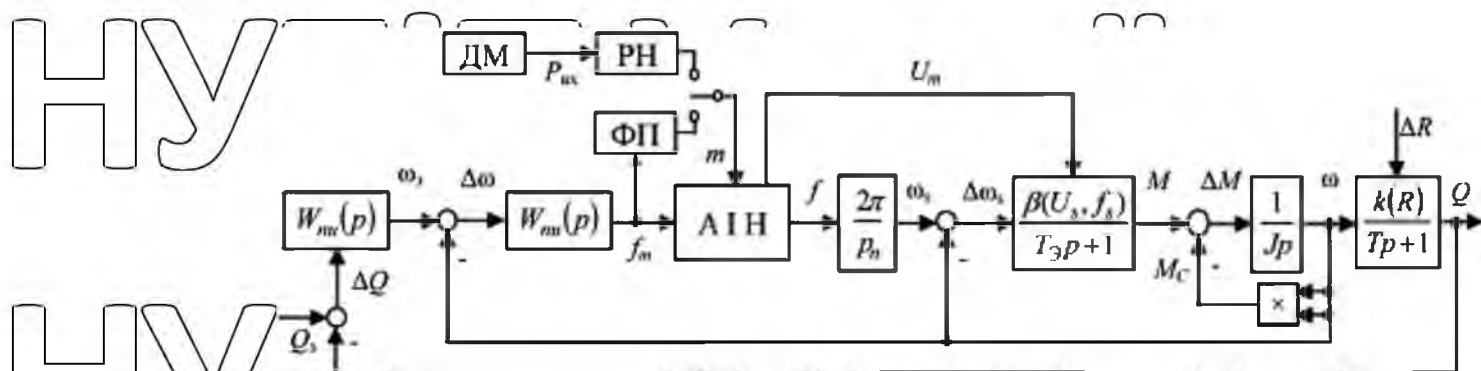


Рис. 2.1 – Схема системи управління вентилятора

У разі поточної неузгодженості швидкості вентилятора, система формує амплітуду і частоту моделюючого сигналу широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Ці параметри визначають амплітуду і частоту першої гармоніки напруги на виході автономного інвертора напруги (АІН). У традиційних електроприводах, амплітуда і частота зазвичай пов'язані зі специфічним законом управління, який визначає вихідну напругу функціонального перетворювача (ФП). На вхід цього ФП подається сигнал частоти.

Для вентиляторів часто використовується певний закон управління, який може бути представлений за залежністю $U / f^2 = const$ [4].

У цій роботі викладено метод енергозбереження в управлінні приводом, при якому оптимальний режим роботи досягається за допомогою зміни потокозчеплення двигуна. Ця зміна компенсує відхилення по швидкості двигуна за рахунок регулювання частоти, яка контролюється внутрішнім контуром системи управління. Розглянемо передавальні функції цієї системи. Для асинхронного двигуна враховані передавальні функції електричної та механічної частин двигуна [8]:

$$W_{el}(p) = \frac{M(p)}{\Delta\omega_s(p)} = \frac{\beta}{T_e p + 1};$$

$$W_{mech}(p) = \frac{\omega(p)}{M(p)} = \frac{M - M_c}{Jp}$$

Звідси $\beta = 2M_k / \omega_{s0} s_k$ – жорсткість характеристики, $T_e = 1 / \omega_{s0} s_k$ – постійна часу; J – момент інерції на валу двигуна; M_c – момент опору; M_k – критичний момент; s_k – критичне ковзання; ω_{s0} – номінальна частота обертання

поля статора; $\Delta\omega_s = (\omega_s - \omega)$; ω – кутова швидкість обертання ротора.

2.2.2 Вплив режиму роботи вентилятора на втрати енергії в приводі

Для отримання оптимальних законів управління спочатку проводилися дослідження втрат енергії в приводі при незалежній зміні потокозчеплення для різних режимів роботи вентилятора. Під час зміни потокозчеплення, швидкість обертання ротора постійно підтримувалася за рахунок автоматичної зміни частоти напруги статора через контур регулювання швидкості. Продуктивність і відповідна швидкість двигуна варіювалися в діапазоні від 40% до 100% від номінальних значень.

На рисунку 2.2 представлені графіки втрат енергії в сталі та міді двигуна, які були отримані під час підтримання постійної швидкості обертання і зміни потокозчеплення двигуна [4].

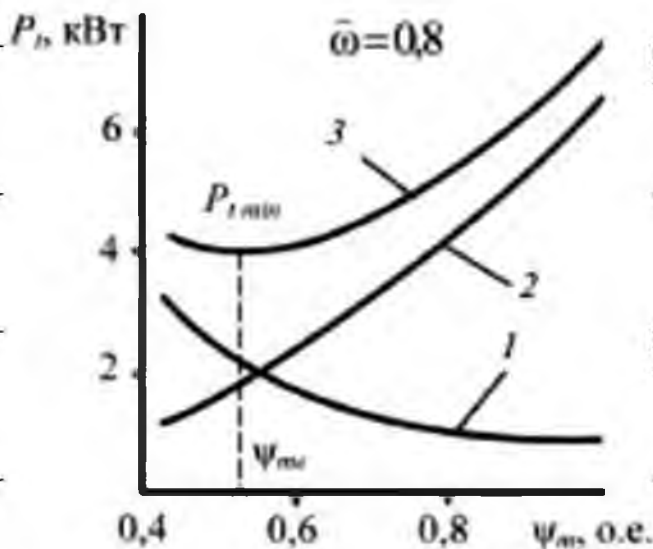


Рис. 2.2 – Залежність втрат енергії в сталі(1), міді(2) і сумарних втрат(3) від потокозчеплення

Як видно з графіків, коли потокозчеплення зменшується від номінального значення, втрати в сталі зростають, а втрати в міді зменшуються. Це призводить

до того, що сумарні втрати досягають мінімального значення $P_{1,min}$ при оптимальному значенні потокозчеплення $\psi_e = 0,52\psi$. Аналогічні залежності сумарних втрат від потокозчеплення спостерігаються і для інших значень

швидкості двигуна, як показано на рисунку 2.3 [8].

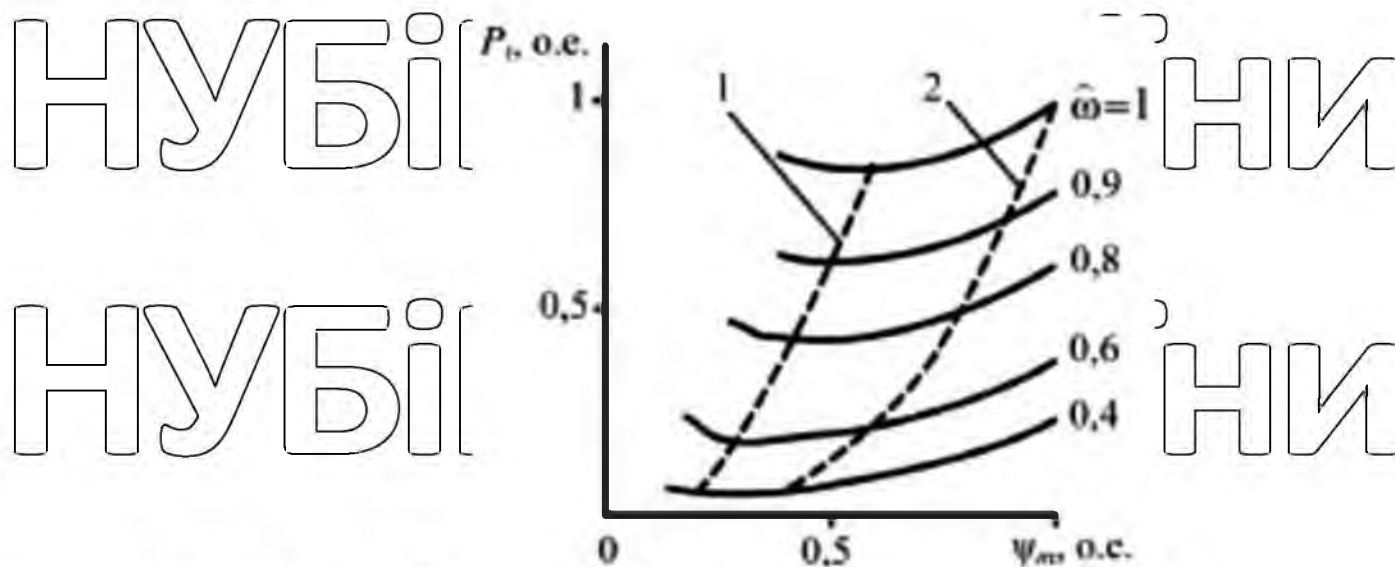


Рис. 2.3 – Втрати енергії при різних швидкостях двигуна при оптимальному(1) та традиційному(2) законі управління

На рисунку 2.3 видно, що оптимальне значення потокозчеплення та відповідний мінімум втрат змінюються в залежності від режиму роботи приводу.

Крива $P_{t,min}(\psi_e)$ (позначена лінією 1 на рисунку 2.3), проведена через точки екстремумів, може бути використана для визначення оптимального значення потокозчеплення в залежності від швидкості. Це може бути виражено у вигляді скалярного закону управління, який забезпечує режим мінімальних втрат енергії в приводі.

Для порівняння, на рисунку 2.3 також показана потужність втрат (крива 2) при застосуванні традиційного скалярного закону управління для вентиляторного навантаження приводу: Uf^2 . Порівняння втрат, відображених кривими 1 і 2 на рисунку 2.3, свідчить про те, що використання оптимального закону управління приводом дозволяє зменшити втрати енергії на 5-10% у порівнянні з традиційним методом управління [8].

Оптимальний закон управління може бути реалізований безпосередньо у функціональному перетворювачі. Проте важливо зауважити, що отриманий закон є відповідним тільки для певного типу двигуна і не є загальноприйнятим.

Для іншого типу двигуна необхідно провести процедуру похідного закону управління. Екстремальний закон управління може бути реалізований, проводячи обчислення оптимального значення потужності на основі математичної моделі двигуна, яка вбудована в пам'ять мікропроцесорного пристрою [6]. Проте для досягнення оптимуму потрібно визначити точні моделі багатьох видів втрат, які враховують нелінійний характер намагнічування, температурну і частотну залежність параметрів двигуна та інші фактори. Це призводить до складності системи управління і потреби в застосуванні адаптивного спостерігача координат [9].

Застосований ітераційний метод для пошуку мінімізації втрат енергії не має зазначених недоліків. Цей метод дозволяє успішно знизити втрати енергії як в інверторі, так і в двигуні. Оптимальний режим роботи двигуна визначається прямо під час роботи приводу [10].

2.2.3 Енергозберігаючий алгоритм управління частотно-регульованим приводом

Метод пошуку використовує РН (рис. 2.1), де вхідним сигналом є потужність приводу, яка вимірюється датчиком потужності (ДМ) протягом рівних інтервалів часу. Один з алгоритмів регулятора визначає значення потоку, при якому вимірювана потужність буде мінімальною для конкретної робочої точки приводу, що характеризується швидкістю і моментом. Мінімізація вхідних потужностей відповідає мінімізації втрат енергії. Цей метод має властивість залишатися стійким до змін параметрів двигуна та їх змін під час роботи.

Розглянемо двоетапний градієнтний алгоритм для пошуку екстремуму функції втрат, структурна схема якого показана на рисунку 2.4.

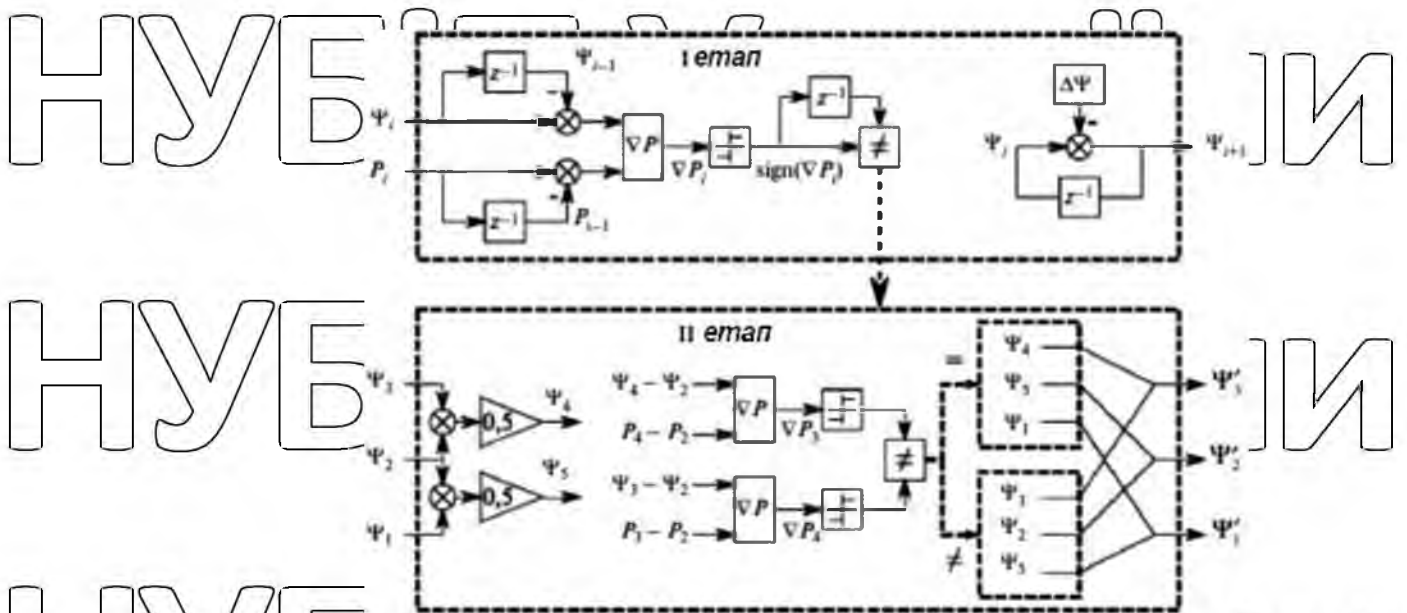


Рис. 2.4 – Схема регулятора напруги, що використовує градієнтний алгоритм для пошуку

На першому кроці пошуку визначається область, де ми шукаємо екстремум. Початкове значення поточкозчеплення служить нашою стартовою точкою для пошуку. На кожній ітерації ми зменшуємо псточкозчеплення на фіксований крок $\psi_i = \psi_{i-1} + \Delta\psi$ і потім обчислюємо вивідну потужність

$\Delta P_i = (P_i - P_{i-1}) / (\psi_i - \psi_{i-1})$ Потім ми порівнюємо цю вивідну потужність з похідними, отриманими на попередньому етапі інтеграції [6].

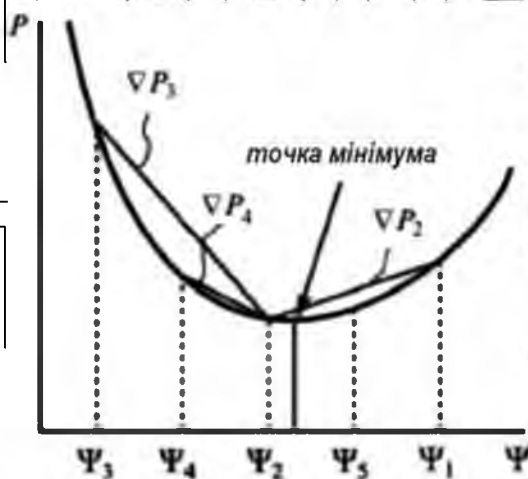


Рис. 2.5 – Для уточнення області пошуку мінімуму потужності

Під час другої фази алгоритму відбувається точне визначення області, де знаходиться мінімум. Процес роботи алгоритму можна побачити на рисунку 2.5,

який відображає момент часу безпосередньо після переходу до другого етапу пошуку. Мінімальна потужність розташована в області [13, 14].

На рисунку 2.6 наведено ілюстрацію роботи градієнтного методу пошуку, який використовує дані, отримані за допомогою розглянутої раніше моделі приводу.

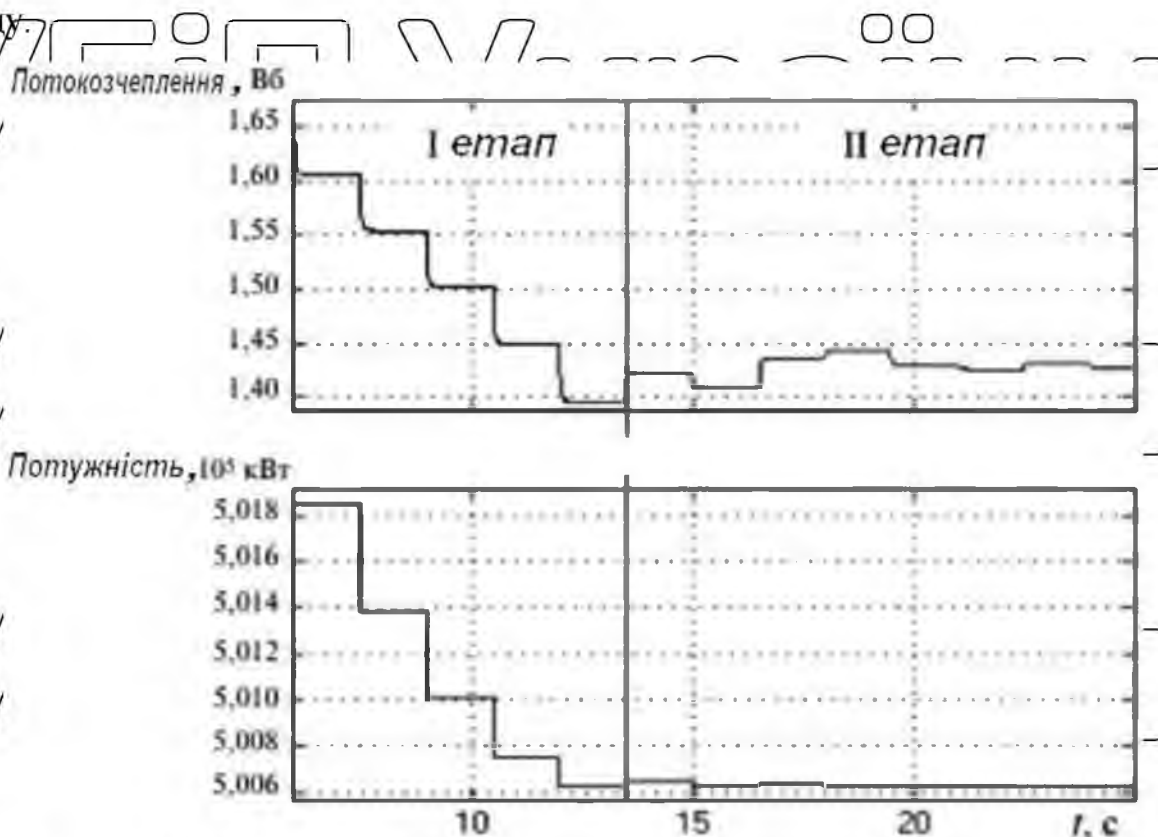


Рис. 2.6 Перехідний процес при пошуку мінімуму градієнтним алгоритмом

Зміна потокозчеплення намагнічуючого контуру відбувається від номінального значення до оптимального. Крок в часі обраний таким чином, щоб завершити перехідний процес у двигуні, який викликаний зміною напруги на попередньому кроці. У досліджуваній моделі зміна потокозчеплення відсувалася з інтервалом 1,5 секунди.

З діаграми видно, що час, потрібний для пошуку екстремуму, становить приблизно 20 секунд. Цей час значно менший за інтервал часу між можливими змінами механічного навантаження на привід, що відповідає повільним процесам трансформаційних змін режиму пров. трювання підземних виробок.

Запуск електродвигуна з великим моментом інерції на валу вимагає значного часу і високого струму. Це також може спричинити провали напруги в розподільній мережі та додаткові втрати енергії. Щоб частково вирішити цю проблему, застосовується плавний пуск, при якому частота і амплітуда напруги плавно змінюються за лінійним законом від нуля до номінального значення. Є можливість поліпшити показники пускового режиму, використовуючи інші закони управління двигуном. Для наочності можливостей енергозберігаючого приводу під час запуску використовується один з варіантів законів управління двигуном, отриманий з умови мінімізації функції втрат енергії в двигуні[10]:

$$W_{st-l} = \int P_l(t) dt \rightarrow \min.$$

де P_l - потужність втрат, W_{st-l} - втрати енергії за час пуску.

Під час плавного пуску частота поступово збільшується протягом встановленого періоду часу. Система управління налаштовує амплітуду напруги згідно зі змінною частотою, враховуючи закон управління, який визначає відношення між вектором напруги та вектором частоти, що зображені на рисунку

2.7.

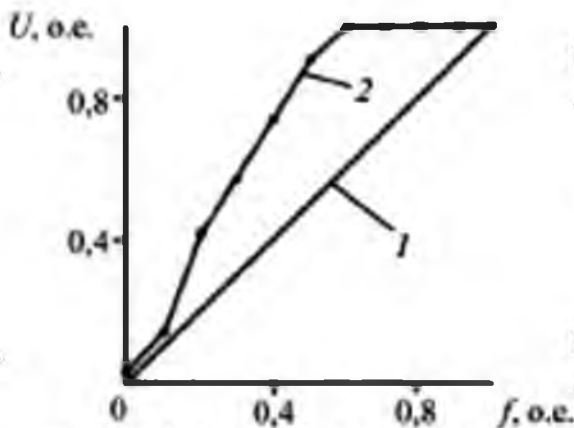
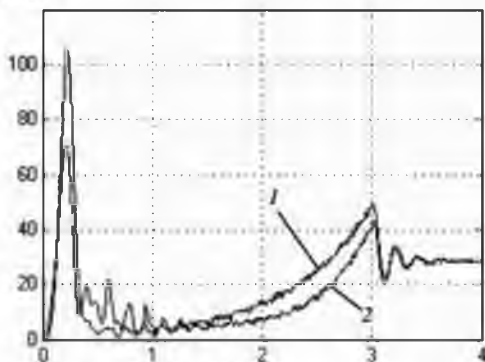


Рис. 2.7 – Графіки традиційного закону пуску(1) та оптимального закону пуску(2)

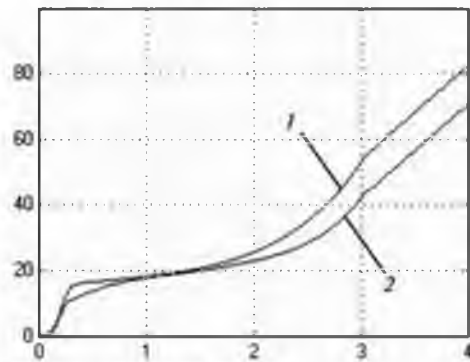
Після завершення пуску система управління переходить до алгоритму управління, спрямованого на збереження енергії, у стаціонарному режимі роботи.

Результати симуляції пуску електроприводу потужністю 1,5 МВт, які були отримані при використанні оптимального і традиційного методів керування, можна побачити на графіках на рисунку 2.8. З них видно, що застосування оптимального методу керування дозволило зменшити енергетичні втрати в двигуні під час пуску на 25% (рис. 2.8, б). При цьому активна потужність двигуна (рис. 2.8, в) практично не змінюється, а реактивна потужність під час пуску знижується (рис. 2.8, г), що веде до підвищення коефіцієнта потужності.

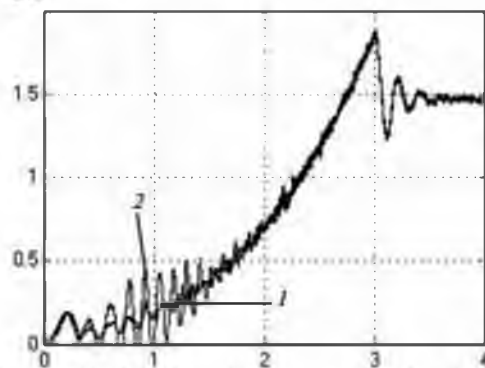
а) Втрати потужності
 P_r , кВт



б) Втрати енергії, кДж



в) Активна потужність P ,
 10^6 Вт



г) Реактивна потужність, Q
 10^5 ВАр

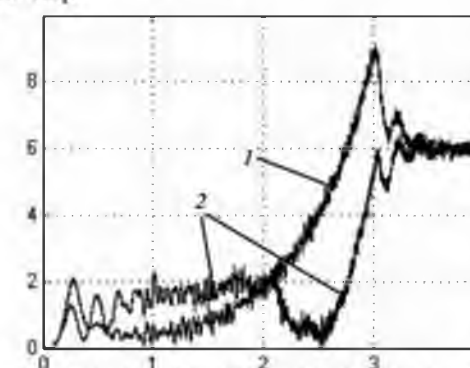


Рис. 2.8 – Порівняння енергетичних показників процесу пуску двигуна при

традиційному (криві 1) та оптимальному (криві 2) законі керування: а - потужність втрат, б - втрати енергії, в - споживана активна потужність; г - споживана реактивна потужність двигуна.

Використання частотно-регульованого приводу для вентиляторів головного провітрювання є необхідним компонентом для впровадження сучасного підходу до організації вентиляції підземних приміщень, який дозволяє належним чином задовольнити реальні потреби шахти в свіжому повітрі[11].

Використання частотного управління дозволяє досягти не лише підвищення ККД вентилятора під час експлуатації, але також забезпечує можливість мінімізації втрат в приводі за допомогою енергозберігаючих алгоритмів управління. З використанням комп'ютерної моделі АД і моделі скалярної системи управління приводом були виявлені залежності сумарних втрат енергії від рівня поточного навантаження при зміні обертової швидкості вала двигуна в рамках діапазону частотного регулювання продуктивності вентилятора.

Отримані залежності дозволили розробити оптимальний закон управління частотою, застосування якого призвело до зниження енергетичних втрат на рівні 5-10% в порівнянні з традиційним методом управління приводом, який використовується при вентиляторних навантаженнях[12]. Комп'ютерне моделювання також продемонструвало, що додатковий ефект збереження енергії може бути досягнутий за допомогою спеціальних методів запуску двигуна, які дозволяють мінімізувати втрати енергії в приводі під час старту і підвищити коефіцієнт потужності шляхом зниження споживаної реактивної потужності. Майбутні дослідження будуть спрямовані на подальше вдосконалення алгоритмів управління, включаючи використання нейронних мереж і нечіткої логіки, а також на визначення оптимальних методів старту на основі генетичних алгоритмів.

2.3 Підвищення ККД вентиляторів та систем електроприводу

Підвищення ККД вентилятора можливе за умови усунення дефектів, які можуть виникати під час монтажу, ремонту та налаштування. До основних дефектів, які можуть стосуватися, наприклад, осьового вентилятора, належать

наступні: неправильне встановлення робочого колеса; невідповідність радіальних і осьових зазорів між робочим колесом і входним патрубком або між робочими лопатками і корпусом вентилятора вимогам; відсутність обтічника на вході осьового вентилятора; неправильна довжина або відсутність дифузора; несумісність кутів установки лопаток напрямного апарата[12].

Усунувши вказані недоліки, можна підвищити ККД вентилятора і відповідно знизити витрати електроенергії (кВт·год):

$$\Delta W = \frac{QH(\eta_2 - \eta_1)t_e}{1000\eta_1\eta_2\eta_\delta\eta_m\eta_n},$$

де Q , H – відповідно подача ($\text{м}^3/\text{с}$) і тиск (Па) вентилятора, що визначаються за показаннями витратоміра і депрестометра (якщо тиск вимірюється у мм вод. ст., то перехід до тиску в Па виконують за співвідношенням 1 мм вод. ст. дорівнює 9,81 Па); t_e – час роботи вентилятора,

под; η_1 , η_2 – ККД вентилятора відповідно до та після усунення дефекту; η_δ , η_m , η_n – фактичні значення ККД двигуна, електричної мережі та передачі (у відцентрових вентиляторів): $\eta_m = 0,93 - 0,97$, $\eta_n = 0,95 - 0,97$, а значення η_δ

залежить від типу двигуна (асинхронний, синхронний) та його фактичного завантаження, що характеризується відповідним коефіцієнтом K_s .

Споживана потужність P_c (кВт), розраховується наступним чином:

$$P_c = \frac{\Delta W_{\text{ліч}} K_{\text{ліч}}}{24},$$

де $\Delta W_{\text{ліч}}$ – різниця показань встановленого на ввідному пристрої лічильника активної енергії за добу; $K_{\text{ліч}} = K_{\text{тг}} K_{\text{тн}}$ – коефіцієнт лічильника; $K_{\text{тг}}$, $K_{\text{тн}}$ – відповідно коефіцієнти трансформації трансформаторів струму і напруги.

Після обчислення фактичного завантаження привідних двигунів, застосовуючи відповідні співвідношення для орієнтовних розрахунків ККД як для асинхронних, так і для синхронних двигунів, визначають відповідне для

даного завантаження орієнтовне значення ККД двигуна η_0 (в відносних одиницях).

ККД вентилятора η_1 (η_2) визначають за даними вимірів, використавши

формулу:

$$\eta_{1,2} = \frac{QH}{1000P_2}$$

2.4 Проблеми проектування установок місцевого провітрювання

Встановлення системи місцевого провітрювання для підготовчих виробок шахт і копалень включає в себе використання вентилятора місцевого провітрювання (ВМП) та гнучкого трубопроводу з такими особливостями:

діаметр вентиляційних труб збільшується на 2-5% при зростанні внутрішнього тиску повітря p і допускає витік повітря в місцях з'єднання труб. Це призводить до зміни аеродинамічного опору труби на довжині трубопроводу між точками r_0 і r_{mp} і сприяє зменшенню обсягу необхідної подачі повітря Q_3 ($\text{м}^3/\text{с}$) до робочого місця. Тому розрахунок параметрів для системи місцевого провітрювання є завданням досить складною задачею[13].

Введемо наступні позначення:

L – довжина трубопроводу, м;

h_B – депресія ВМП, даПа;

Q_B – продуктивність вентилятора, $\text{м}^3/\text{с}$;

$K_{ум}$ – коефіцієнт витоків повітря в трубопроводі,

$$K_{ум} = Q_B / Q_3$$

Завданням розрахунку установки місцевого провітрювання є визначення параметрів характеристики вентилятора, при яких забезпечується подача до забою Q_3 ($\text{м}^3/\text{с}$) повітря з урахуванням його витоків по довжині трубопроводу:

$$P_{mp} = h_B(Q_B).$$

де P_{mp} – падіння тиску повітря в трубопроводі даПа, $\text{кг}/\text{м}^2$.

Зміна тиску і витрати повітря деформується в трубопроводі з витокami, згідно з дослідженнями, описується функціями:

$$p(L) = r_0 Q_3^2 L e^{\alpha} K_{ym};$$

$$Q(L) = Q_3 K_{ym}.$$

де r_0 - базове значення аеродинамічного опору 1 м труби поблизу вибоїни; α - параметр який немає розміру, він характеризує деформацію тіла труб,

$$\alpha = \left[(1-\nu) \frac{d r_0 Q^2 L}{4 E \delta} \right].$$

де ν - коефіцієнт Пуассона для трубного матеріалу; E - модуль Юнга трубної тканини, даПа; δ - товщина стінок труб, м; d_0 - вихідний діаметр труб, м.

Прийнято, що модуль пружності матеріалу з якого зроблена труба E приблизно дорівнює значенню 10^8 даПа, коефіцієнт Пуассона ν знаходиться в проміжку 0,2-0,3 і дорівнює приблизно 0,25 для матеріалів трубних типів.

Коефіцієнт витоків повітря обчислюється за формулою:

$$K_{ym} = \left(1 + 0,3 \times \sqrt[3]{\frac{r_0 L^3}{\pi d_0 I_{36} r_{cm}}} \right)^3.$$

де r_{cm} - коефіцієнт опору шляхів витоків повітря в з'єднанні трубопроводу, віднесений до площі поверхні ланки труб, даПа*с²/м²; I_{36} - довжина ланки трубопроводу, м.

Визначення невідомих параметрів r_0 і r_{cm} здійснюється алгоритмічно за наступною схемою.

Для початку, за фактичними вихідними даними визначається значення r_0 при малій довжині виробки (90-150 м) по формулі:

$$r_0 = \frac{p_{mp}(L)}{Q_3^2 L e^{\alpha 2\lambda}}.$$

Початкове значення α беремо рівним 0,1. Обчислення значення r_0 , коригує α і знову здійснюється перехід до формули обчислення r_0 . Робиться 2-3 ітерації (цього достатньо для забезпечення інженерної точності обчислень)[13].

Початкове значення α встановлюється на рівні 0,1. Після обчислення значення r_0 , α коригується, і знову проводиться перехід до формули для обчислення r_0 . Зазвичай виконується 2-3 ітерації (цього зазвичай достатньо для забезпечення інженерної точності розрахунків)[13].

На другому етапі обчислень, враховуючи можливість витoku виробки, значення r_{cm} визначається на основі фактичних даних, застосовуючи відповідну формулу:

$$r_{cm} = \frac{37r_0 L^3}{(\sqrt[3]{K_{ym}} - 1)^3 \pi d_0^3 l}$$

Давайте повернемося до першої формули і представимо її в розгорнутому вигляді:

$$p(L) = r_0 Q_3^2 L e^{\alpha} K_{ym} = h_B$$

Застосування цієї формули дозволяє визначити максимальну довжину виробки L_{max} , для якої вистачає використаного вентилятора або вибору системи місцевого провітрювання (ВМП) та відповідної конфігурації для забезпечення належного провітрювання виробки заданої довжини L_{max} .

Подано узагальнений алгоритм вирішення задачі:

1. Визначення параметра r_0 за допомогою міжнародного методу.
2. Визначення параметра K_{cm} та формул для обчислення $K_{ym}(L)$.
3. Встановлення залежності $p_{TP}(L, Q_3)$.
4. Наближення характеристик вентилятора.
5. Визначення останнього рівняння при $p_{TP} = h_B$ відносно $L = L_{max}$.

Застосування частотного управління може призвести до значного підвищення ККД вентилятора та мінімізації втрат в приводі завдяки використанню енергозберігаючих алгоритмів управління.

Встановлено, що вплив режиму роботи вентилятора на енергетичні втрати в приводі досягається завдяки закону управління, який визначається шляхом безпосереднього розрахунку оптимального значення потужності. Це оптимальне значення визначається за допомогою математичної моделі двигуна.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВЕНТИЛЯТОРА МІСЦЕВОГО ПРОВІТРЮВАННЯ ТА ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Від правильного вибору електроприводу залежать різні аспекти роботи машин, такі як продуктивність, точність, надійність та швидкість, особливо під час запуску та зупинки. Коректне співставлення механічних характеристик виконавчих механізмів робочих машин з електроприводом є ключовою умовою для досягнення оптимальних конструктивних та технологічних рішень. Важливим аспектом є також ефективне використання електроенергії та застосування засобів для зменшення споживання енергії за допомогою електроприводу [14].

Оцінку енергоефективності електроприводу проводять на основі двох головних компонентів: споживаної енергії (критерій енергоспоживання визначається через коефіцієнт потужності, що позначається як $\cos\varphi$) та ефективністю перетворення спожитої енергії, де критерієм є коефіцієнт корисної дії, що позначається як η .

Підвищення ефективності використання електричної енергії можна досягти шляхом скорочення питомих витрат енергії на виробництво одиниці продукції. Це можна здійснити шляхом оптимізації режиму роботи електроустаткування, впровадження вдосконалених технологій виробництва та зменшення втрат енергії під час її перенесення та конвертації.

3.1 Вибір вентилятора та особливості конструкції

Характеристики конструкції вентиляторів місцевого провітрювання включають наступне.

- використання сучасної аеродинамічної схеми з меридіональним прискоренням потоку, що забезпечує економічну та надійну роботу вентиляторів.

- можливість плавного механічного регулювання обсягу подачі необхідної кількості повітря в тупиковий забій.

- наявність суцільнометалевого зварного робочого колеса, яке відзначається стійкістю до механічних впливів.

- досягнення гранично високих аеродинамічних характеристик щодо обсягу подачі і тиску при мінімальних розмірах та масі вентиляторів.

- забезпечення безпеки роботи, легкості обслуговування та зручного доступу до всіх елементів вентилятора.

Структура вентилятора місцевого провітрювання включає наступні компоненти: кожух, електродвигун з коробкою виводів, робоче колесо,

патрубок, колектор і санчата. Патрубок має обладнання противибуховим пристроєм. Регулювання тиску, який створюється вентилятором в робочій зоні, можливе за допомогою повороту лопаток робочого колеса і зазвичай проводиться при зупинці вентилятора. У випадку довгих гірничих виробок може бути використано послідовне з'єднання двох вентиляторів. Вентилятори мають вбудований тепловий захист, який активується при підвищенні температури, а також вібраційний захист, який спрацьовує при збільшенні вібрації підшипників.

При зміні частоти обертання вентилятора, який працює в мережі з заданими параметрами, режим роботи вентилятора зсувається вздовж характеристики цієї мережі. Відповідно до формул, при зміні частоти обертання

на m разів, продуктивність вентилятора змінюється також на m разів, створюваний ним тиск збільшується в m^2 разів, а споживана потужність також збільшується у m^3 разів. При цьому ККД вентилятора залишається незмінним

(див. рисунок 3.1). Цей метод регулювання вважається найбільш економічно вигідним.

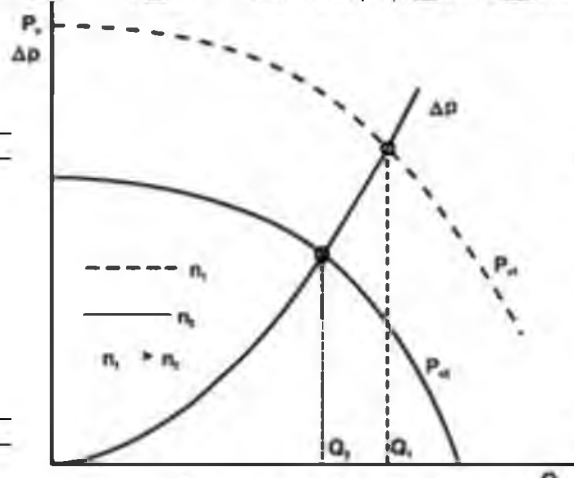


Рис. 3.1 – Робочий режим вентиляторної установки

Вентилятори серії ВМЕ мають бути монтованні горизонтально, і відхилення від горизонтальної площини не повинні перевищувати 30 градусів. Для керування цими вентиляторами передбачено два варіанти автоматичне і ручне керування. Вентилятори місцевого провітрювання ВМЕ можуть працювати в звичайному та реверсивному режимах. Шляхом зміни обертів двигуна або рухомих лопаток можна регулювати подачу повітря вентилятором.

У випадку аварійного відключення основного вентилятора передбачено автоматичне ввімкнення резервного вентилятора. Конструкція вентилятора має резервний ввід низької напруги, який автоматично активується при відсутності основної напруги. У випадку короткочасного відключення живлення приводу вентилятора, він автоматично повторно підключається. Реверс вентилятора може здійснюватися без зупинки його роботи. У випадку аварійних ситуацій вентиляційна система автоматично вимикається, і диспетчер отримує звуковий та світловий сигнали [9].

У даному дослідженні був обраний осьовий одноступінчатий вентилятор місцевого провітрювання з електричним приводом ВМЕ-8. Цей вентилятор є вибухобезпечним і призначений для провітрювання тушкових гірничих виробок в шахтах. Він придатний для використання в небезпечних середовищах, які

можуть бути нафтогазо-нілепродуктами насиченими, за умови, що щільність повітря не перевищує $1,3 \text{ кг/м}^3$, температура знаходиться в діапазоні від -20°C до $+35^\circ\text{C}$, рівень запиленості не перевищує 50 часток на мільйон, і відносна вологість не перевищує 95% (при температурі $+25^\circ\text{C}$).

Таблиця 3.1 Технічні характеристики вентилятора місцевого провітрювання ВМЕ-8

Номінальний діаметр, мм	Номінальна подача, м ³ /с	Номинальний повний тиск, Па	Максимальний ККД, %	Потужність, кВт	Час роботи, год	Маса, кг
800	10	3200	0,63	50	3000	600

3.2 Обґрунтування вибору регульованого електроприводу

вентиляційних установок

Під час розробки енергозберігаючих систем для регульованих електроприводів вентиляційних установок, важливо враховувати, що процес подачі повітря має більшу різноманітність у порівнянні з процесом подачі рідини, який зазвичай здійснюється за допомогою насосів. Регулювання робочого режиму вентиляційних систем головним чином обумовлено сезонними та добовими змінами параметрів повітря, такими як температура, вологість, щільність, а також ступінь його забрудненості пилом і наявність газів. Ці фактори, у свою чергу, залежать від характеру виробництва, яке відбувається у приміщеннях з вентиляцією. Для гірського видобутку, наприклад, характерні великі кількості пилу та наявність газів у робочому середовищі. У виробництвах, де проводиться обробка корисних копалин, також запиленість цехів та приміщень є одними з важливих аспектів.

Регулювання кутової швидкості вентиляторів головного провітрювання у шахтах та рудниках є рідкісним явищем, оскільки переважно використовуються осьові вентилятори, які регулюють подачу повітря зміною положення лопаток. Однак у випадку використання відцентрових вентиляторів головного

провітрювання, необхідність регулювання подачі повітря виникає переважно у зв'язку зі змінами геометрії виробок у процесі розвітку шахти або рудника.

Рекомендується змінювати подачу повітря для вентиляторів місцевого провітрювання з таких причин:

- початок розробки туникових виробок характеризується низьким аеродинамічним опором, і на цей період потрібно невелику кількість повітря для провітрювання.

- зі збільшенням довжини розробки аеродинамічний опір зростає, і, відповідно, потреба в подачі повітря теж збільшується.

- збільшення аеродинамічного опору також впливає на потребу в повітрі.
- важливим фактором є виділення газів з навколишніх порід. Іноді, для видалення цих газів, може знадобитися більше повітря, ніж те, яке потрібно для подолання аеродинамічного опору.

- запровадження робіт з вибуховими речовинами в гірництві супроводжується виділенням значної кількості продуктів вибуху та пилу. Для швидкого видалення цих продуктів з робочих виробок необхідно короткочасно збільшувати подачу повітря.

У зв'язку з різноманітністю ситуацій та факторів, автоматичне управління регульованим електроприводом вентиляційних установок стає неефективним. Тому рекомендується використовувати ручний режим управління.

Малими вентиляторами головного провітрювання з електродвигунами до 160 кВт зазвичай оснащуються низьковольтними асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором. У випадку потужності від 160 до 400 кВт, використовуються як низьковольтні, так і високовольтні асинхронні двигуни з фазним ротором. А при великих потужностях застосовуються високовольтні синхронні двигуни. Вентилятори місцевого провітрювання також зазвичай обладнані низьковольтними асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором [11].

Вибір регульованого електроприводу для вентиляційних установок аналогічний вибору приводу для насосів. Для вентиляторів, які мають

асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором потужністю до 160 кВт, часто використовують низьковольтний частотно-регульований електропривід. У випадку потужних вентиляторів з високовольтними

синхронними електродвигунами потужністю до 4000 кВт, застосовуються

безтрансформаторні високовольтні частотно-регульовані електроприводи з автономним інвертором струму. Важливо зазначити, що можлива також

застосування асинхронно-вентильного каскаду, як низьковольтного, так і

високовольтного, для регулювання кутової швидкості вентиляторів, особливо,

якщо вентиляторний агрегат включає асинхронний електродвигун з фазним

ротором. Проте слід відзначити, що такий метод є менш витратним, ніж

використання частотно-регульованого приводу. Найкращим прикладом є

використання електроприводу потужністю 6000 кВт з асинхронно-вентильним

каскадом в гірській промисловості. Проте слід відзначити, що цей метод має

недоліки, такі як неповна комплектність поставки обладнання та необхідність

застосування спеціальних заходів для фільтрації вищих гармонік, що виникають

через комутацію вентилів інвертора в мережі [11].

Отримання енергетичного ефекту в системах вентиляції можливе, коли

необхідно змінювати подачу повітря для оптимізації технологічного процесу. У

такому випадку виправданим є використання регульованого електроприводу,

хоча цей підхід часто є витратним і вимагає наявності кваліфікованого

персоналу. Аналіз режимів роботи вентиляційних систем проводиться для

визначення основних технологічних параметрів, необхідних для розробки

систем автоматичного управління цими системами. До цих параметрів

включаються такі [13]:

- максимальний обсяг повітря, що вентилятор повинен постачати протягом

розрахункового періоду (добу, місяця або року).

- мінімальний обсяг повітря, необхідний протягом розрахункового періоду.

- необхідний тиск, відповідний максимальному обсягу подачі.

- необхідний тиск, відповідний мініимальному обсягу подачі.

- середні коливання в обсязі подачі або тиску повітря.

Параметри технологічного процесу та інші вихідні дані, які використовуються для створення системи автоматичного управління вентиляторним агрегатом, повинні якомога точніше відповідати їх реальним значенням. Багато з цих вихідних даних визначаються шляхом побудови графіків, що відображають взаємодію між вентиляторами і системою подачі. У цьому процесі використовуються характеристики тиску для вентиляторів і параметри повітропроводів або мережі. При аналізі роботи вентиляторів у системі повітряних шляхів або мережі дуже важливим є поняття еквівалентного отвору [13].

Під час аналізу робочих режимів вентиляційних установок важливо систематизувати інформацію щодо річного обсягу спожитої електроенергії та річної продуктивності, а також щодо питомих витрат електроенергії, споживаних для подачі повітря. Ці дані становлять основу для підготовки техніко-економічного обґрунтування для реалізації проектів з енергозбереження.

3.2.1 Вибір і визначення параметрів електродвигуна

Ці двигуни призначені для використання як привід для вентиляторів локальної вентиляції в вугільних і сланцевих шахтах, де існує небезпека викидів газу або вугільного пилу, а також у всіх галузях гірничорудної промисловості. Літера "М" в позначенні типу двигуна вказує на його спеціальне призначення для вентиляторів локальної вентиляції.

Ці двигуни розроблені для безперервної роботи в режимі S1 від мережі змінного струму з частотою 50 Гц при напрузі, що не перевищує 660 В. Крім того, вони мають вибухозахисне виконання РВЗВМ і призначені для використання з 2BPM200LA2.

3.2.2 Розрахунок робочих параметрів вентилятора при змінній кутовій швидкості робочого колеса

Зміна швидкості обертання робочого колеса вентилятора призводить до зміни всіх його параметрів роботи, включаючи робочу характеристику. Для перерахунку цих характеристик при іншій швидкості використовуються спеціальні формули приведення [7]:

— для подачі

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2};$$

— для статичного тиску

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2;$$

— для потужності

$$\frac{N_1}{N_2} \approx \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^3;$$

— для моменту статичного опору

$$\frac{M_1}{M_2} \approx \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2.$$

Рівність у цих формулах є приблизною, оскільки зміна подачі Q і статичного тиску P одночасно призводить до зміни коефіцієнта корисної дії (ККД). Напірна характеристика вентилятора, що працює зі змінною кутовою швидкістю робочого колеса, може бути описана рівнянням квадратичної параболи:

$$p = p_{\phi} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 \cdot S \cdot Q^2$$

де p_{ϕ} – фіктивний статичний тиск, відповідний нульовій подачі

вентилятора, в розрахунках слід приймати для вентиляторів $p_{\phi} = 2 \cdot p_{ном}$; $p_{ном}$

– номінальний статичний тиск вентилятора; $\omega, \omega_{ном}$ – змінна і номінальна кутові швидкості вентилятора; S – аеродинамічний опір вентилятора.

З цього виразу видно, що аеродинамічний опір вентилятора за однакових

параметрів подачі не залежить від кутової швидкості. Це означає, що при зміні кутової швидкості напірні характеристики вентилятора залишаються схожими і лише змінюють своє положення по вертикалі на графіку спільної роботи

вентилятора (рисунок 3.2)[8].

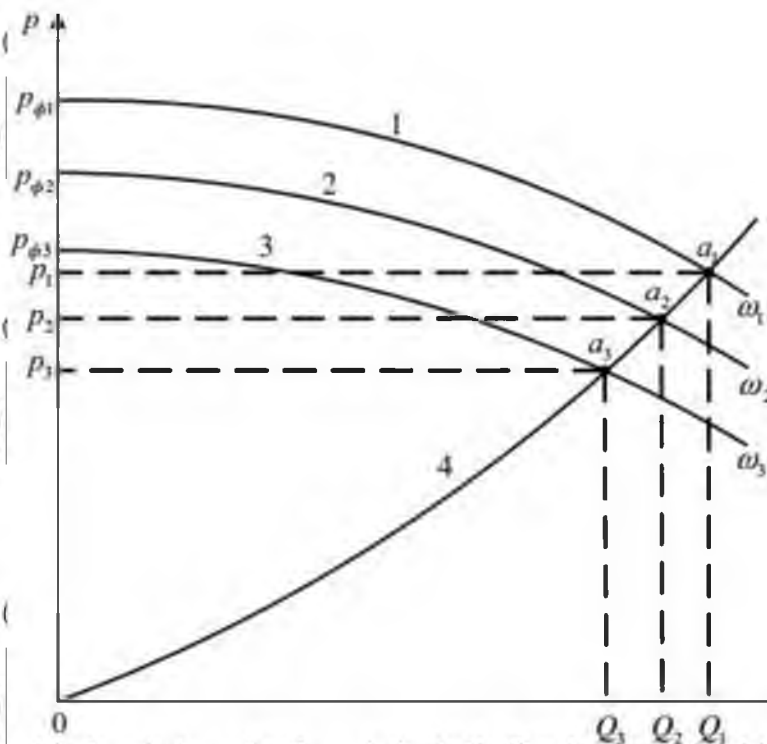


Рис. 3.2 – Напірні характеристики вентилятора зі змінною кутовою швидкістю робочого колеса

Перетин напірних характеристик вентилятора 1, 2, та 3, який послідовно змінює свою кутову швидкість, визначає положення робочих точок. Цим точкам відповідають значення робочих параметрів вентилятора, таких як тиск і подача

повітря. Отже, робочі точки характеристики вентилятора при зміні кутової швидкості робочого колеса розташовуються на характеристиці повітродувки. На відміну від насосних установок, вентиляційні установки не відчувають тиску,

обумовленого статичним напором, за умови, що вентилятор працює самостійно

і не у спільному режимі з іншими вентиляторами або на реверсному режимі.

Тому для окремого вентилятора згідно з формулами приведення ми отримуємо наступні залежності подачі і статичного тиску від його кутової швидкості [7]:

– для подачі

$$Q = Q_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^3; \quad (3.7)$$

– для статичного тиску

$$p = p_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2; \quad (3.8)$$

$Q_{\text{ном}}$ – номінальна подача вентилятора. Найважливішим параметром вентилятора є його ККД. Зміна ККД в залежить від кутової швидкості

вентилятора та визначається за допомогою формули Муді:

$$\eta = 1 - \frac{1 - \eta_{\text{е.ном}}}{0,36} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2$$

$\eta_{\text{е.ном}}$ – номінальне ККД вентилятора. Потужність, споживана вентилятором, визначається виразом:

$$N = \frac{Q \cdot p}{1000 \cdot \eta_{\text{е}}}$$

Q – секундна подача вентилятора, $\text{м}^3/\text{с}$; p – повне статичний тиск, що створюється вентилятором, Па. Надзвичайно важливим параметром вентилятора є його механічна характеристика, яка представляє собою залежність моменту

статичного опору від кутової швидкості робочого колеса. Тип механічної характеристики визначає енергетичні показники вентилятора, такі як втрати та коефіцієнт корисної дії (ККД). Момент статичного опору для будь-якого

механізму, включаючи вентилятор, обчислюється за виразом $M_c = N / \omega$, або

$$M_c = \frac{Q \cdot p}{\omega \cdot \eta_e}$$

Момент статичного опору вентилятора можна обчислити відповідно до наступного рівняння, використовуючи попередні вирази:

$$M_c = (M_{в.ном} + M_t) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 + M_{т'}$$

$M_{в.ном}$ – номінальний момент статичного опору вентилятора; M_t – момент опору вентилятора, обумовлений тертям в його підшипниках і кінематичних ланцюгах[7].

Значення номінального моменту статичного опору вентилятора обчислюється при номінальних параметрах подачі, тиску і ККД.

Згідно з дослідними даними, момент тертя складає приблизно 5% від номінального моменту статичного опору вентилятора, іншими словами, це становить приблизно 5% від номінального моменту статичного опору вентилятора.

$$M_t = 0,05 \cdot M_{в.ном}$$

Отже, механічна характеристика вентилятора може бути представлена у вигляді рівняння, що описує ділянку квадратичної параболи.

Потужність вентилятора, що входить до складу регульованого електроприводу, розраховується за допомогою наступного виразу[7]:

$$P_6 = \frac{N_6}{\eta_{об} \cdot \eta_{пр}}$$

$\eta_{дв}$ – ККД приводного електродвигуна,
 $\eta_{пр}$ – ККД перетворюючого пристрою.

ККД приводного електродвигуна практично не змінюється зі зміною кутової швидкості двигуна, тому можна використовувати номінальний ККД, який вказаний у довідковій літературі. Щодо перетворювачів частоти або інверторів, які використовуються як перетворювальні пристрої для вентиляційних агрегатів і мають некеровані випрямлячі в системі АВК, то в розрахунках можна використовувати значення $\eta_{пр} = 0,96$ [7].

3.2.3 Структурна схема вентиляторного агрегату з частотно-регульованим електроприводом

Можна узагальнити структурну схему вентиляторного агрегату як складну систему, що складається з електромеханічної та механічної складових. Електромеханічна складова включає в себе приводний електродвигун, в той час як механічна складова – це вентилятор.

Частотно-регульований асинхронний електропривод має механічні характеристики в області, де розташовані робочі точки (де механічні характеристики електроприводу перетинаються з характеристиками вентилятора), і ця область відзначається практично лінійним характером. Жорсткість механічних характеристик електроприводу практично не змінюється при зміні кутової швидкості. Тому для вивчення енергетичних властивостей вентиляторного агрегату в статичному режимі можна спростити математичний опис частотно-регульованого електроприводу, лінеаризуючи його. Таким чином, асинхронний електродвигун у системі частотного управління може бути представлений у спрощеному вигляді як аперіодична ланка другого порядку.

Перетворювач частоти, будь то з інвертором напруги або з інвертором струму, має лінійну зовнішню характеристику, і тому його також можна представити у вигляді аперіодичної ланки першого порядку [11].

Ми можемо спростити структурну схему вентилятора, поділяючи її на функціональні блоки, які реалізують різноманітні зв'язки щодо подачі, тиску, потужності і моменту статичного опору.

На рисунку 3.3 наведено структурну схему частотно-регульованого вентиляторного агрегату.

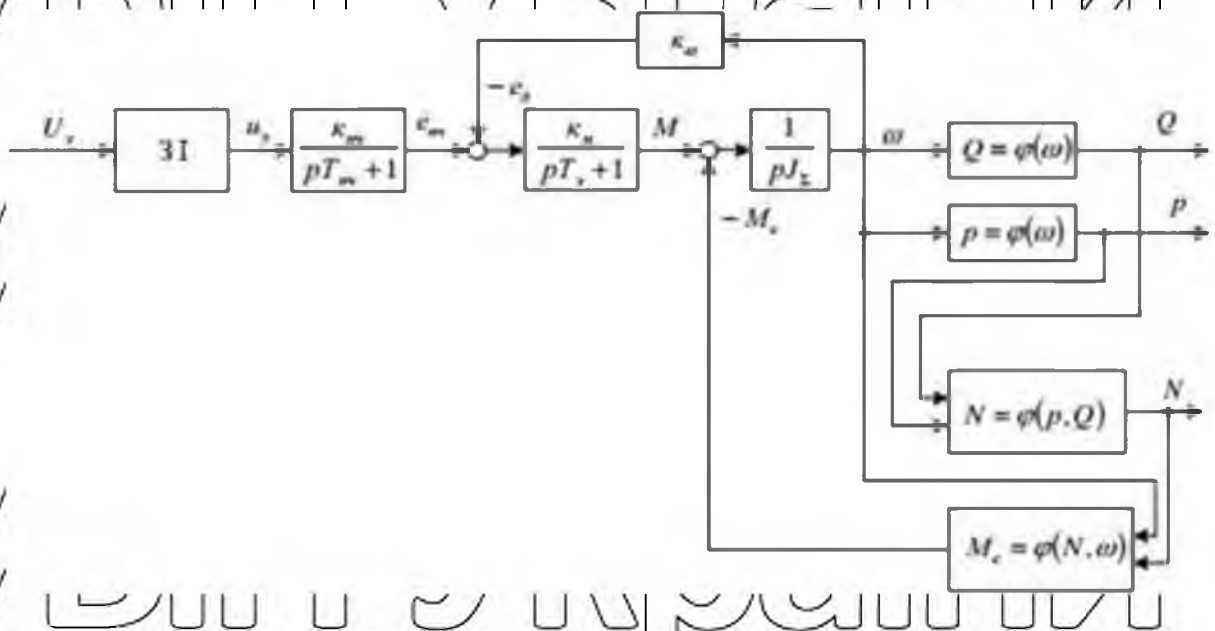


Рис. 3.3 – Структурна схема частотно-регульованого

вентиляторного агрегату

Передавальні коефіцієнти і часові константи в структурній схемі електропривода обчислюються за допомогою наведених нижче формул. Задатчик інтенсивності, що включений до системи керування, дозволяє налаштувати параметри прискорення при запуску вентиляторного агрегату[7].

На рисунку 3.3 блоки структурної схеми вентилятора представлені у вигляді функціональних залежностей від кутової швидкості вентилятора, які включають подачу повітря $Q = \varphi(\omega)$, тиск $p = \varphi(\omega)$, потужність $N = \varphi(Q, p)$ і момент статичного опору $M_s = \varphi(N, \omega)$. Важливо відзначити, що ці залежності є

нелінійними, і їх аналіз та моделювання можливі лише за допомогою імітаційного моделювання. Ускладнення завдання вирішується тим, що дослідження енергетичних процесів у вентиляторному агрегаті проводиться в стаціонарних режимах, які є окремими випадками динамічних процесів. Під час

розв'язання завдань енергетики в стаціонарних умовах, блоки структурної схеми виконують роль алгебраїчних обчислювачів, і їх результати використовуються для аналізу електромеханічних і енергетичних процесів у вентиляторному обладнанні [6].

3.3 Розрахунок частотно-регульованого електропривода вентилятора місцевого провітрювання

Вентилятор шахтний місцевого провітрювання ВМЕ-8 є осьовим одноступінчатим агрегатом, який має електричний привід та призначений для провітрювання тунілових гірничих виробок у шахтах. Він також придатний для використання в небезпечних умовах, де можлива наявність газу та пилу.

Особливості гірничих та шахтних робіт вимагають, щоб вентиляторна установка працювала в циклічному режимі, протягом чотирьох годин кожного дня. Для визначення необхідного тиску, використовують хронометражні дані, зібрані протягом місяця, та середні значення обчислюють для одного добового циклу.

Деталі хронометражних даних подані в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Необхідний тиск вентиляційної установки місцевого провітрювання протягом доби

Час доби, година	0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
Повний тиск, Па	1800	1100	2600	2700	2200	1900

Час роботи вентилятора в рік складає 7500 год / рік

Вентиляторний агрегат використовує асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, який має типову модель 2BPM200LA і є вибухозахищеним.

Паспортні дані вентилятора місцевого провітрювання типу ВМЕ-8:

Номінальна подача $Q_{ном} = 10 \text{ м}^3/\text{с}$

Номінальний повний тиск $p_{ном} = 3200 \text{ Па}$

Номинальний ККД $\eta_{в.ном} = 0,63 \%$

Паспортні дані електродвигуна типу 2BPM200LA:

Номинальна потужність $P_{ном} = 50 \text{ кВт}$;

Номинальна напруга статора $U_{1ном} = 660 \text{ В}$;

Номинальна напруга фази $U_{ном,ф} = 380 \text{ В}$;

Номинальна частота обертання $n_{ном} = 3000 \text{ об/хв}$ ($s_{ном} = 0,017$)

Номинальний ККД $\eta_{дв.ном} = 91 \%$;

Число пар полюсів $p_n = 1$;

Номинальний коефіцієнт потужності $\cos\phi = 0,89$;

Перевантажувальна здатність двигуна $\lambda = M_{max} / M_{ном} = 2,8$;

Момент інерції ротора $J_{oe} = 0,29 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Для забезпечення роботи вентиляторного агрегату в умовах змінного тиску було вирішено використовувати частотно-регульований електропривід. Для

живлення привідного електродвигуна вентилятора місцевого провітрювання

використовується перетворювач частоти FR-F820-01540-LD від компанії

"Mitsubishi Electric" з потужністю 50 кВт.

3.3.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

При проведенні розрахунків необхідно враховувати, що схема заміщення подана для фази асинхронного двигуна, тому усі розрахункові значення струмів і напруг є фазними.

Розрахунок

Номинальний струм фази статора

$$I_{ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{ном,ф} \cdot \cos\phi_{ном} \cdot \eta_{ном}} = \frac{50 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,91} = 54,6 \text{ А}$$

Активний опір фази статора

$$r_1 = \frac{U_{\text{ном.ф}} \cdot S_{\text{ном}}}{I_{1\text{ном}}} = \frac{380 \cdot 0,017}{54,6} = 0,119 \text{ Ом}$$

Номинальна кутова швидкість магнітного поля статора двигуна

$$\omega_{1\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ с}^{-1}$$

Номинальна кутова швидкість вала двигуна

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 2949}{30} = 308,6 \text{ с}^{-1}$$

Номинальний момент двигуна

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{50 \cdot 10^3}{308,6} = 161,9 \text{ Нм}$$

Максимальний момент двигуна

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{ном}} = 2,8 \cdot 161,9 = 453,57 \text{ Нм}$$

Індуктивний опір короткого замикання

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{\text{ном}}^2}{2 \cdot \omega_{1\text{ном}} \cdot M_{\text{max}}} - r_1 \right)^2 - r_1^2} = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 314 \cdot 453,57} - 0,119 \right)^2 - 0,119^2} = 1,358 \text{ Ом}$$

Індуктивні опору статора і наведене ротора

$$x_1 = x_2 = \frac{x_k}{2} = \frac{1,358}{2} = 0,679 \text{ Ом}$$

Наведене до обмотці статора активний опір фази ротора

$$r'_2 = S_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{3 \cdot U_{\text{ном}}^2}{2 \cdot \omega_{\text{ном}} \cdot M_{\text{max}}} - r_1 \right) + S_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{\text{ном}}^2}{2 \cdot \omega_{\text{ном}} \cdot M_{\text{max}}} - r_1 \right)^2 - (r_1^2 + x_{\text{сума}}^2)}$$

$$= 0,017 \cdot \left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 314 \cdot 453,57} - 0,119 \right) + 0,017 \cdot \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 314 \cdot 453,57} - 0,119 \right)^2 - (0,119^2 + 1,358^2)} = 0,1337 \text{ Ом}$$

Номинальний наведений струм ротора

$$I_{2\text{ном}} = \sqrt{\frac{M_{\text{ном}} \cdot \omega_{1\text{ном}} \cdot S_{\text{ном}}}{3 \cdot r'_2}} = \sqrt{\frac{159,2 \cdot 314 \cdot 0,017}{3 \cdot 0,1337}} = 46,43 \text{ А}$$

Номинальний коефіцієнт потужності роторному ланцюзі

$$\cos \varphi_{2ном} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_2'^2 + (x_2' \cdot I_{2ном}')^2}} = \frac{0,709}{\sqrt{0,1337^2 + (0,679 \cdot 0,017)^2}} = 0,996$$

$$\text{тоді } \sin \varphi_{2ном} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{2ном}} = \sqrt{1 - 0,9962} = 0,086$$

Номинальний струм, що намагнічує ланцюга

$$I_{цном} = \sqrt{(I_{2ном}' \cdot \sin \varphi_{2ном})^2 + I_{1ном}'^2 - I_{2ном}'^2 \cdot \sin^2 \varphi_{2ном}} = \sqrt{(46,43 \cdot 0,086)^2 + 54,15^2 - 46,43^2 \cdot 0,086^2} = 24,16 A$$

Номинальна ЕРС фази статора відповідно

$$E_{1ном} = U_{номф} \cdot (0,985 - 0,00375 \cdot p_n) = 380 \cdot (0,985 - 0,00375 \cdot 1) = 372,875 B$$

Індуктивний опір намагнічуючої ланцюга

$$x_0 = \frac{E_{1ном}}{I_{цном}} = \frac{372,875}{24,16} = 15,4 \text{ Ом}$$

Коефіцієнти розсіювання обмоток статора і ротора

$$\tau_1 = \tau_2 = \frac{x_1}{x_0} = \frac{0,679}{15,4} = 0,044$$

Загальний коефіцієнт розсіювання

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2 = 0,044 + 0,044 + 0,044 \cdot 0,044 = 0,09$$

Визначаються потрібні коефіцієнти

$$b = \tau \cdot (1 + \tau_2) = 0,044 \cdot (1 + 0,044) = 0,046$$

$$c = x_0 \cdot \tau = 15,4 \cdot 0,09 = 1,388$$

$$d = \frac{r_1}{x_0} = \frac{0,119}{15,4} = 0,0077$$

$$e = 1 + \tau_1 = 1 + 0,044 = 1,044$$

На рисунку 3.4 представлений графік електромеханічної характеристики, який був розрахований за допомогою вищезазначеної формули в математичній системі MathCAD. Важливо враховувати, що оскільки механічні характеристики двигуна розраховані для електромагнітного моменту, то загальне навантаження на валу електродвигуна повинно включати в себе власний момент тертя двигуна.

Момент, який виникає від сил тертя на валу електродвигуна, можна розглядати як сталий і постійний.

НУБІП України

НУ

НУ

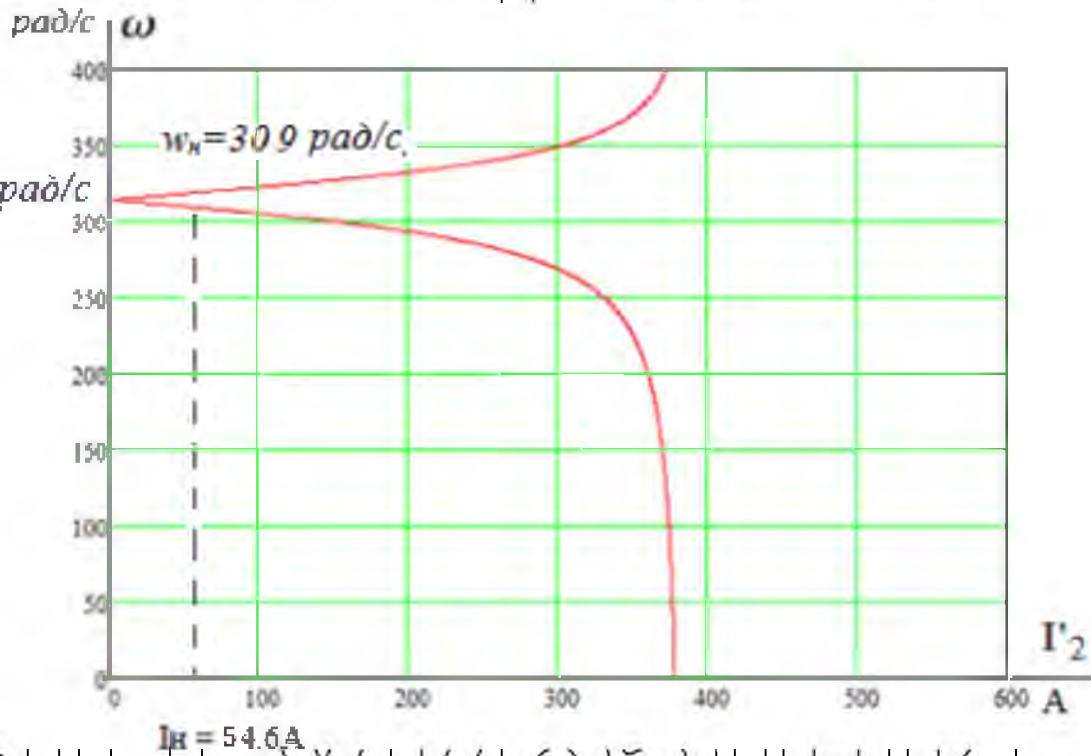


Рис. 3.4 – Графік електромеханічної характеристики

3.3.2 Розрахунок параметрів структурної схеми частотно-регульованого електроприводу

Параметри структурної схеми, яка подана на рисунку 3.5, піддаються розрахунку.

НУБІП України

НУ

НУ

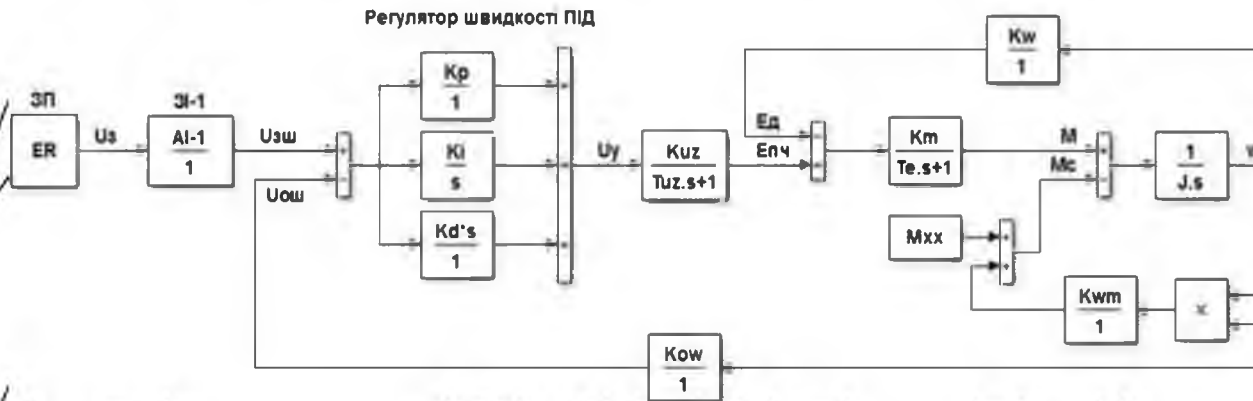


Рис. 3.5 – Структурна схема вентилятора з ЧРП

НУБІП України

Розрахунок

Статичний коефіцієнт передачі перетворювача частоти

$$K_{пч} = \frac{E_{пч}}{U_{у.ном}} = \frac{387,26}{10} = 38,73$$

$$E_{пч} = 0,985 \cdot \frac{U_{ном}}{U_{у.ном}} = 0,985 \cdot \frac{380}{10} = 37,63 \text{ В}$$

$U_{у.ном} = 10 \text{ В}$ — номінальну напругу управління.

Електромагнітна постійна часу перетворювача може бути прийнята в

межах

$$T_{пч} = (0,003 \div 0,005) \text{ с. Приймається } T_{пч} = 0,005 \text{ с.}$$

Коефіцієнт внутрішнього зворотного зв'язку за швидкістю

$$K_{\omega} = \frac{I_{\mu.ном} \cdot (x_0 + x_1)}{\omega_{1ном}} = \frac{24,16 \cdot (15,4 + 0,679)}{314} = 1,24$$

Коефіцієнт передачі ланки моменту

$$K_M = \frac{M_{ном}}{K \cdot (\omega - \omega_{ном})} = \frac{161,98}{1,24 \cdot (314 - 308,6)} = 24,478$$

Момент холостого ходу

$$M_{хх} = M_{ном} \cdot 0,05 = 161,98 \cdot 0,05 = 8,099 \text{ Нм.}$$

Визначити необхідні параметри

$$K_{\phi m} = \frac{(M_{ном} - M_{хх})}{\omega_{ном}^2} = \frac{(161,98 - 8,09)}{308,6^2} = 0,0016$$

$$K_{\phi \omega} = \frac{10}{\omega_{ном}} = \frac{10}{308,6} = 0,032$$

Індуктивність розсіювання обмоток статора і ротора

$$L = L' = \frac{x_1}{314} = \frac{x_2'}{314} = \frac{0,679}{314} = 0,0026 \text{ Гн.}$$

Індуктивність намагнічування

$$L_{\mu} = \frac{x_0}{314} = \frac{15,4}{314} = 0,049 \text{ Гн}$$
 Повна індуктивність обмоток статора і ротора

$$L_s = L_r = L_{\mu} + L_1 = L_{\mu} + L_2' = 0,002 + 0,049 = 0,051 \text{ Гн.}$$

Модуль комутаційної функції

$$k_i = \frac{1}{\omega \cdot T_{nc} \cdot k_{nc}} = \frac{1}{2 \cdot 0,005 \cdot 38,73 \cdot 1,24} = 2,083.$$

Еквівалентна індуктивність частотно-регульованого електроприводу

$$L_e = L_{op} + \frac{3}{2} \cdot k_i^2 \cdot \left(\frac{L_s - L_{\mu}^2}{L_r} \right) = 0,032 + 1,5 \cdot 2,08^2 \cdot \left(0,05 - \frac{0,049^2}{0,05} \right) = 0,031 \text{ Гн.}$$
 де $L_{op} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ — індуктивність дроселя в ланцюзі постійного струму

перетворювача частоти типу FR-F820-01540-LD.

Еквівалентно активний опір частотно-регульованого електроприводу

$$R_e = r_{op} + \frac{3}{2} \cdot k_i^2 \cdot \left(r + r' \cdot \frac{L_s - L_{\mu}^2}{L_r} \right) = 0,0072 + 1,5 \cdot 2,08^2 \cdot \left(0,119 + 0,1337 \cdot \frac{0,049^2}{0,05} \right) = 0,824 \text{ Ом.}$$

де $r_{op} = 0,0072 \text{ Ом}$ — активний опір дроселя в ланцюзі постійного струму

перетворювача частоти типу FR-F820-01540-LD.

Електромагнітна постійна часу частотно-регульованого електроприводу

$$T_e = \frac{L_e}{R_e} = \frac{0,031}{0,824} = 0,037 \text{ с.}$$

Момент інерції вентиляторного агрегату

$$J_{\Sigma} = 1,5 \cdot J_{об} = 1,5 \cdot 0,29 = 0,435 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Визначити коефіцієнти

$$K_p = \frac{J_{об}}{\omega \cdot k_{nc} \cdot T_{nc} \cdot k_{nc}} = \frac{0,435}{2 \cdot 38,73 \cdot 0,005 \cdot 24,47 \cdot 1,24} = 0,037 ;$$

$$K_d = \frac{J_{об} \cdot T_e}{\omega \cdot k_{nc} \cdot T_{nc} \cdot k_{nc}} = \frac{0,435 \cdot 0,037}{2 \cdot 38,73 \cdot 0,005 \cdot 24,47 \cdot 1,24} = 0,0014.$$

3.3.3 Розрахунок статичних характеристик асинхронного частотно-регульованого електроприводу вентилятора агрегату

У розгляді використовується електродвигун типу 2BPM200LA потужністю 50 кВт для вентилятора місцевого провітрювання ВМЕ-8. Вентиляторний апарат має в своєму складі перетворювач частоти з автономним інвертором напруги. При розрахунках стосовно вентиляторного характеру статичного навантаження використовується закон частотного регулювання $E / f^2 = const$.

Електромеханічні і механічні характеристики частотно-регульованого електроприводу залежать від двох параметрів: відносної частоти струму (v) і параметра абсолютного ковзання (β). Оскільки вентиляційні установки можуть працювати з подачами повітря вищими за номінальне значення і до певної максимальної межі, то при розрахунках ми приймаємо верхню межу регулювання частоти на рівні 75 Гц, що відповідає значенню $v = 1,5$. Таким чином, для розрахунку сімейства статичних характеристик ми враховуємо значення $v = 0,25 \div 1,5$.

Для розрахунку статичних характеристик, необхідно визначитися з параметром абсолютного ковзання. В нашому випадку, ми встановлюємо значення β у діапазоні від 0 до 1, з метою проведення розрахунків для робочої частини механічної характеристики. Важливо встановлювати значення параметрів так, щоб ми могли контролювати номінальні значення струму і напруги на статорі під час обчислень, а також проводити розрахунки для проміжних значень параметра абсолютного ковзання.

Параметр критичного абсолютного ковзання.

$$\beta_{кр} = r_2' \cdot \sqrt{\frac{d^2 + e^2 v^2}{b^2 + c^2 v^2}}$$

Ми задаємося відносною величиною частоти струму v і обчислюємо значення параметра критичного абсолютного ковзання. Ці обчислені значення подаються в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 Залежність параметра критичного абсолютного ковзання від відносної частоти струму

ν	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5
$\beta_{кр}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0101	0,0101

Виконуємо розрахунки коефіцієнтів

$$A(\nu, \beta) = (b^2 + c^2 \cdot \nu^2) \cdot \beta^2 + 2 \cdot r_1 \cdot r_2' \cdot \nu \cdot \beta + (d^2 + e^2 \cdot \nu^2) \cdot (r_2')^2$$

$$C(\beta) = \left(\frac{r_1'}{x_0}\right)^2 + (1 + \tau)^2 \cdot \beta^2$$

Ми визначаємо значення параметра абсолютного ковзання для різних частот струму і обчислюємо коефіцієнти, які зберігаємо в таблиці 3.4. Розрахунок електромеханічних і механічних характеристик для частот 50 Гц і менше ($\nu \leq 1,0$).

$$I_1 = \frac{E_{1ном} \cdot \nu_2 \cdot \sqrt{C(\beta)}}{\sqrt{A(\nu, \beta) + r_1 \cdot \sqrt{C(\beta)}}}, \quad M = \frac{3 \cdot E_{1ном}^2}{\omega_{1ном}} \cdot \frac{r_2' \cdot \nu^4 \cdot \beta}{\left[\sqrt{A(\nu, \beta) + r_1 \cdot \sqrt{C(\beta)}} \right]^2}$$

Розрахунок електромеханічних і механічних характеристик для частот понад 50 Гц ($\nu > 1,0$).

$$I_1 = U_{1ном} \sqrt{\frac{\nu \cdot C(\beta)}{A(\nu, \beta)}}, \quad M = \frac{3 \cdot U_{1ном}^2}{\omega_{1ном}} \cdot \frac{r_2 \cdot \nu \cdot \beta}{A(\nu, \beta)}$$

Для розрахунків ми використовуємо ті ж значення параметра абсолютного ковзання, як і в таблиці 3.2, використовуючи дані цієї таблиці для величин $C(\beta)$

і $A(\nu, \beta)$. Потім ми переходимо від параметра абсолютного ковзання до кутової швидкості $\omega = \omega_{1ном} \cdot (\nu - \beta) = 157 \cdot (\nu - \beta)$ [7]. Дані розрахунків наведено в таблиці 3.4.

Перевірка правильності обчислень проводиться шляхом порівняння з контрольними точками природної характеристики ($\nu = 1,0$):

номінальному параметру абсолютного ковзання $\beta_{ном}$ повинні відповідати номінальні значення струму статора $I_{1ном}$ і моменту $M_{ном}$;

- максимальний момент ковзання повинен відповідати критичному параметру абсолютного ковзання $\beta_{кр}$

Таблиця 3.4 – Розрахункові дані механічних та електромеханічних характеристик

$v = 0,25$							
I_1, A	8,2	11,9	18,8	37,2	51,9	67,4	73,4
$M, Нм$	0	20,9	37,3	79,5	101,8	122,5	125,7
ω, c^{-1}	78,5	74,5	73,2	66,93	62,8	56,0	53,6
$v = 0,5$							
I_1, A	16,5	23,8	37,5	74,1	102,5	131,8	144,9
$M, Нм$	0	82,2	149,8	297,02	396,4	449,2	467,4
ω, c^{-1}	152,3	149,4	147,5	142,4	136,4	132,5	128,3
$v = 0,75$							
I_1, A	24,7	35,6	56,3	110,9	153	196,2	215,8
$M, Нм$	0	178,4	336,2	672,5	874,3	994,4	1063,9
ω, c^{-1}	227,4	225,2	223,3	221,5	216,9	207,5	204,0
$v = 1,0$							
I_1, A	32,9	47,5	74,9	147,7	203,5	260,5	286,5
$M, Нм$	0	323,4	609,3	1231,4	1597,5	1791,8	1871,6
ω, c^{-1}	303,0	300,8	298,9	293,9	289,3	283,3	279,6
$v = 1,25$							
I_1, A	29,9	43,1	67,8	132,3	180,8	229,5	251,5
$M, Нм$	0	269,8	499,2	988,2	1235,0	1375,6	1440,3
ω, c^{-1}	378,8	376,7	374,8	369,6	365,2	358,9	355,3
$v = 1,5$							
I_1, A	27,3	39,4	62	121,1	165,7	210,4	230,6
$M, Нм$	0	222,7	412,8	836,8	1058,7	1193,5	1197,7
ω, c^{-1}	454,5	452,4	450,4	459,3	440,8	434,8	431,1

Проведений аналіз даних таблиці 3.4 показує, що похибка обчислень становить: для струму статора - 5,0%, для моменту за номінальним значенням -

9,7%, і для моменту за максимальною величиною - 0,9%. За інженерними стандартами, такі показники вважаються задовільними. Похибка обчислень, навіть якщо один з показників перевищує 15%, свідчить про можливі допущені помилки. Зазвичай помилки виникають під час обчислення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна. Типова помилка полягає в використанні лінійних значень напруг і струмів замість їх фазних величин [5].

Для обчислення механічних характеристик вентилятора визначається номінальний момент вентилятора

$$M_{в.ном} = \frac{Q_{ном} \cdot P_{ном}}{\omega_{ном} \cdot \eta_{в.ном}} = \frac{10 \cdot 3200}{308,6 \cdot 0,63} = 164,56 \text{ Нм}$$

Момент тертя приймається на рівні 5% від номінального моменту

вентилятора.

$$M_m = 0,05 \cdot M_{в.ном} = 164,56 \cdot 0,05 = 8,23 \text{ Нм}$$

Обчислення механічної характеристики вентилятора

$$M_c = (M_{в.ном} - M_m) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 + M_m$$

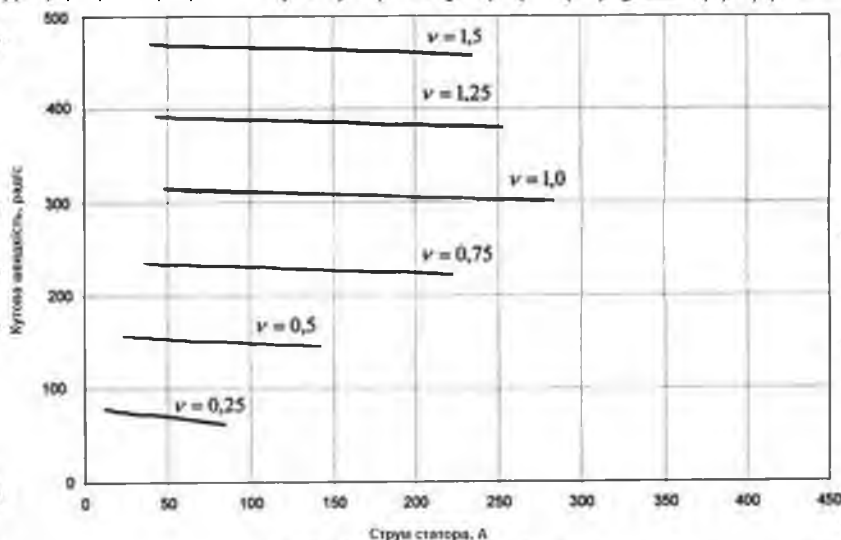


Рис. 3.5 Електромеханічні характеристики частотно-регульованого електроприводу вентилятора місцевого провітрювання ВМЕ-8

Електромеханічні та механічні характеристики частотно-регульованого електроприводу для вентилятора місцевого провітрювання ВМЕ-8 з двигуном 2ВРМ200LА представлені на рисунках 3.5 і 3.6. Для розрахунку статичних характеристик електроприводу був використаний закон частотного регулювання

$$E_1 / f_1^2 = const$$

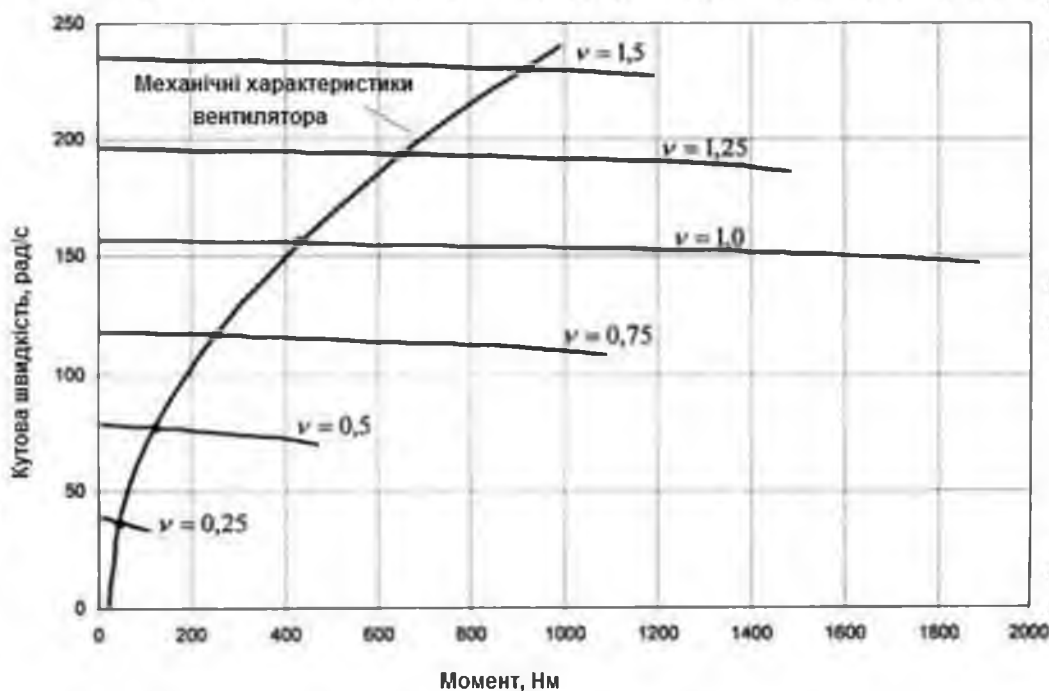


Рис. 3.6 – Механічні характеристики частотно-регульованого електроприводу вентилятора місцевого провітрювання ВМЕ-8

Ми визначаємо кутову швидкість вентилятора і обчислюємо момент статичного опору. Розрахункові результати представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Розрахункові результати механічної характеристики вентилятора

$\omega, \text{с}^{-1}$	0	47,1	125,5	203,95	282,4	360,94	493,4
$M, \text{Нм}$	8,2	11,9	34,07	76,5	139,1	222	325,1

При візуальному поданні механічної характеристики електроприводу також влічується механічна характеристика самого механізму, в цьому конкретному випадку - механічна характеристика вентилятора.

Розрахунок споживання електроенергії вентиляторним обладнанням.

Дані для розрахунку споживання електроенергії визначаються на основі інформації з таблиці 3.2 при річній роботі вентилятора, яка становить 7500 Тр год / рік.

Розрахунок

Кутова швидкість вентилятора агрегату визначається в залежності від необхідного тиску на певному інтервалі доби

$$\omega_i = \omega_{ном} \cdot \sqrt{\frac{P_i}{P_{ном}}} \text{ с.}$$

Для створення необхідного тиску на певному інтервалі доби визначається необхідна подача вентилятора

$$Q_i = Q_{ном} \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_{ном}}\right)^3 \text{ м}^3/\text{с}$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) вентилятора визначається залежно від кутової швидкості на конкретному інтервалі

$$\eta_{в.і} = 1 - \frac{1 - \eta_{в.ном}}{\left(\frac{\omega_i}{\omega_{ном}}\right)^{0.36}}$$

Розраховується електроенергія, яку споживає вентиляторний агрегат під час регулювання різних режимів роботи

$$P_i = \frac{Q_i \cdot P_i}{1000 \cdot \eta_{в.і} \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{пр}}$$

Обчислюється кількість спожитої електроенергії на конкретному інтервалі протягом доби.

$$W_i = P_i \cdot T_i$$

$T_i = 4$ годину – інтервал часу за вихідними даними таблиці 3.2.

Часовий проміжок, протягом якого виконується вимірювання необхідного тиску, може бути нерівномірним, у відмінну від вигляду, який подано

в таблиці 3.2. У цьому випадку потрібно використовувати відповідний час для кожного з інтервалів. Результат розрахунків наводяться в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Розрахунок добового електроспоживання насосним агрегатом

Час доби, годину	0—4	4—8	8—12	12—16	16—20	20—24
Повний тиск, Па	1800	1100	2600	2700	2200	1900
Кутлова швидкість, s^{-1}	231,5	181	278,2	283,3	256	237,8
Подача m^3 / c	7,5	5,8	9	9,2	8,3	7,7
ККД вентилятора	0,59	0,552	0,616	0,619	0,604	0,594
Потужність, кВт	26,5	13,5	44	46,4	34,92	28,53
Споживана електроенергія, кВт·год	105,9	54,1	176,06	185,3	139,7	114,1

Знайшовши суму споживаної електроенергії по кожному інтервалу часу, ми отримуємо добове електроспоживання $W_{сут} = 775,4 \text{ кВт·год} / сут$, тоді річне споживання визначатиметься

$$W_2 = \frac{W_{сут} \cdot T_p}{24} = \frac{775,4 \cdot 7500}{24} = 242326,7 \text{ кВт·год} / \text{год}$$

Розраховуємо потужність вентиляторної установки при нерегульованому варіанті

$$P_{ном} = \frac{Q_{ном} \cdot P_{ном}}{1000 \cdot \eta_{в.ном} \cdot \eta_{дв}} = \frac{10 \cdot 3200}{1000 \cdot 0,63 \cdot 0,91} = 55,82 \text{ кВт}$$

Споживання електроенергії на рік при нерегульованому варіанті.

$$W_1 = P_{ном} \cdot T_p = 50 \cdot 7500 = 375000 \text{ кВт·год} / \text{год}$$

Річна економія електричної енергії.

$$\Delta W_{ел} = W_1 - W_2 = 375000 - 242326 = 132673 \text{ кВт·год} / \text{год} :$$

- при регульованому варіанті

$$Q_2 = Q_{ср} \cdot T_p \cdot 3600 = 7,93 \cdot 7500 \cdot 3600 = 214018 \text{ тис. м}^3 / \text{год}$$

де $Q_{cp} = \frac{\sum Q_i}{i} = \frac{47,56}{6} = 7,93 \text{ м}^3 / \text{с}$; $\sum Q_i = 98,5 \text{ м}^3 / \text{с}$ Сумарна подача за кожен інтервал часу; $i = 6$ - кількість інтервалів часу за добу.

- при нерегульованому варіанті

$Q_1 = Q_{ном} \cdot T_p \cdot 3600 = 10,7500 \cdot 3600 = 270000 \text{ м}^3 / \text{год.}$
 Питоме споживання електроенергії для вироблення повітря вентиляційною установкою:

- при нерегульованому варіанті

$q_1 = \frac{W_1}{Q_1} = \frac{375000}{270000} = 1,389 \text{ кВт час} / 1000 \text{ м}^3$
 - при регульованому варіанті

$$q_2 = \frac{W_2}{Q_2} = \frac{242326}{214018} = 1,13 \text{ кВт час} / 1000 \text{ м}^3$$

Були отримані технічні характеристики вибраного асинхронного двигуна, які були розраховані і порівняні з каталожними значеннями. Для підвищення пускового моменту на низьких швидкостях було передбачено можливість налаштування вольт-частотної характеристики.

Впровадження частотно-регульованого електроприводу має значний вплив не лише на ефективне використання електроенергії, але й на підвищення надійності роботи обладнання та зменшення експлуатаційних витрат. Однак важливо відзначити, що це також дозволяє оптимізувати режими роботи, підвищити рівень автоматизації та спростити впровадження, що робить цей метод ще більш перспективним і зручним для використання.

НУБІП України

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВЕНТИЛЯТОРА МІСЦЕВОГО ПРОВІТРЮВАННЯ Й ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

4.1 Розробка структурної моделі частотно-регульованого електропривода вентиляційної установки місцевого провітрювання

Для вивчення можливостей застосування частотно-регульованого електроприводу в системі вентиляції для місцевого провітрювання, ми плануємо створити імітаційну модель у програмі MATLAB-Simulink.

На рисунку 4.1 показана схема моделювання робочого процесу системи з урахуванням навантаження вентилятора.

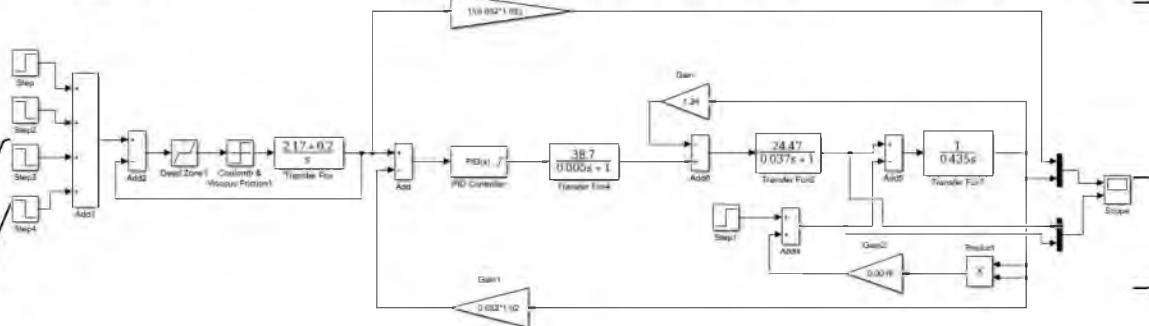


Рис. 4.1 – Модель електроприводу асинхронного двигуна

Результати моделювання процесів запуску, регулювання швидкості та зупинки двигуна подано на рисунку 4.2. На графіку видно, що час розгону становить 2,1 секунди, і двигун досягає швидкості 303 рад/с протягом цього періоду.

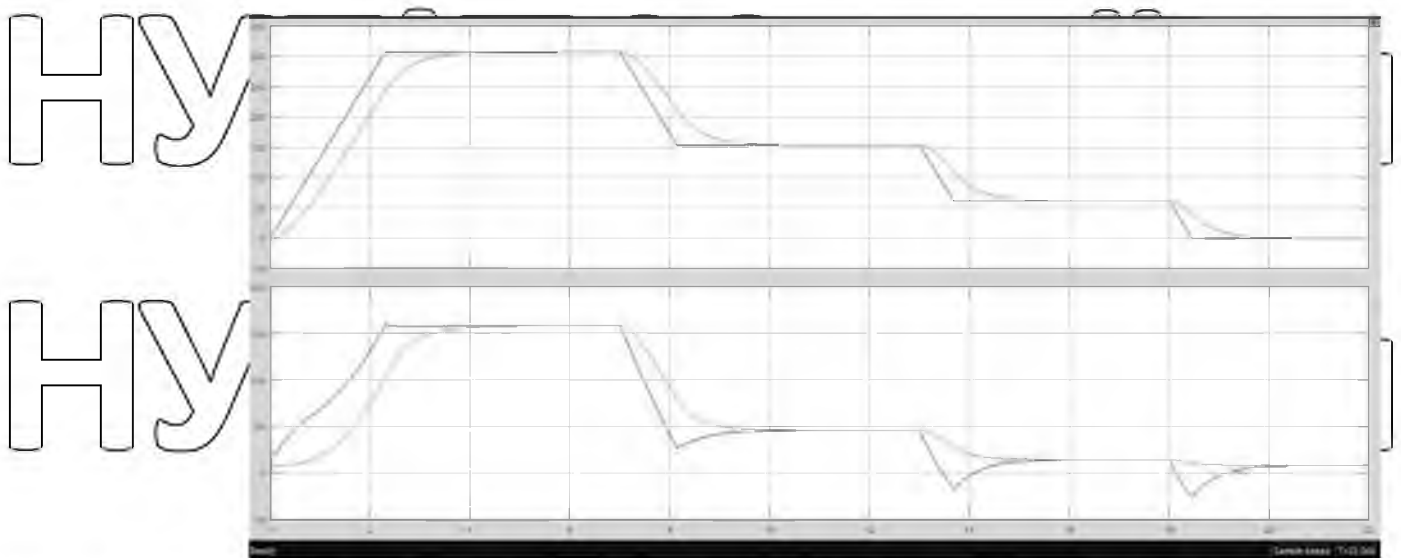


Рис. 4.7 – Діаграма зміни кутової швидкості та моменту вентилятора для системи ПЧ-АД з ПІД-регулятором

4.2 Розробка імітаційної моделі регульованого та нерегульованого

електроприводу вентиляційних установок для визначення споживання електроенергії

Потреба в регулюванні подачі повітря для вентиляторів системи місцевого провітрювання обумовлена особливостями технологічного процесу [7]:

- під час початкової проходки тупикових виробок характеризується низьким аеродинамічним опором, тому в цей період потрібна невелика подача повітря для провітрювання.
- зі збільшенням довжини виробки аеродинамічний опір зростає, і вимагається збільшення обсягу подачі повітря.

- окрім зростання аеродинамічного опору, важливим фактором є видалення газових виділень з навколишніх порід, для чого в окремі періоди може знадобитися значно більше повітря, ніж це визначено лише аеродинамічним опором.

- проведення прохідницьких робіт методом буропідриву часто веде до значного виділення газів і пилу, тому для їх швидкого видалення з виробки потрібна тимчасова збільшена подача повітря.

Для розрахунку електроенергії, споживаної вентиляторним агрегатом, використовуються рекомендації, які наведені в [7]. Реалізація відповідних вимог здійснюється за допомогою створеної імітаційної моделі, яка представлена на рисунку 4.3.

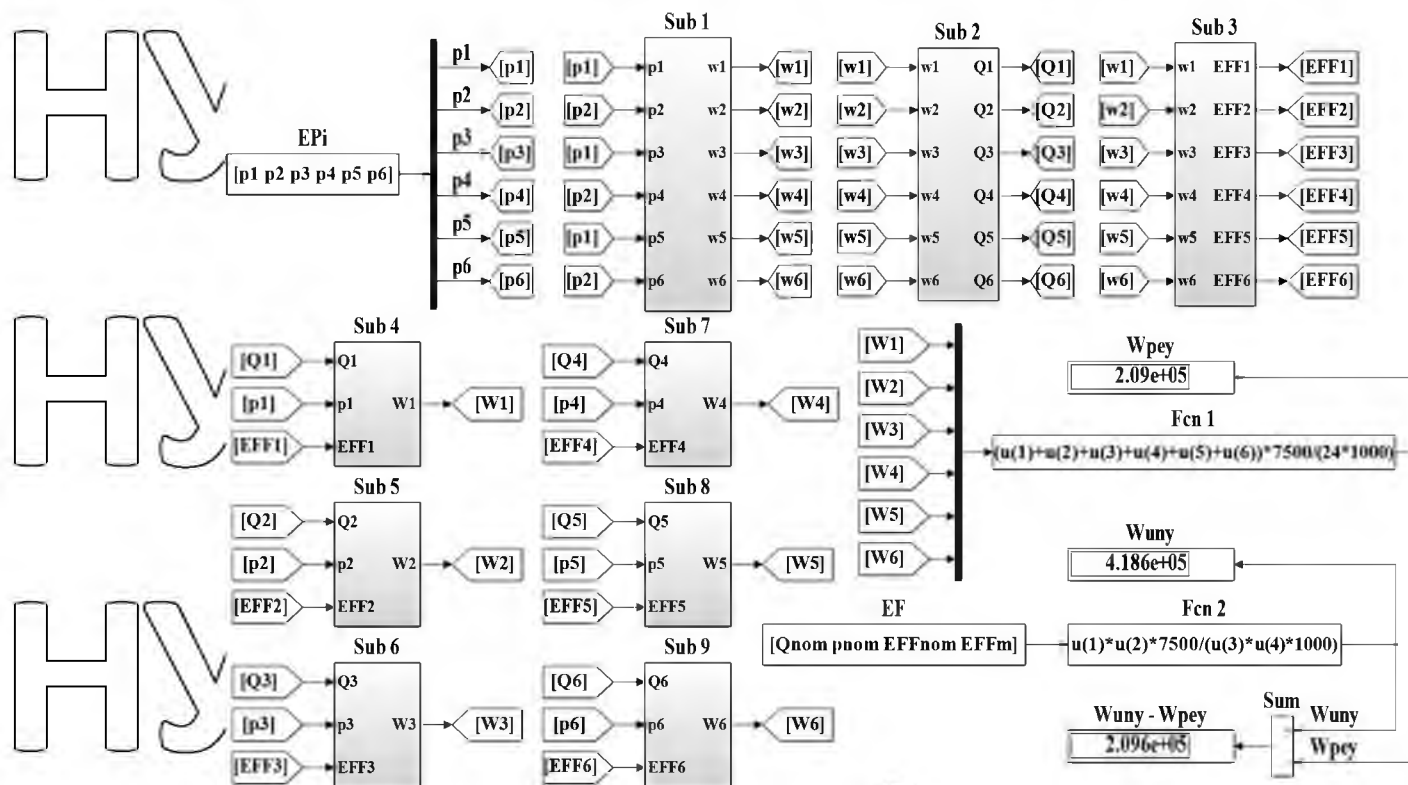


Рис. 4.3 – Імітаційна модель для визначення споживання електроенергії вентиляційної установкою

Модель складається з дев'яти підсистем, які називаються *Sub1* - *Sub9*. Базовим елементом в кожній з них є блок *Fcn*, який взятий з бібліотеки *User-Defined Functions* пакету *Simulink* у системі *MATLAB*. У полі налаштування цього блоку введена відповідна математична формула. Зв'язки між підсистемами забезпечуються блоками *Goto* - куди та *From* - звідки, з відповідними позначеннями перемінних у піктограмах цих елементів.

Об'єктом дослідження є вентиляторний агрегат місцевого провітрювання ВМЕ-8, оснащений регульованим електроприводом і наступними номінальними технічними характеристиками:

- продуктивність $Q_{nom} = 10 \text{ м}^3/\text{с}$;
- повний тиск $p_{nom} = 3200 \text{ Па}$;

- частота обертання $n_{nom} = 3000 \text{ об/хв}$;
 - кутова швидкість $\omega_{nom} = 315 \text{ 1/с}$.
 - ККД (*EFF*) вентилятора $\eta_{nom} = 0,63$;

- ККД (*EFF*) приводного двигуна $\eta_m = 0,91$;

- ККД (*EFF*) керованого перетворювача $\eta_{uz} = 0,95$.

Початкові дані щодо потрібного тиску вентилятора наведені у таблиці 4.1 при річному часі роботи вентилятора $T_p = 7500$ год/рік.

Таблиця 4.1 – Тиск вентиляторного агрегату протягом доби

Час доби T_i ГОДИНИ	0 – 4	4 – 8	8 – 12	12 – 16	16 – 20	20 – 24
Повний тиск p_i , Па	1800	1100	2600	2700	2200	1900

Кутова швидкість ω_i (1/с) вентиляторної установки при необхідному тиску

p_i на i -му інтервалі доби (*Sub 1*)

$$\omega_i = \omega_{nom} \sqrt{\frac{p_i}{p_{nom}}}$$

Продуктивність вентилятора Q_i ($\text{м}^3/\text{с}$) для створення необхідного тиску на

i -му інтервалі доби (*Sub 2*)

$$Q_i = Q_{nom} \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_{nom}} \right)^3$$

ККД вентилятора η_i при роботі з i -ою швидкістю ω_i (*Sub 3*)

$$\eta_i = 1 - \frac{1 - \eta_{nom}}{\left(\frac{\omega_i}{\omega_{nom}} \right)^{0,36}}$$

Споживана потужність вентилятором P_i (Вт) й електроенергія W_i (Вт·год)

на i -му інтервалі доби (*Sub 4...9*)

$$W_i = P_i \cdot T_i ,$$

P_i можна розраховуватися за формулою

$$P_{reg} = \frac{Q_i \cdot p_i}{\eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_{uz}}$$
 Річне споживання електричної енергії W_{reg} (кВт·год/рік) з регульованим електроприводом ($F_{cn} 1$)

$$W_{reg} = \frac{T_p \cdot \sum W_i}{24 \cdot 1000}$$
 Потужність P_{nom} (Вт) й річне споживання електроенергії W_{uny} (кВт·год/рік) при нерегульованому електроприводі ($F_{cn} 2$)

$$P_{nom} = \frac{Q_{nom} \cdot p_{nom}}{\eta_{nom} \cdot \eta_m}$$

$$W_{uny} = \frac{P_{nom} \cdot T_p}{1000}$$
 Річна економія електричної енергії ΔW (кВт·год/рік) вентиляторним приладом місцевого провітрювання (Sum)

$$\Delta W = W_{uny} - W_{reg}$$
 Блок EP1 встановлює значення тиску вентилятора $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ протягом доби відповідно до таблиці 4.1. Блок EF визначає номінальні параметри вентиляторного апарату, такі як $Q_{nom}, p_{nom}, \eta_{nom}, \eta_m$.

Таблиця 4.2 – Споживання електроенергії вентиляторним агрегатом

Річне споживання електроенергії, кВт·год/рік		Економія електроенергії, кВт·год/рік
Регульований електропривод	Нерегульований електропривод	ΔW
W_{reg}	W_{uny}	
209000	418600	209600

Важливо відзначити, що подібний підхід можна застосувати і для визначення річного обсягу повітря, який видувається вентиляційною установкою з нерегульованим і регульованим електроприводом. Це дасть змогу розрахувати споживання електроенергії на одиницю повітря від вентиляторів з різними

типами приводів. Далі ці дані можна порівняти для визначення, яка конфігурація є більш ефективною з точки зору споживання електроенергії.

Ми створили модель робочого процесу вентилятора, де використовується регулювання швидкості двигуна, в середовищі MatLab Simulink. У цій моделі був впроваджений задачник інтенсивності. Використовуючи цю імітаційну модель,

ви побудували динамічні характеристики вентилятора, що дозволило вам аналізувати його роботу в різних режимах і реакцію на різні вхідні сигнали.

Була доведена значуща можливість зменшення споживання електроенергії вентиляторними установками завдяки використанню частотно-регульованого електроприводу замість нерегульованого. Це свідчить про ефективність впровадження технологій регулювання швидкості вентиляторів у промислових і комерційних системах. Такий підхід дозволяє досягти економії електроенергії, знизити експлуатаційні витрати і підвищити загальну ефективність роботи

системи вентиляції.

ВИСНОВОК

Були отримані дані щодо механічних та електромеханічних властивостей вибраного асинхронного двигуна, які були побудовані на основі розрахункових та каталожних значень. Крім цього, було проведено моделювання робочого процесу вентилятора в програмному середовищі MatLab Simulink і побудовано динамічні характеристики.

За допомогою приводу зі змінною частотою значно знизилася витрата на експлуатацію. При зміні частоти обертання вентилятора також змінюється продуктивність вентилятора вдвічі, тиск, що створюється, змінюється в два рази, а споживана потужність збільшується у три рази. Коефіцієнт корисної дії вентилятора залишається без змін. Цей метод регулювання є найбільш економічно вигідним.

Впровадження частотно-регульованого електроприводу має значний вплив на ефективність роботи системи, оскільки воно призводить до низки переваг. Це включає в себе зменшення споживаної електроенергії, підвищення надійності роботи обладнання, та зниження експлуатаційних витрат. Незаперечною перевагою є можливість оптимізувати режими роботи, підвищити рівень автоматизації, а також легкість і зручність впровадження.

Застосування регульованого електроприводу для вентиляторних агрегатів, на відміну від нерегульованих варіантів, призводить до значної економії електроенергії, яка може сягати до 50%. Цей показник стає ще більш важливим, коли вентилятор працює тривалий час і потребує зменшеної швидкості протягом дня.

Розроблена імітаційна модель для дослідження споживання електричної енергії вентиляторного агрегату для місцевого провітрювання є універсальною і може бути використана для різних типів вентиляторних установок. Фактично, потрібно лише знати необхідний тиск вентилятора протягом доби і ввести номінальні значення параметрів, таких як продуктивність, тиск, кутова швидкість, коефіцієнти корисної дії вентилятора, двигуна і силового перетворювача.

Отримані залежності дозволили сформулювати екстремальний закон частотного управління. Використання цього закону призводить до зниження втрат енергії на 5-10% в порівнянні з традиційним законом скалярного управління приводом при наявності вентиляторного навантаження.

Використовуючи комп'ютерне моделювання, було показано, що застосування спеціальних правил пуску двигуна призводить до додаткового ефекту збереження енергії. Ці правила дозволяють мінімізувати втрати енергії в системі приводу під час пуску та підвищити коефіцієнт потужності, завдяки зниженню споживаної реактивної потужності.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Старт-проект. Рекомендації до виконання розділу магістерської дисертації «Розроблення стартап-проекту» [Електронний ресурс] : / П. В. Круш, Н. А. Шевчук, О. І. Андрусь ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 50 с.
2. Шевчук Н.А. Розробка та впровадження стартап проекту на прикладі геосинтетичного модуля-опалубки / Шевчук Н.А., Вапнічна В.В. // Сучасні проблеми економіки і підприємництво [Текст]: Збірник наукових праць. – Вип. 23. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2019 С.32-40.
3. Автоматизація технологічних процесів підземних гірничих робіт. Підручник / А. В. Бубліков, М. В. Козарь, С. М. Проценко та ін., під заг. ред. В. В. Ткачова – .: Національний гірничий університет, 2012. – 304 с.
4. Цак В. В., Иванов С. К., Верещагин В. П. Шахтные вентиляционные установки местного проветривания. – М.: Недра, 1974. – 240 с.
5. Чермалих А.В. Исследование динамики и энергетических характеристик вентиляторных установок с регулируемым электроприводом/ А.В. Чермалих, В.Н.Пермяков, И.Я. Майданський/ Серия «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ/ НТУУ «КПІ», 2015. – Вип.27. – 160с.
6. Браславский И.Я., Ишмагов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Высш. проф. образование.— Москва: Изд-во «Академия», 2004. – 56 с.
7. Ивановский И.Г. Шахтные вентиляторы: Учеб. пособие.— Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003. С. 6 <http://bergmaster.narod.ru/edu/11-common/vent.pdf>.
8. Порцевский А.К. Вентиляция шахт. Аэрология карьеров. – М., 2004. С. 9-19 <http://www.geoprotection.narod.ru/genesis/aero-1.pdf>