

Реферат

Пояснювальна записка: 98 сторінок, 25 рисунків, 16 таблиці, 16 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 питомі 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 досягти 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 розповсюдженням для провітрювання тупикових виробок вентилятором місцевого провітрювання типу ВМ;
 - скласти універсальну імітаційну модель для визначення споживання електроенергії вентиляторним агрегатом місцевого провітрювання з регульованим електроприводом.
-

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ 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

ВВП – валовий внутрішній продукт

ВГП – вентилятори головного провітрювання

ВМП – вентилятор місцевого провітрювання

ГВУ – головна вентиляційна установка

ДМ – датчик потужності

ЕРС – електрорушійна сила

ЗП – задаючий пристрій

ЗІ – задатчик 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

ТПН – тиристорний перетворювач напруги

ФП – функціональний перетворювач

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
Розділ 1. АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	11
1.1 Виробничо-господарська характеристика підприємства	11
1.2 Аналіз результатів діяльності та перспектива розвитку сільськогосподарського підприємства	12
1.3 Аналіз рівня електрифікації та автоматизації технологічних процесів	13
1.4 Аналіз стану експлуатації енергетичного обладнання	14
1.5 Аналіз використання електроенергії та інших енергетичних ресурсів	14
1.6 Вихідні дані для проектування	14
Розділ 2. МОНТАЖ, НАЛАДКА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	15
2.1 Порядок організації монтажу, наладки та здачі в експлуатацію	15
2.2 Визначення об'ємів робіт по експлуатації та кількості обслуговуючого персоналу	15
2.3 Планування профілактичних заходів	18
2.4 Надійність постачання електроспоживачів і збитки від перерв у електропостачанні	19
2.5 Визначення споживання електроенергії та організація її обліку	19
2.5 Визначення втрат електроенергії	20
Розділ 3. ПРОЕКТУВАННЯ РЕМОНТНО-ОБСЛУГОВУЮЧОЇ БАЗИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СЛУЖБИ	22
3.1 Аналіз існуючої ремонтно-обслуговуючої бази енергетичної служби	22
3.2 Обґрунтування та вибір проекту пункту технічного обслуговування і ремонту енергетичного обладнання	22
Розділ 4. РОЗРАХУНКИ І ВИБІР СИЛОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ, ЕЛЕКТРИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ ТА СИЛОВОЇ І ОСВІТЛЮВАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОПРОВОДОК	24
4.1 Вибір технологічного обладнання	24
4.2 Вибір силового електрообладнання	26
4.3 Вибір апаратури керування і захисту	32
4.4 Розрахунок силових електропроводок та розподільчих щитів	33
4.5 Розрахунок освітлення	34
4.6 Опалення та вентиляція майстерні	41

Розділ 5. РОЗРОБКА ПИТАНЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕКОНОМІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ І ЕНЕРГОНОСІЇВ	43
5.1 Підрахунок електричних навантажень і вибір джерела живлення	43
5.2 Розрахунок зовнішніх електричних мереж	48
5.3 Перевірка можливості пуску і нормальної роботи асинхронних електродвигунів	50
5.4 Перевірка апаратів захисту за граничною вимикаючою здатністю	54
Розділ 6. ДІАГНОСТИКА ДЕФЕКТІВ РОТОРА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	56
6.1 Загальний стан проблеми діагностики дефектів ротора в умовах виробництва та ремонту АД.	56
6.2 Існуючі методи і пристрої тестової діагностики ротора АД та їх аналіз.	61
6.3 Принцип дії та конструктивні виконання індукційних ПКД КЗОР.	66
6.4 Параметрична оптимізація ПКД.	68
6.5 Розробка методичних рекомендацій та діагностичних карт для діагностики комбінованих ушкоджень ротора	70
6.6 Система автоматизованого контролю ушкоджень ротора АД.	74
Розділ 7. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	78
7.1 Аналіз стану безпеки праці на підприємстві	80
7.2 Розробка комплексу заходів щодо усунення небезпечних шкідливих виробничих факторів	82
7.3 Розрахунок заземлювального пристрою споживчої трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ	84
7.4 Блискавкозахист пункту технічного обслуговування	89
7.5 Пожежна безпека	90
Розділ 8. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ	92
ВИСНОВОКИ	100
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	101
ДОДАТКИ	104

ВСТУП

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 багато країн в цьому зацікавлені та приділяється велика увага теоретичним і практичним питанням енергозбереження. Це пов'язано в першу чергу з тим, що оцінюють питомі витрати енергії на одиницю вартості валового внутрішнього продукту (ВВП).

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

Енергозбереження стало одним з пріоритетних напрямків технічної політики у всіх розвинених країнах світу. Це пов'язано, по-перше, з обмеженістю і поновлювані основних енергоресурсів, по-друге, з безперервно зростаючими складнощами їх видобутку та вартістю, по-третє, з глобальними екологічними проблемами.

Частотно-регульований привід має високу точність, широкий діапазон регулювання швидкості обертання електродвигуна, забезпечує плавний пуск і гальмування, тому є найбільш ефективним способом управління. Найкращий засіб – застосування частотного управління, який дозволяє не тільки підвищити експлуатаційний ККД вентилятора, але і забезпечити мінімізацію втрат в приводі за допомогою енергозберігаючих алгоритмів управління.

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

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 розповсюдженням для провітрювання тупикових виробок вентилятором місцевого провітрювання типу ВМ;
- скласти універсальну імітаційну модель для визначення споживання електроенергії вентиляторним агрегатом місцевого провітрювання з регульованим електроприводом.

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

Область дослідження: принципи і засоби управління електротехнічними комплексами та системами.

Предметом дослідження є система управління вентиляторної установки частотно-регульованого електроприводу.

Кваліфікаційна магістерська робота складається з: вступ, п'яти розділів, що складається з підрозділів, висновків, списку використаних джерел. У тексті магістерської роботи міститься 16 таблиць та 25 зображень.

1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ ВЕНТИЛЯТОРІВ МІСЦЕВОГО ПРОВІТРЮВАННЯ З ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

1.1 Вентилятори місцевого провітрювання

Сьогодні жодна вугільна шахта або гірничорудне підприємство не обходиться без вентиляції місцевого провітрювання. Використання даного виду пристроїв істотно знижує ризик вибуху газово-пилових сумішей в тупикових частинах гірських виробок. Тому грамотний вибір і правильна установка вентиляторів у вентиляційній мережі шахти – це не тільки важлива виробничо-економічна складова гірничорудного промислу, перш за все, гарантія безпеки, здоров'я і життя працюючих на шахті людей.

У той же час в будь-якій шахті є велика кількість тупикових просторів, в яких накопичується газово-пилова суміш. Повітря в ці проблемні області може підводитися з допомогою спеціальних вентиляторів, які називаються вентиляторамі місцевого провітрювання (ВМП). У цього обладнання є специфічні вимоги, обумовлені особливостями функцій і умов експлуатації[1].

Вентилятори місцевого провітрювання повинні бути компактними, оскільки вони розміщуються у виробках, площа перетину яких може бути досить обмеженою. Спеціальні камери для їх розміщення робляться тільки для великих вентиляторів, що мають продуктивність 10 м³/с і більше[2].

Вентилятори місцевого провітрювання повинні мати можливість з'єднання з трубопроводом, по якому вони подають (відсмоктують) повітря. У шахтах, в яких встановлено обладнання, відбувається виділення метану. Це зумовлює ще одну особливість вентиляторів місцевого провітрювання: вони повинні мати вибухобезпечне виконання[1].

Особливості конструкції вентилятора місцевого провітрювання:

- Економічність і висока надійність роботи, за рахунок високої аеродинаміки і меридіонального прискорення;
- Система має плавне регулювання кількості подачі повітря в забій;

- Робоче колесо вентилятора стійке до впливу при роботі;
- При мінімальних габаритах і вазі, шахтний вентилятор має максимальні аеродинамічні показники;
- Простота в обслуговуванні та в ремонті, за рахунок доступу до всіх вузлів і деталей пристрою;
- Високий рівень безпеки пристрою місцевого провітрювання.

Конструкція шахтного вентилятора складається з електродвигуна, робочого колеса і патрубка з противибуховим пристроєм. Пристрій поміщено в захисний кожух. Робоче колесо бере участь у регулюванні тиску в робочій зоні вентилятора, який проводиться тільки при зупинці вентиляційного пристрою. Оснащений шахтний вентилятор тепловим та вібраційним захистом[3].

Зі збільшенням довжини вироблення, збільшується довжина трубопроводу, що веде до приросту витоків в ньому. Усе це призводить до необхідності збільшення продуктивності вентилятора. Це означає, що вентилятор місцевого провітрювання повинен бути також регульованим.

Найпоширеніші сучасні моделі шахтних вентиляторів місцевого провітрювання – вентилятори серії ВМЕ (ВМЕ-5, ВМЕ-6, ВМЕ-8, ВМЕ-12).

Вентилятори цієї серії призначені для провітрювання тупикових гірничих виробок у вугільних і рудних шахтах при щільності повітря до $1,3 \text{ кг / м}^3$, температурі від -20 до $+35 \text{ }^\circ \text{C}$, запиленості до 50 мг / м^3 і відносній вологості до 95% (при температурі $25 \text{ }^\circ \text{C}$).

Перераховані моделі шахтних вентиляторів мають ряд переваг:

- можливість відключення вентилятора при перевищенні нормальної температури;
- можливість застосування при провітрюванні невеликих виробок;
- конструкція вентиляторів дозволяє з'єднувати послідовно два вентилятора для підвищення тиску в трубопроводі;
- вентилятори можуть бути укомплектовані глушником шуму;
- в конструкції вентилятора застосовано противибуховий пристрій, що розширює область роботи вентилятора і запобігає його входження в помпаж.

1.2 Частотно-регульований асинхронний електропривод

Переваги асинхронного короткозамкненого двигуна в порівнянні з двигунами постійного струму, такі як висока надійність, менша вартість, простота виготовлення і експлуатації. У поєднанні з високими регульовальними і динамічними показниками перетворюють асинхронний частотно-регульований електропривод в домінуючий тип регульованого електроприводу. Масове застосування якого дозволяє вирішувати не тільки технологічні завдання, а й проблему енергозбереження [1].

Трифазний асинхронний електродвигун (АД) з короткозамкненим ротором – всім відомий тип електричної машини, який вдало технологічно відпрацьований. Частота обертання поля n_0 в двигуні визначається частотою напруги 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 ковзанням s :

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}.$$

Звідси отримаємо визначення частота обертання ротора:

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

З виразу випливає, що єдиним раціональним способом плавно регулювати швидкість такого двигуна є зміна частоти прикладеного до його обмоток напруги (рис. 1.1). Інші способи – це зміна числа пар полюсів або амплітуди напруги. Припускають використання спеціального тяжчого і дорогого двигуна, які пов'язані з істотним погіршенням енергетичних характеристик.

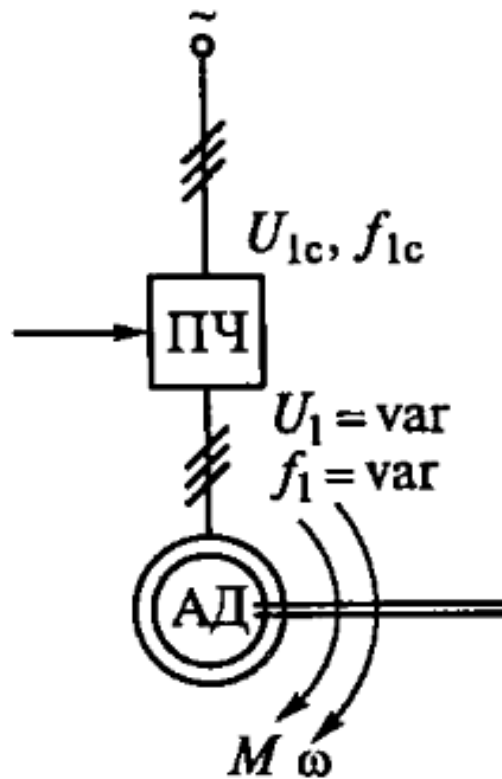


Рис. 1.1 – Структура частотно-регульованого електроприводу

При зміні частоти вниз від номінальної необхідно змінювати і амплітуду напруги. Оскільки ЕРС, що наводиться в обмотках статора, згідно з формулою приблизно дорівнює (якщо знехтувати падінням напруги на обмотках):

$$E_1 = 4,44\Phi f_1 w_1 k_{об} = U_1, \quad (1.1)$$

то для збереження при зміні частоти номінального магнітного потоку і максимального (критичного) моменту необхідно виконати умову[5]:

$$\Phi = \Phi_{ном} = \frac{U_1}{f_1} = const. \quad (1.2)$$

Недотримання цієї умови, тобто зміна частоти вниз при номінальній напрузі, неприпустимо, тому що викличе зростання магнітного потоку і відповідно до кривої намагнічування різке зростання струму I_μ .

Приводний двигун вибирається по потужності на максимальну продуктивність. При необхідності регулювання продуктивності і технологічних параметрів застосовуються такі методи управління процесом:

- 1) при нерегульованому електроприводі через механічну частину

(дроселювання, засувки, клапани та ін.);

2) при регульованому електроприводі через систему управління електроприводом, що забезпечує необхідний вид пускогальмівних процесів і регульованих по швидкості режимів[1].

Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному регулюванні мають вигляд, показаний на рисунку 1.2.

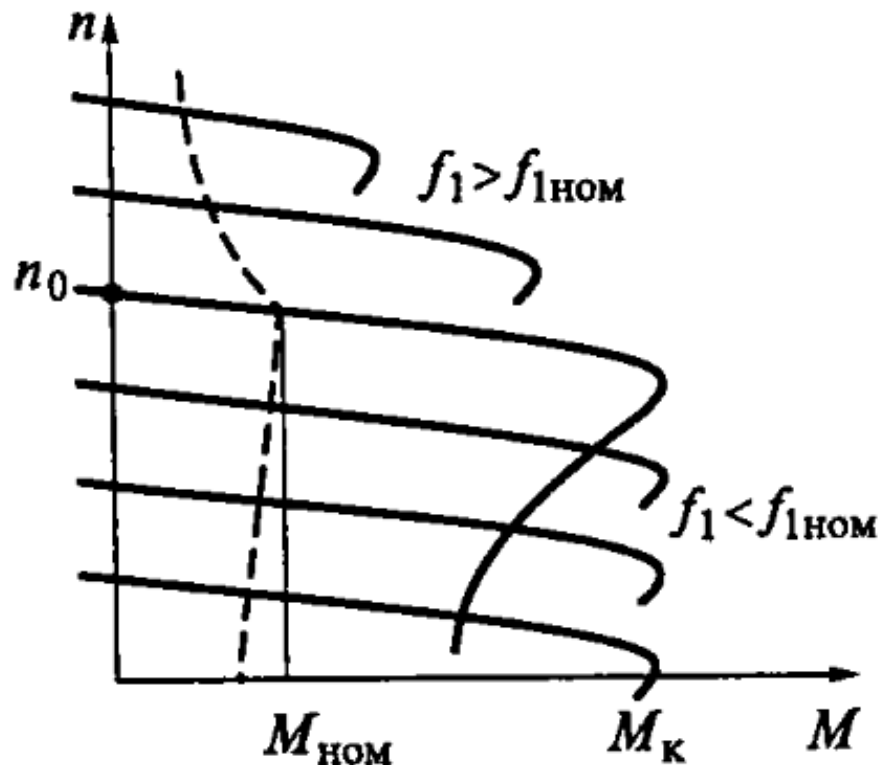


Рис. 1.2 – Механічна характеристика частотно-регульованого електроприводу

Для того щоб компенсувати падіння напруги в обмотках статора і зберегти незмінний M_k при низьких частотах, збільшують напругу, як показано на рисунку 1.3.

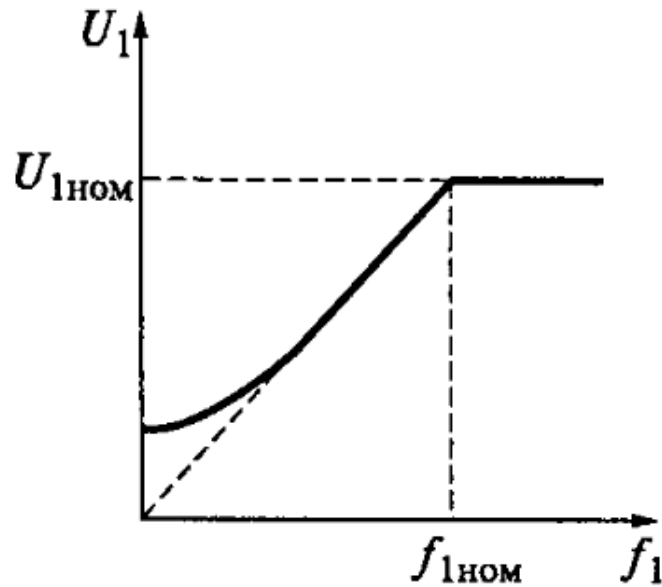


Рис. 1.3 – Залежність напруги від частоти при частотному регулюванні

Тривало допустимий момент двигуна при частотному регулюванні дещо знижується при низьких швидкостях у зв'язку з погіршенням вентиляції та зменшується обернено-пропорційно швидкості при високих швидкостях через зменшення магнітного потоку[4].

Відомо, що використання регульованого електроприводу, в поєднанні з системами технологічної автоматики дозволяє більш гнучко, плавно, динамічно, енергетично і економніше впливати на виробничий процес. Тому в даний час переважає і постійно розширюється тенденція передачі управління технологічним процесом від механічної частини системі автоматизованого регульованого електроприводу, що дозволяє забезпечити найкращі показники якості виробничого процесу та забезпечити значне зниження рівню енергоспоживання та інших ресурсів[1].

Важлива властивість частотного регулювання – практична стійкість втрат при зміні швидкості і однаковому навантаженні.

Ще одна дуже корисна властивість частотного регулювання – управління динамічними режимами з необхідним заходом скорочення втрат енергії при пусках і гальмуваннях.

При частотному регулюванні можна задавати будь-який темп зміни швидкості поля $\omega_0(t)$. На рисунку 1.4, як приклад, показані два варіанти пуску:

прискорений (1) і уповільнений (2). Швидкість ротора $\omega(t)$ відстає від швидкості поля $\omega_0(t)$ на величину електромеханічної сталої часу до T_M :

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

яка визначається по робочому ділянці механічної характеристики двигуна.

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

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

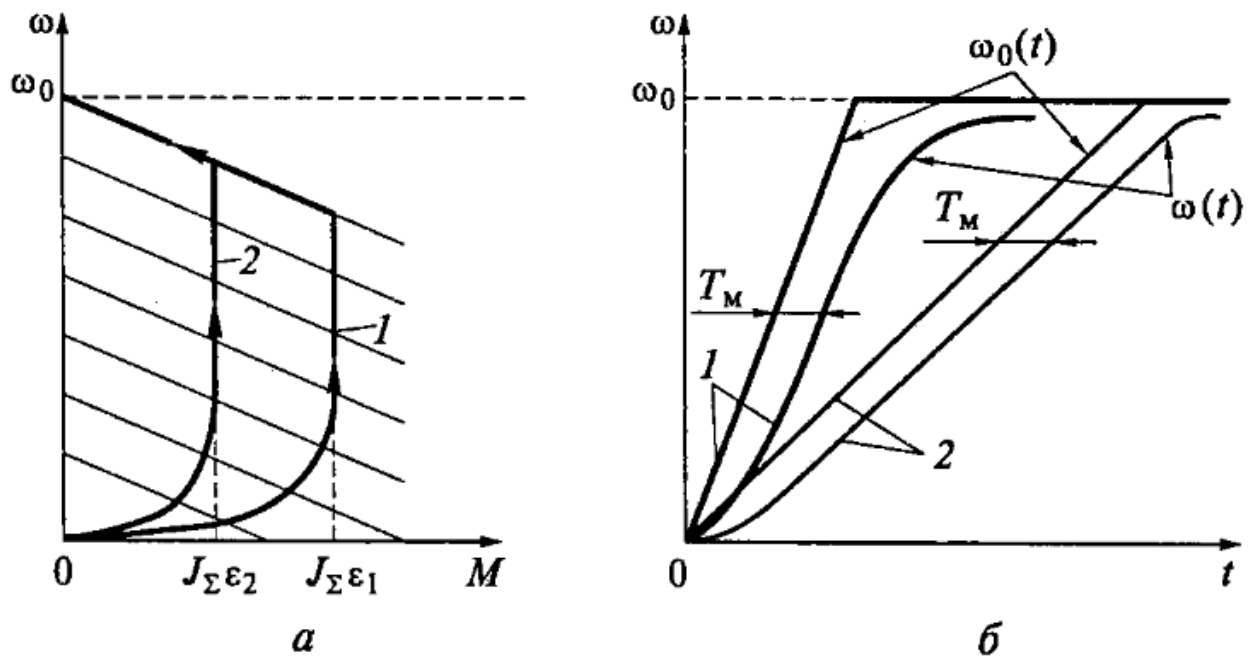


Рис. 1.4 – Графіки частотного пуску асинхронного двигуна в координатах $\omega - M$ (а) та $\omega - t$ (б)

У сучасних системах електроприводу регулювання параметрів проводиться з використанням різних типів напівпровідникових перетворювачів, тому при визначенні основних параметрів приводу, потрібно враховувати математичний опис та моделі обраних перетворювачів з урахуванням систем управління ними. Такий принцип дозволить аналізувати процеси в системі «перетворювач - асинхронний двигун»[4].

Аналіз процесів може бути проведений з урахуванням полігармонічного

складу напруги живлення при використанні напівпровідникових перетворювачів або тільки по гладкій складові напруги живлення, а також з урахуванням насичення магнітного кола асинхронної машини або при сталості параметрів[5].

Втрати енергії при пуску – площа фігури, укладеної між кривими електромагнітної потужності $P_{em} = M\omega_0$ і потужності на валу $P_2 = M\omega$ представлені на рисунку 1.5[1].

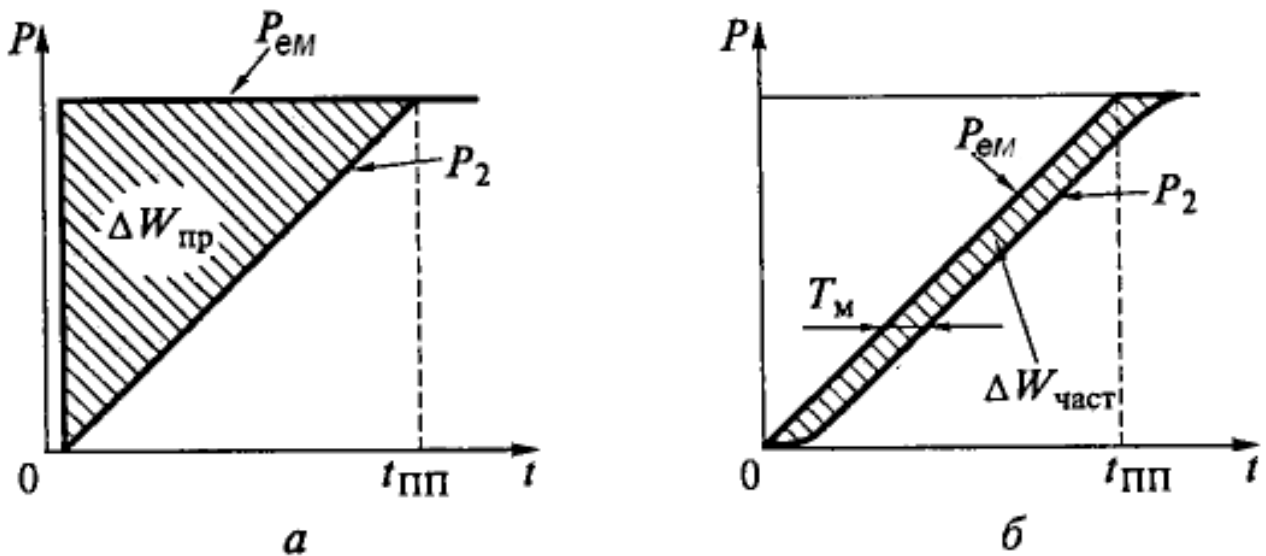


Рис. 1.5 – Втрати енергії при прямому (а) та частотному (б) пуску

При прямому пуску або гальмуванні електромагнітна потужність виникає практично миттєво, а потужність на валу, пропорційна швидкості, наростає в некерованому темпі перехідного процесу. Втрати енергії визначаються площею трикутника на рисунку 1.5 (а) [1].

Втрати енергії при частотному пуску (гальмуванні) – заштрихована область на рисунку 1.5 (б) – залежать від керованого часу перехідного процесу t_{nn} :

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

і можуть бути малими при збільшенні t_{nn} .

Отже, частотно-регульований асинхронний електропривод в його найпростішій реалізації (див. рис. 1.2) дозволяє регулювати швидкість вниз і вгору від основної, відповідній частоті 50 Гц, при мінімальних можливих втратах, керувати часом перехідних процесів і знижувати до бажаного рівня

втрати енергії, які супроводжують перехідний процес[5].

1.3 Шляхи збільшення енергоефективності асинхронних двигунів

Одним з найважливіших організаційно-технічних заходів енергозбереження є правильний вибір встановленої потужності асинхронного двигуна.

Аналіз різних способів і систем керування асинхронними електроприводами дозволяє окреслити такі напрями зниження споживання енергії АД.

Перший напрям пов'язаний зі зниженням втрат в електроприводі при виконанні ним заданих технологічних операцій по заданих тахограмах і з певним режимом занурення. Це електроприводи, що працюють в пуско-гальмівних або тривалих режимах з повільним змінням навантаження, зокрема вентилятори. У таких електроприводах за рахунок зниження втрат в сталих і перехідних режимах можлива значна економія електроенергії[1].

Другий напрямок пов'язаний зі зміною технологічного процесу на основі переходу до більш досконалих методів регулювання електроприводу і параметрів цього технологічного процесу. При цьому відбувається зниження споживання енергії електроприводом. Як приклад можна привести електроприводи турбомеханізмів (вентиляторів). При цьому, як правило, ефект не обмежується економією електроенергії в електроприводі. У багатьох випадках можлива економія ресурсів (наприклад, води)[1].

Для обох названих напрямів характерним є те, що в них знижується споживання енергії саме в електроприводі: в першому випадку за рахунок зниження втрат енергії, у другому за рахунок використання менш енерговитратного з боку електроприводу управління технологічним процесом[6].

Сформулюємо шляхи енергозбереження в асинхронному електроприводі.

У рамках першого напрямку для зниження втрат енергії в асинхронному

електроприводі можна використовувати наступні шляхи.

1. Обґрунтований вибір встановленої потужності двигуна, що відповідає реальним потребам керованого механізму. Це завдання пов'язане з тим, що коефіцієнт завантаження багатьох двигунів становить 50% і менше, що говорить або про низьку кваліфікацію розробників, або про недосконалість використаної методики розрахунку потужності електроприводу. Двигун із заниженою потужністю швидко виходить з ладу через перегрів, а двигун з великим запасом потужності перетворює енергію неефективно, тобто з високими питомими втратами в самому двигуні через низький ККД і в мережі живлення через низький коефіцієнт потужності. Тому перший шлях полягає в удосконаленні методик вибору потужності двигуна і перевірки його по нагріванню, а також в підвищенні кваліфікації розробників, проектувальників і обслуговуючого персоналу[1].

Існуючі методики вибору потужності двигуна і перевірки його по нагріванню можуть розглядатися лише як перше наближення. Необхідна розробка більш досконалих методик, заснованих на точному обліку режимів роботи електроприводу, зміні його енергетичних показників, теплових процесів в двигуні, стану ізоляції і таке інше. Це передбачає широке використання обчислювальної техніки і спеціального програмного забезпечення.

2. Перехід на більш економічні двигуни, в яких за рахунок збільшення маси активних матеріалів (заліза та міді), застосування більш досконалих матеріалів і технологій, підвищення номінального значення ККД і коефіцієнта потужності. Цей шлях, незважаючи на високу вартість таких двигунів, стає очевидним, якщо врахувати, що за даними західноєвропейських експертів, вартість електроенергії, споживаної щорічно середнім двигуном, в 5 разів перевершує його вартість. За час служби двигуна, а це десятки років, економія енергії значно перевищить капітальні витрати на таку модернізацію[1].

3. Перехід до більш досконалої з енергетичної точки зору системи електроприводу. Втрати енергії в перехідних режимах помітно змінюються при використанні реостатного регулювання, систем ТПН-АД і ПЧ-АД з

мінімальними втратами при застосуванні частотно-регульованих електроприводів. Тому в рамках кожної з перерахованих систем є більш-менш вдалі в енергетичному і технологічному плані варіанти[3].

4. Використання спеціальних технічних засобів, що забезпечують мінімізацію втрат енергії в електроприводі. Так як значна частина асинхронних електроприводів працює в умовах повільного змінення навантаження, тобто відхилення навантаження електроприводу від номінальної, погіршує енергетичні показники електроприводу. У даний час до таких засобів можна віднести пристрої регулювання напруги на двигуні відповідно до рівня його навантаження. Як правило, це або спеціальні регулятори напруги на основі тиристорного перетворювача напруги(ТПН), що включаються між мережею і статором двигуна, або перетворювачі частоти, в яких передбачений так званий режим енергозбереження.

У першому випадку ТПН виконує крім функції енергозбереження не менш важливі функції управління режимами пуску і гальмування, іноді регулює швидкість або момент, здійснює захист та діагностику. Підвищує технічний рівень приводу в цілому. У другому випадку режим енергозбереження розглядається, як додаткова опція перетворювача частоти і лише випускаються в деяких типах перетворювачів. З урахуванням багатофункціональності застосування, такі пристрої виявляються економічно доцільними для приводів зі змінним навантаженням навіть при їх відносно високій вартості[5].

5. Удосконалення алгоритмів керування електроприводом в системах ТПН-АД і ПЧ-АД на основі енергетичних критеріїв оцінки, розробка ефективних технічних засобів і пошук нових рішень, оптимальних в енергетичному сенсі.

У рамках другого напрямку зниження споживання енергії вирішальне значення має перехід від нерегульованого електроприводу до регульованого і підвищення рівня автоматизації за рахунок включення в контур регулювання ряду технологічних параметрів (тиску, витрати, температури). Так як цей напрямок пов'язано зі зниженням споживання енергії електроприводом за рахунок зміни технологічного процесу, з'являється можливість регулювання, де

раніше не регулювали технологічні параметри або змінювали спосіб їх регулювання[4].

При реалізації конкретних проектів виявлено кілька можливих шляхів енергозбереження, тому для отримання максимального ефекту необхідний комплексний підхід до вирішення завдання енергозбереження в електроприводі[3].

Розглянемо деякі з перерахованих шляхів підвищення енергетичної ефективності асинхронного електроприводу для вентиляторів:

- вентилятори займають серед турбомеханізмів друге місце після насосів з розповсюдження в промисловості;

- вентилятори мають великий момент інерції, іноді на порядок і більше перевищує приводного двигуна, що ускладнює їх пуск;

- вентилятори працюють на мережу без протитиску, внаслідок чого залежність моменту статичного опору на валу приводного двигуна від швидкості носить квадратичний характер, а провести потужність до вентилятора без урахування втрат на тертя в підшипниках, пропорційна кубу швидкості.

Якщо подачу вентилятора регулювати зміною швидкості, то характеристика мережі відповідає формулі $H_c = 0$, тобто $H = RQ^2$, а ККД вентилятора у всьому діапазоні регулювання залишається постійним.

Потужність, споживану з мережі двигуном вентилятора (без урахування ККД вентилятора), можна оцінити за виразами:

$$P_1 = \frac{1 + aS_{ном}}{1 - aS_{ном}} Q;$$

а при частотному регулюванні:

$$P_1 = Q^3 + \frac{S_{ном}(1 + a)}{1 - S_{ном}} Q^2.$$

Залежно споживаної потужності, побудовані за наведеними формулами, показані на рисунку 1.6. Пунктирною лінією позначено графіки потужності двигуна з урахуванням ККД вентилятора. На рисунку 1.6 видно, що споживана

потужність в частотно-регульованому електроприводі вентилятора значно нижче, ніж при регулюванні шиббером майже при будь-яких значеннях витрати Q за винятком точки номінального режиму[4].

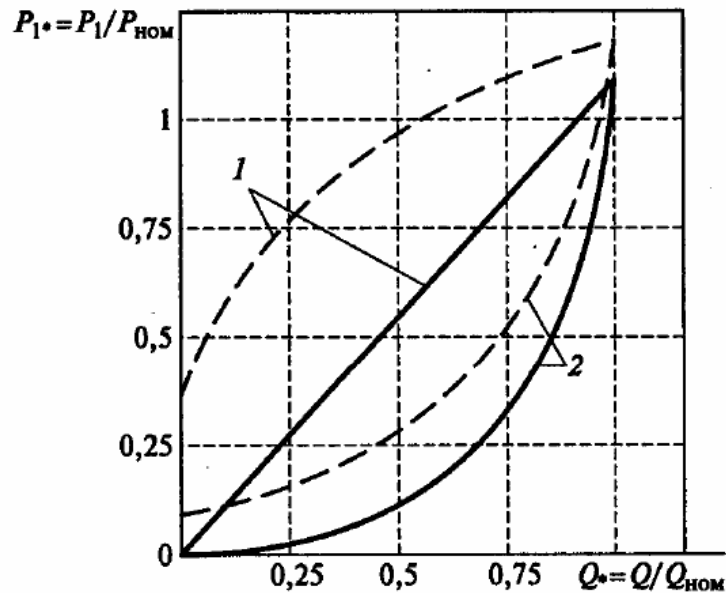


Рис. 1.6 – Залежності зміни потужності, яка використовується електроприводом вентилятора, при регулюванні шиббером(1) і частотним регулюванні(2)

Особливе значення для вентиляторів має застосування регульованого електроприводу, так як за деякими даними, що ККД вентиляторів при регульованому електроприводі має бути більше, ніж при нерегульованому, в середньому на 12%. Крім підвищення ККД застосування регульованого приводу вентиляторів дозволяє в деяких випадках спростити конструкцію турбомашин, виключивши направляючий апарат, а також забезпечити одночасну роботу двох і більше вентиляторів[4].

Необхідний діапазон регулювання швидкості для вентиляторів зазвичай не перевищує 2:1. Більш глибоке регулювання використовується рідко, якщо враховувати кубічну залежність споживаної потужності від частоти обертання.

Пуск вентилятора може проводитися як при розвантаженій машині, тобто при закритому спрямовуючому апараті, так і при повністю відкритому. У першому випадку максимальний момент при пуску двигуна вентилятора дорівнює приблизно 0,4 номінального, у другому в деяких – номінальному. При

пуску потужних вентиляторів з великим діаметром робочого колеса зазвичай потрібно обмеження прискорень при пуску, щоб уникнути появи надмірних динамічних напружень в лопатках робочого колеса[5].

Отже, вентилятори є механізмами з режимом тривалого навантаження з великою тривалістю роботи протягом року. Навантаження на валу приводного двигуна незначне, перевантажень не виникає. Вентилятори мають великий момент інерції, що необхідно враховувати при розрахунку пускових характеристик електроприводів.

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. Тому найбільше усім зазначеним вимогам повно відповідає частотно-регульований асинхронний електропривод. При цьому, як правило, можна обмежитися використанням простих і недорогих систем частотного регулювання.

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

2.1 Розрахунок вентиляції тупикових виробок

Розрахунок вентиляції тупикових виробок проводиться в наступному порядку.

1. Вибирається спосіб провітрювання. Спосіб провітрювання залежить від гірничо-геологічних і технологічних факторів.

2. Розраховується необхідна кількість повітря. Витрата повітря визначається по природному газовиділенню, кількістю працюючих людей, мінімальної швидкості руху повітря і теплового фактору. Для остаточного розрахунку приймається максимальна витрата повітря. На споруджуваних шахтах додатково розраховується витрата повітря по газам, що утворюється під час зварювальних робіт. Для тупикових виробок протяжністю до 300 м і стовбурів незалежно від глибини, розрахунок виконується відразу для максимальної довжини. Для тупикових виробок більшої довжини допускається розрахунок на окремі періоди для проміжних значень довжини 300, 600, 900 м включаючи максимальну довжину[6].

Розрахунок витрати повітря проводиться для при забойного простору ($Q_{3п}$) і в цілому для вироблення ($Q_{гт}$).

3. Визначається аеродинамічний опір трубопроводу.

4. Визначається депресія (Па) для повної розрахункової довжини трубопроводу за формулою:

$$h = R_m Q_v^2$$

де R_m - аеродинамічний опір трубопроводу, $H \cdot c^2 / m^8$.

5. Проводиться вибір вентилятора за розрахунковими значеннями h_v і Q_v наносяться на характеристики вентиляторів місцевого провітрювання.

Приймається вентилятор, що задовольняє значенням h_v і Q_v з максимальним коефіцієнтом корисної дії[6].

2.2 Мінімізація втрат у частотно-регульованому приводі вентиляції

На провітрювання підземних виробок тратиться до 50% від загальної енергії, споживаної гірничим підприємством, а частка витрат на вентиляцію. У собівартості продукції досягає 30%. Висока енергоємність процесу вентиляції шахт є наслідком низької енергетичної ефективності головних вентиляційних установок (ГВУ) шахт і великих втрат на різних стадіях перетворення і передачі енергії. Основна можливість підвищення енергетичної ефективності ГВУ шахт пов'язана з реалізації сучасної концепції провітрювання відповідно до реальної потреби шахти в свіжому повітрі, залежить від особливості того чи іншого етапу введення гірських робіт.

Другий за значимістю енергетичний ефект дасть мінімізація втрат в вентиляторах головного провітрювання (ВГП), які в більшості працюють з експлуатаційним ККД $\eta = 30 - 40\%$ нижче межі області промислового використання $\eta = 60\%$. Пропонуються методи підвищення ККД за рахунок використання частотного або комбінованого методу управління ВГП і вибору вентилятора з умови збігу траєкторії річних робочих точок провітрювання в координатах «тиск-продуктивність» з лінією руху точок з максимальним значенням ККД при частотному методі управління. Для реалізації цих методів запропоновано використовувати високовольтний частково-регульований електропривод ВГП, побудований на базі багаторівневого інвертора і багаторівневого активного випрямляча. Частотне регулювання дає можливість не тільки збільшити експлуатаційний ККД вентилятора, але і мінімізувати втрати енергії в приводі за рахунок використання екстремальних законів управління [7]. Мінімізація втрат в приводі дає додатковий енергозберігаючий ефект. Тому розробка оптимальних законів керування та їх реалізація в складі існуючих систем управління – актуальне завдання.

2.2.1 Система скалярного частотного управління приводом вентилятора

Управління ВГП, що реалізує комплекс енергозберігаючих заходів, здійснювалися багатоцільовий системою управління. Розглянемо окремі аспекти цієї системи: спосіб регулювання і стабілізації режиму роботи вентилятора в умовах зміни параметрів вентиляційної мережі і метод оптимального управління двигуном по критерію мінімуму втрат. Кількість повітря, що подається на виробку, визначається шахтною системою контролю на підставі плану введення гірських робіт, складу шахтної атмосфери та кількості робочого персоналу. Обсяг повітря, що подається, змінюється в залежності від етапу введення гірських робіт. У таких умовах ГВУ повинна надавати можливість оперативного регулювання виробництва в широких межах[8].

Істотний вплив на режим провітрювання надають випадкові коливання параметрів вентиляційної мережі, які пов'язані з трансформаційних змін температури зовнішнього повітря, рухом внутрішньо-шахтного транспорту, відкриттям та закриттям дверей і перемичок. У зв'язку з цим виникає завдання стабілізації режиму провітрювання. З метою оперативного регулювання і стабілізації режиму провітрювання ВГП забезпечується системою автоматичного управління (рис. 2.1).

Система управління має підпорядковану структуру і складається з двох контурів. Зовнішній контур підтримує задану продуктивність вентилятора. Для цього сигнал датчика продуктивності порівнюється із завданням. При наявності помилки регулятор формує завдання за швидкістю двигуна для внутрішнього контуру. Використання ПІ-регулювання дозволяє виключити статичну помилку і відхилення від заданого режиму провітрювання при збуреннях у вентиляційній мережі. Внутрішній контур регулює швидкість двигуна і фактично є скалярною системою управління частотно-регульованим електроприводом з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

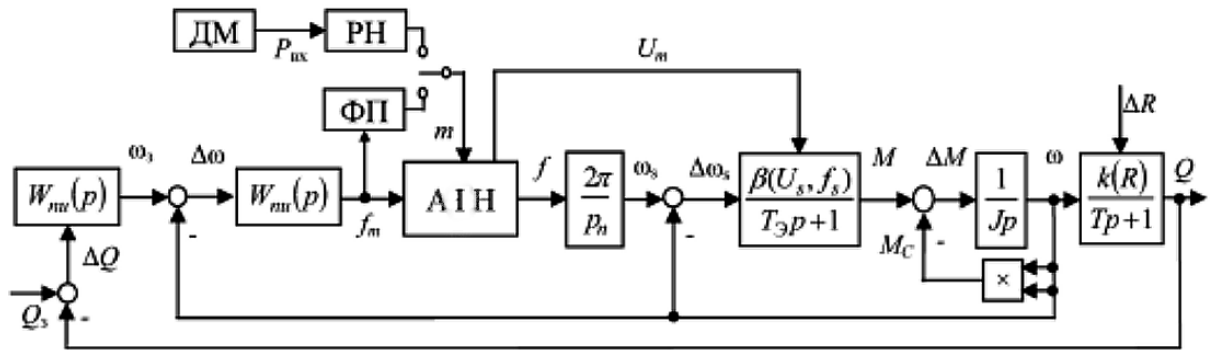


Рис. 2.1 – Структурна схема системи управління вентилятора

За поточним неузгодженості швидкості система формує амплітуду і частоту моделюючого сигналу ШІМ, які визначають амплітуду і частоту першої гармоніки напруги на виході автономного інвертора напруги (АІН). У традиційному електроприводі амплітуда і частота пов'язана з законом управління, визначальною напругою на виході функціонального перетворювача (ФП), на вхід якого подається сигнал частоти. Для вентиляторів найбільш поширеним законом є залежність $U / f^2 = const$ [4].

У роботі запропонований енергозберігаючий метод управління приводом, при якому оптимальний режим роботи досягається зміною потокозчеплення двигуна при компенсації відхилення по швидкості двигуна за рахунок регулювання частоти внутрішнім контуром системи управління. Розглянемо передавальні функції системи. Асинхронний двигун врахований передавальними функціями електричної та механічної частини двигуна [8]:

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

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

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 визначалися втрати енергії в приводі при незалежній зміні потокозчеплення для різних режимів роботи вентилятора. При зміні потокозчеплення швидкість обертання ротора постійно підтримується за рахунок автоматичної зміни частоти напруги статора контуром регулювання швидкості. Продуктивність і відповідна швидкість двигуна змінювалися в діапазоні 40-100% від номінальних значень.

На рисунку 2.2 представлені графіки втрат в сталі й міді двигуна, отримані при підтриманні швидкості обертання $\omega = 0,8\omega_0$ і модифікації потокозчеплення двигуна[4].

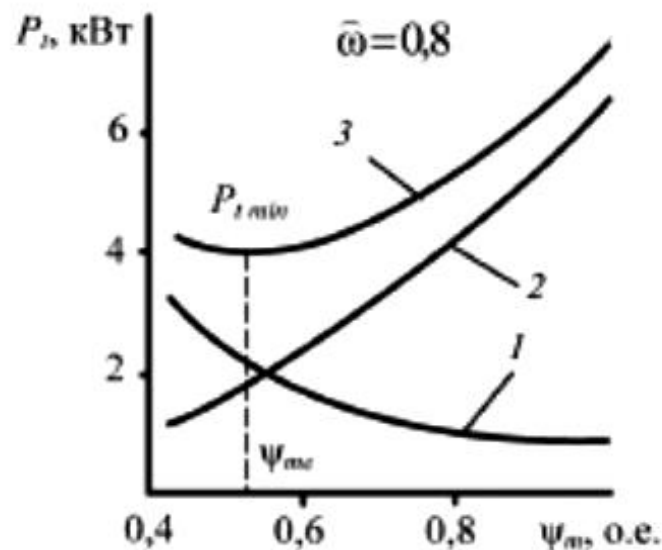


Рис. 2.2 – Залежність втрат в сталі(1), міді(2) і сумарних втрат(3) від потокозчеплення

Як видно з графіків, при зменшенні потокозчеплення від номінального значення втрати в сталі зростають, а втрати в міді зменшуються. Тоді ж сумарні втрати мають мінімум $P_{t.min}$ при оптимальному значенні потокозчеплення $\psi_e = 0,52\psi_0$. Подібним чином поведуть себе залежності сумарних втрат від потокозчеплення і для інших значень швидкості двигуна (рис. 2.3)[8].

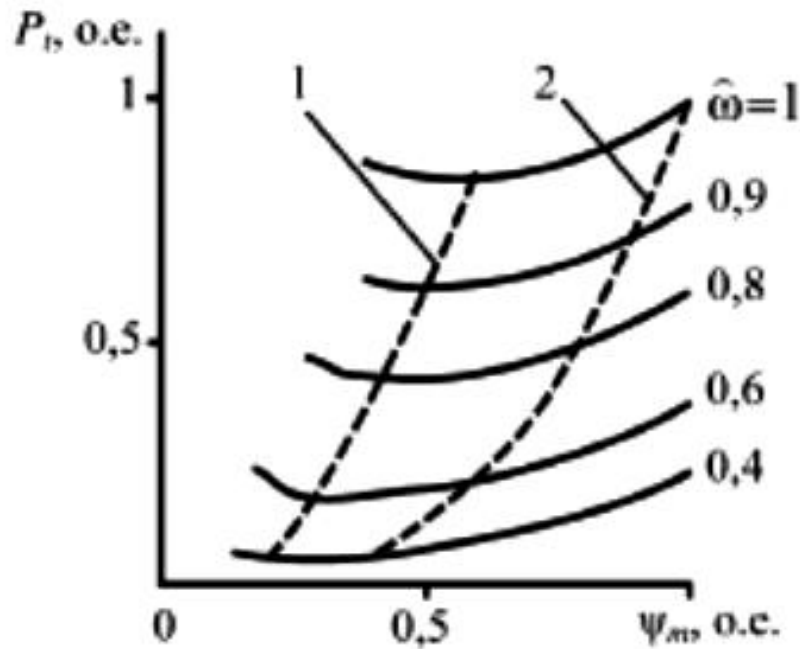


Рис. 2.3 – Втрати енергії при різних швидкостях двигуна при оптимальному(1) та традиційному(2) закону управління

На рисунку 2.3 помітно, що оптимальне потокозчеплення і відповідний мінімум втрат змінюються в залежності від режиму роботи приводу. Крива $P_{t.min}(\psi_e)$ (лінія 1 на рис. 2.3), проведена через точки екстремумів, можна поставити у відповідність залежності оптимального потокозчеплення від швидкості, яку можна виразити у вигляді скалярного закону управління, що забезпечує режим мінімальних втрат у приводі. Для порівняння на рисунку 2.3 показана потужність втрат (крива 2) при традиційному законі скалярного управління для вентиляторного навантаження приводу: U/f^2 . Порівняння втрат, відповідних кривих 1 і 2 (рис. 2.3), показує, що використання оптимального закону керування приводом дозволяє знизити втрати енергії на 5-10% в порівнянні з традиційним законом управління[8].

Оптимальний закон управління може бути безпосередньо реалізований у функціональному перетворювачі (ФП). Однак отриманий закон справедливий тільки для наведеного типу двигуна і не є загальним. Для іншого двигуна необхідно повторення процедури виведення закону управління. Екстремальний закон управління може бути здійснений шляхом безпосереднього обчислення оптимального значення потокозчеплення по математичній моделі двигуна,

закладеної в пам'ять мікропроцесорного пристрою [6]. Однак для знаходження оптимуму, потрібно визначити точні моделі багатьох видів витрат, які враховують нелінійний характер намагнічування, температурну і частоту залежності параметрів двигуна та інші фактори. Це призводить до ускладнення системи управління і необхідності застосування адаптивного спостерігача координат [9].

Використаний ітераційний метод пошуку мінімуму втрат, позбавлений зазначених недоліків. Цей метод дозволяє мінімізувати втрати енергії як в інверторі, так і двигуні. Оптимальний режим роботи двигуна визначається безпосередньо під час роботи приводу [10].

2.2.3 Енергозберігаючий алгоритм управління частотно-регульованим приводом

У методі пошуку використовується РН (рис. 2.1), вхідним сигналом для якого служить потужність приводу, яка вимірюється датчиком потужності (ДМ) через рівні проміжки часу. По одному з алгоритмів регулятором шукає значення потоку, при якому вимірювання потужності буде мінімальною для даної робочої точки приводу, яка визначається швидкістю і моментом. Мінімум вхідних потужностей відповідає мінімуму втрат. До даного методу відноситься інваріантність алгоритму до параметрів двигуна та їх зміни в процесі роботи.

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

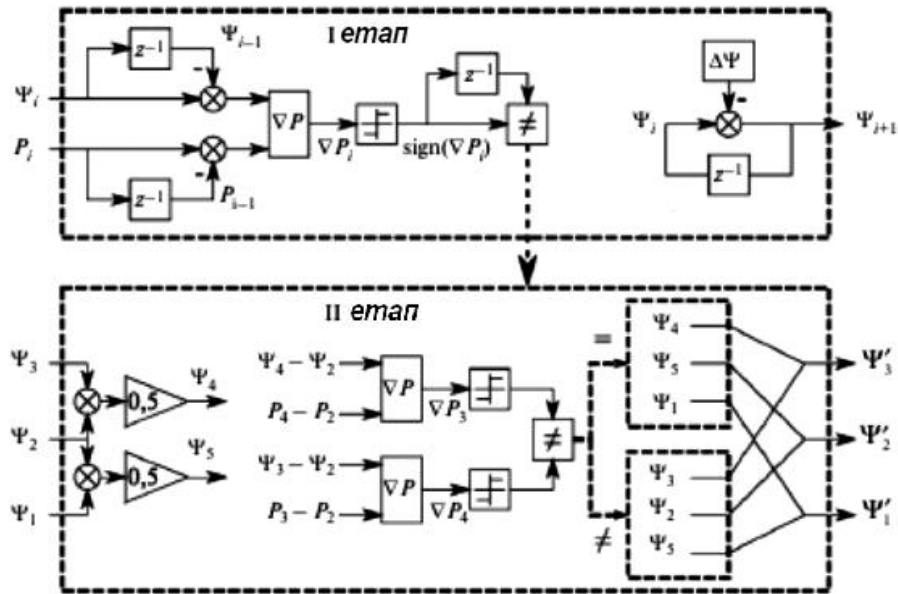


Рис. 2.4 – Структурна схема регулятора напруги, яка використовує градієнтний алгоритм пошуку

На першому етапі пошуку визначається область, в якій знаходиться екстремум. За відправну точку пошуку є початкове значення потужності. На кожній ітерації потужності знижується на фіксований крок $\psi_i = \psi_{i-1} + \Delta\psi$ і потім обчислюється вивідна потужність $\Delta P_i = (P_i - P_{i-1}) / (\psi_i - \psi_{i-1})$ (ψ_i, P_i – потужності і потужність на i -й ітерації пошуку), яка порівнюється з похідних ΔP_{i-1} , отриманої на попередній інтеграції [6].

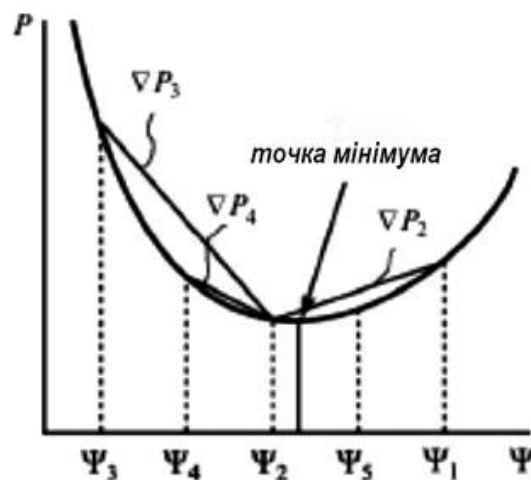


Рис. 2.5 – Для уточнення області пошуку мінімуму потужності

На другій фазі алгоритму відбувається уточнення знаходження області. Роботу алгоритму при цьому можна спостерігати на рисунку 2.5, на якому

показаний момент часу безпосередньо після переходу до другого етапу пошуку. Мінімальна потужність знаходиться в області $[\psi_3; \psi_1]$.

Ілюстрація роботи градієнтного методу пошуку, що використовує дані, отримані за допомогою розглянутої раніше моделі приводу, представлена на рисунку 2.6.

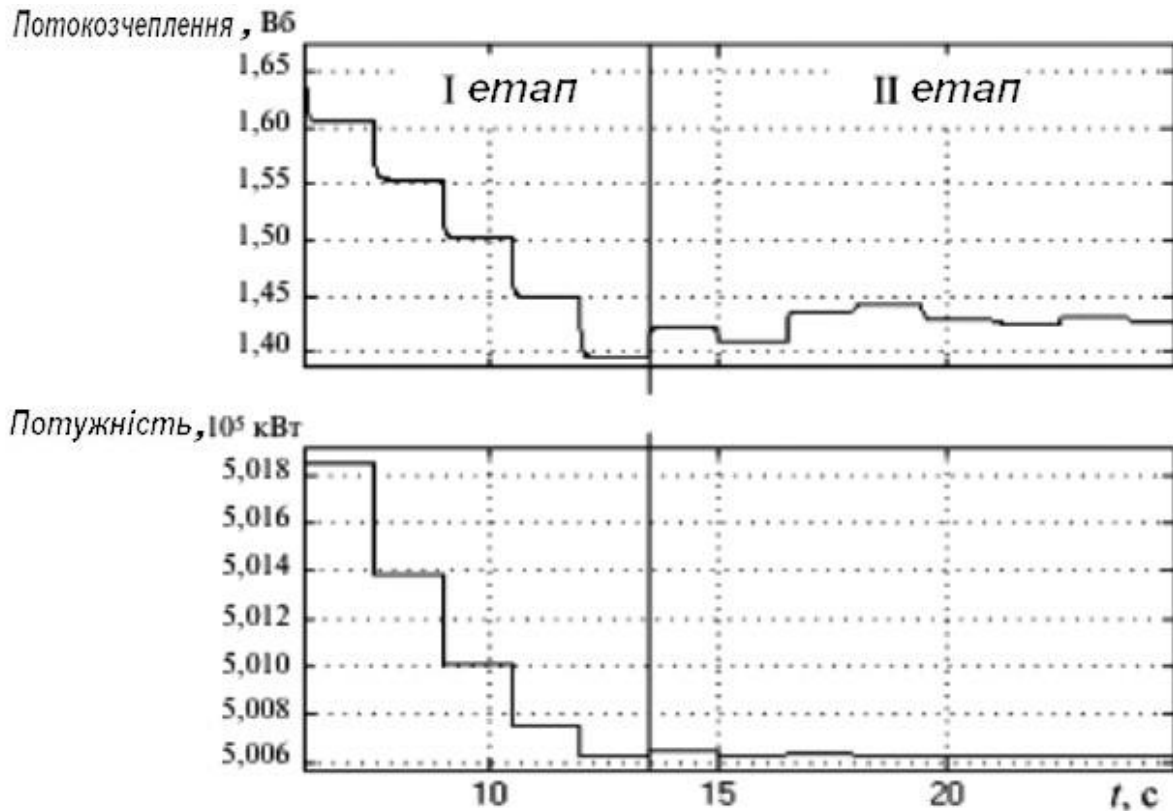


Рис. 2.6 – Перехідний процес при пошуку мінімуму градієнтним алгоритмом

Потокозчеплення намагнічуючого контуру змінюється від номінального значення до оптимального. Крок за часом обраний з умови завершення перехідного процесу в двигуні, викликаної зміною напруги на попередньому кроці. У досліджуваній моделі зміна потокозчеплення відбувалася з інтервалом 1,5 с.

Із діаграм помітно, що час пошуку екстремуму складає близько 20 с. Це час набагато менший проміжку часу між можливими змінами механічного навантаження приводу, відповідно до відносно повільних процесів трансформаційних змін режиму провітрювання підземних виробок.

Пуск електродвигуна з великим моментом інерції на валу займає багато

часу і високого струму. А також викликає провали напруги в розподільній мережі та додаткові втрати енергії. Частково цю проблему вирішує використання плавного пуску, при якому частота й амплітуда напруги плавно змінюється за лінійним законом від нуля до номінального значення. Показники пускового режиму можна поліпшити, використовуючи інші закони управління двигуном. Для ілюстрації можливостей енергозберігаючого приводу в пусковому режимі використовувалася одна із різновидів законів управління двигуном під час пуску, отриманих в роботі 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.

При плавному пуску частота поступово збільшується протягом заданого часу. Система управління змінює амплітуду напруги згідно закону управління виходячи зі змінною значення частоти в кожний період часу. Закон управління визначає відношення між вектором напруги та вектором частоти, зображено на рисунку 2.7.

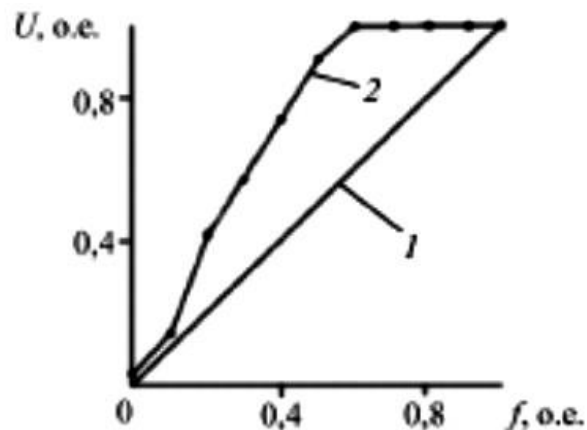


Рис. 2.7 – Графіки традиційного закону пуску(1) та оптимального закону пуску(2)

Після закінчення пуску система управління переключається на енергозберігаючий алгоритм управління стаціонарним режимом роботи.

Результати комп'ютерного моделювання пуску електроприводу потужністю 1,5 МВт при використанні оптимального і традиційного законів

управління представлені на рисунку 2.8. З графіків видно, що застосування оптимального закону керування дозволяє знизити втрати енергії в двигуні за час пуску на 25% (рис 2.8, б). При цьому активна потужність двигуна (рис. 2.8, в) незначно змінюється, а реактивна потужність під час пуску знижується (рис. 2.8, г), що еквівалентно підвищенню коефіцієнта потужності.

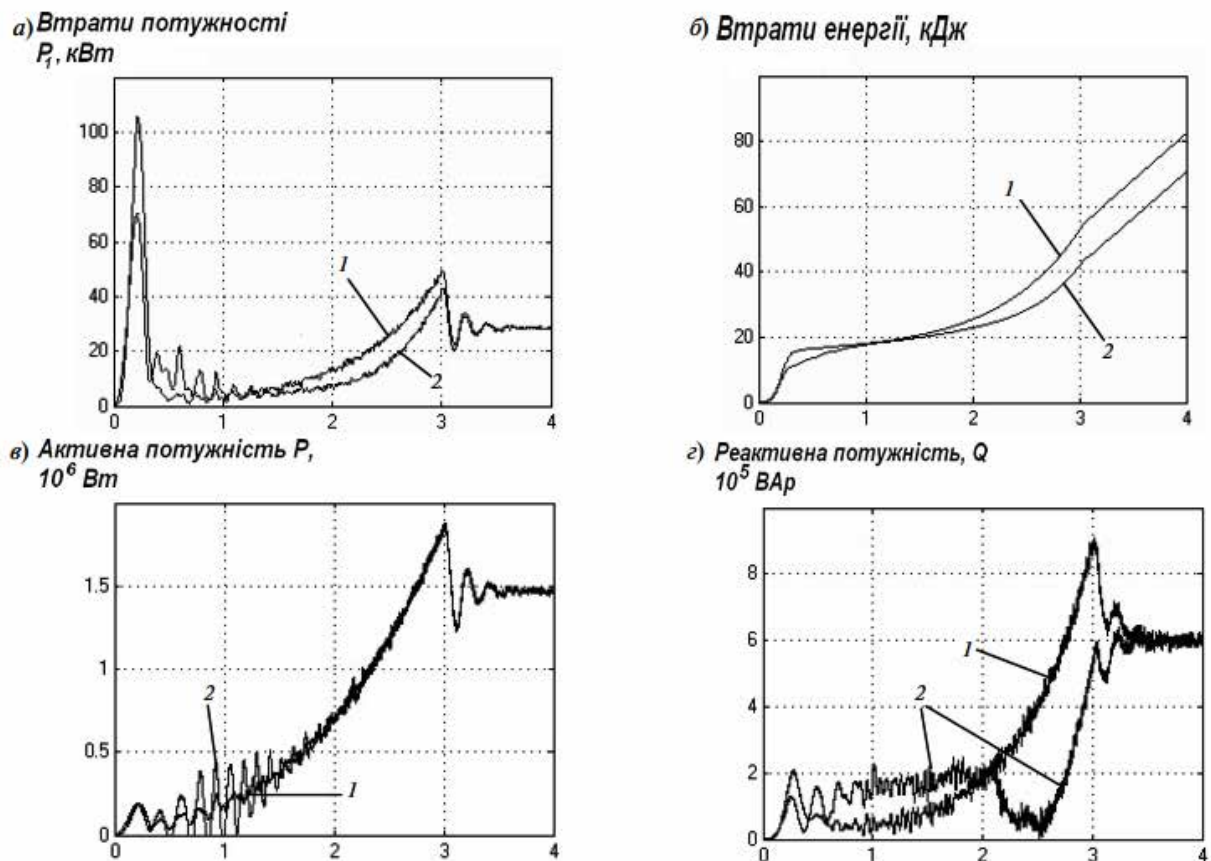


Рис. 2.8 – Порівняння енергетичних показників процесу пуску двигуна при традиційному (криві 1) та оптимальному (криві 2) законі керування: а - потужність втрат, б - втрати енергії, в - споживана активна потужність; г - споживана реактивна потужність двигуна.

Використання частотно-регульованого приводу вентиляторів головного провітрювання – необхідна умова реалізації сучасного підходу до організації вентиляції підземного простору відповідно до реальних потреб шахти в свіжому повітрі[11].

Застосування частотного управління дозволяє не тільки підвищити експлуатаційних ККД вентилятора, але і забезпечити мінімізацію втрат в приводі

за допомогою енергозберігаючих алгоритмів управління. На основі комп'ютерної моделі АД і моделі скалярної системи управління приводом виявлені залежності сумарних втрат енергії від потокозчеплення при варіюванні швидкості обертання вала двигуна в межах області частотного регулювання продуктивності вентилятора.

Отримані залежності дозволили сформулювати екстремальний закон частотного управління, застосування якого дає зниження втрат енергії на 5-10% в порівнянні з традиційним законом скалярного управління приводу з вентиляторної навантаженням[12]. За допомогою комп'ютерного моделювання показано, що додатковий енергозберігаючий ефект дає застосування спеціальних законів пуску двигуна, які дозволяють мінімізувати втрати енергії в приводу під час пуску і підвищити коефіцієнт потужності за рахунок зниження споживаної реактивної потужності. Подальший розвиток робіт пов'язано з підвищенням швидкодії пошукових алгоритмів на основі нейронних мереж і нечіткої логіки, з одного боку, й обґрунтування оптимальних алгоритмів пуску на основі генетичних алгоритмів.

2.3 Підвищення ККД вентиляторів та систем електроприводу

Підвищити ККД вентилятора можна, усунувши дефекти, отримані при його монтажі, ремонті та налаштуванні. До основних дефектів, наприклад, осьового вентилятора, відносять: роботу з переверненим робочим колесом; недотримання радіального і осьового зазорів між робочим колесом і входним патрубком або між робочими лопатками і корпусом вентилятора; відсутність обтічника на вході осьового вентилятора; укорочений дифузор або його відсутність; розузгодженість кутів установки лопаток напрямного апарата[12].

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

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

де Q, H – відповідно подача ($\text{м}^3/\text{с}$) і тиск (Па) вентилятора, що визначаються за показаннями витратоміра і депресіометра (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_g – час роботи вентилятора, год; η_1, η_2 – ККД вентилятора відповідно до та після усунення дефекту; $\eta_\delta, \eta_m, \eta_n$ – 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_3 .

Споживана потужність P_c (кВт), розраховується так:

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

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

Після розрахунку фактичного завантаження привідних двигунів з використанням наведених певних співвідношень для орієнтовних обчислень ККД як асинхронних, так і синхронних двигунів визначають відповідне даному завантаженню орієнтовне значення ККД двигуна η_δ (у відносних одиницях).

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

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

2.4 Проблеми проектування установок місцевого провітрювання

Установка місцевого провітрювання підготовчих виробок шахт і копалень включає в себе вентилятор місцевого провітрювання (ВМП) і гнучкий трубопровід, який має такі особливості: діаметр вентиляційних труб збільшується на 2-5% при зростанні внутрішнього тиску повітря p і допускає виток повітря в стиках труб. Це змінює аеродинамічний опір 1 м труби по довжині трубопроводу на r_0 та r_{mp} і зменшує доставку необхідної витрати повітря Q_3 (м³/с) до забою. Тому розрахунок параметрів установки місцевого провітрювання є досить складним [13].

Введемо наступні позначення:

L – довжина трубопроводу, м;

h_B – депресія ВМП, даПа;

Q_B – продуктивність вентилятора, м³/с;

K_{ym} – коефіцієнт витоків повітря в трубопроводі,

$$K_{ym} = Q_B / Q_3.$$

Завданням розрахунку установки місцевого провітрювання є визначення параметрів характеристики вентилятора, при яких забезпечується подача до забою Q_3 (м³/с) повітря з урахуванням його витоків по довжині трубопроводу:

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

де P_{mp} – падіння тиску повітря в трубопроводі даПа, кг/м².

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

$$p(L) = r_0 Q_3^2 L e^{\alpha^{-2/3}} K_{ym};$$

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

де r_0 – базове (початкове) значення аеродинамічного опору 1 м труби поблизу вибоїни; α – безрозмірний параметр, що характеризує деформацію тіла труб,

$$\alpha = \left[(1-\nu) \frac{d_0 r_0 Q_3^2 L}{4E\delta} \right].$$

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

Встановлено, що модуль пружності трубного матеріалу E дорівнює приблизно 10^6 даПа, коефіцієнт Пуассона ν знаходиться в діапазоні 0,2-0,3 і приблизно дорівнює 0,25 для матеріалів трубних типів.

Згідно з раніше проведеними дослідженнями коефіцієнт витоків повітря визначається 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 стику 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 поетапно за такою схемою.

Спочатку, за фактичними даними визначається значення r_0 при малій довжині виробки (100-150 м) по формулі:

$$r_0 = \frac{p_{mp}(L)}{Q_3^2 L e^{-\alpha^{2/3}}}.$$

Початкове значення α приймається 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 інженерного точності обчислень)[13].

На другому етапі розрахунків при довжині виробки, що допускає виток, за фактичними даними визначається значення r_{cm} шляхом використання формули:

$$r_{cm} = \frac{37r_0L^3}{(\sqrt[3]{K_{ym}} - 1)^3 \pi d_0 l_{36}} .$$

Повернемося до першої формули, представивши її в розгорнутому вигляді:

$$p(L) = r_0 Q_3^2 L e^{\alpha^{-2/3}} K_{ym} = h_B .$$

Її використання дозволяє визначити максимальну довжину вироблення L_{max} , на провітрювання якої досить використовуваного вентилятора або вибору ВМП і його сполуки для провітрювання виробки заданої довжини L_{max} . Узагальнений алгоритм рішення задачі наведено:

1. Визначення параметра r_0 інтернаціональним методом.
2. Визначення параметра r_{cm} і формули для розрахунку $K_{ym}(L)$.
3. Встановлення залежності $p_{TP}(L, Q_3)$.
4. Апроксимація характеристик вентилятора.
5. Визначення останнього рівняння при $p_{TP} = h_B$ відносно $L = L_{max}$.

Якщо застосовувати частотне управління, то можна отримати хороші результати в підвищенні експлуатаційних ККД вентилятора і забезпечити мінімізацію втрат в приводі за допомогою енергозберігаючих алгоритмів управління.

Визначено, що вплив режиму роботи вентилятора на втрати енергії в приводі здійснюється завдяки закону управління, який здійснений шляхом безпосереднього обчислення оптимального значення потокозчеплення, який в свою чергу обчислений за допомогою математичної моделі двигуна.

3 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВЕНТИЛЯТОРА МІСЦЕВОГО ПРОВІТРЮВАННЯ ТА ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Від правильності вибору електроприводу залежать продуктивність, точність, надійність та швидкість робочих машин, особливо під час пуску та гальмування. Правильне поєднання механічних характеристик виконавчих органів робочих машин і електроприводу є умовою оптимального конструктивного і технологічного рішення. Актуальним є питання раціонального використання електроенергії та енергозаощадження засобами електроприводу[14].

Визначення енергоефективності електроприводу здійснюють за двома основними складниками: енергоспоживанням (за критерій енергоспоживання обирають коефіцієнт потужності $\cos\varphi$) та перетворенням спожитої енергії, де критерієм енерговикористання слугує коефіцієнт корисної дії η .

Підвищувати рівень ефективності використання електричної енергії можна шляхом зменшення питомих витрат енергії на одиницю продукції за рахунок раціоналізації режиму роботи електроустаткування, вдосконалення технологій виробництва та зменшення втрат енергії під час її транспортування та перетворення.

3.1 Вибір вентилятора та особливості конструкції

Особливості конструкції вентиляторів місцевого провітрювання:

- сучасна аеродинамічна схема з меридіональним прискоренням потоку, забезпечує економічність і надійність роботи вентиляторів;
- можливість плавного механічного регулювання подачі необхідної кількості повітря в тупиковий забій;
- робоче колесо суцільнометалеве зварне стійке до механічних впливів;
- гранично високі аеродинамічні показники по подачі і тиску досягаються при мінімально можливої маси і габаритах вентиляторів;

- безпеку роботи, легкість обслуговування і доступу до всіх частин вентилятора.

Конструкція вентилятора місцевого провітрювання включає в себе кожух, електродвигун з коробкою висновків, робоче колесо, патрубок, колектор і санчата. Патрубок обладнаний протививбуховим пристроєм. Регулювання тиску, яке розвиває вентилятор в робочій зоні, можливо за допомогою повороту лопаток робочого колеса і проводиться із зупиненням вентилятора. При великій протяжності гірничих виробок допускається з'єднувати послідовно два вентилятора. У вентиляторах вбудований тепловий захист в разі підвищення його температури і вібраційний захист в разі збільшення вібрації підшипників[5].

При зміні частоти обертання вентилятора, що працює в заданій мережі, робочий режим вентилятора зміщується вздовж характеристики мережі. Відповідно до формулами при зміні частоти обертання в m раз, продуктивність вентилятора зміниться в m раз, створюваний тиск – в m^2 раз, споживана потужність – в m^3 раз. ККД вентилятора залишається незмінним (рис. 3.1). Даний спосіб регулювання є найбільш економічно вигідним.

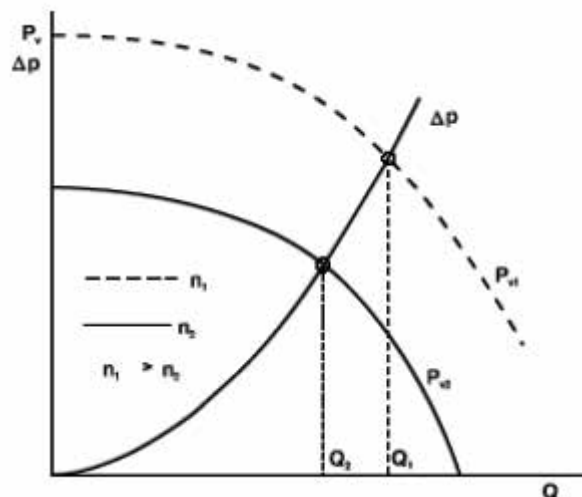


Рис. 3.1 – Робочий режим вентиляторної установки

Вентилятори серії ВМЕ необхідно встановлювати горизонтально. Відхилення від горизонтальної осі не повинно перевищувати 30° . Для управління вентилятором передбачені два варіанти: автоматичне і ручне

управління. Вентилятори місцевого провітрювання ВМЕ здатні працювати в звичайному і реверсивному режимах. Змінюючи число обертів двигуна, або повертаючи лопатки на ходу, можна регулювати подачу вентилятора. При аварійних відключеннях основного вентилятора передбачено автоматичне підключення резервного вентилятора. Конструкцією вентилятора передбачений резервний ввід низької напруги, який автоматично включається при пропажі основного. У разі короткочасного відключення напруги привід вентилятора повторно автоматично включається. Реверс вентилятора проводиться без зупинки вентилятора. Якщо виникне аварійна ситуація, то вентиляційна установка автоматично відключиться, і диспетчеру подаються звуковий і світловий сигнали[9].

В роботі обрано вентилятор шахтний місцевого провітрювання з електричним приводом ВМЕ-8 осьової одноступінчатий, вибухобезпечний, призначений для провітрювання тупикових гірничих виробок в шахтах, включаючи небезпечні по газу до пилу, при щільності повітря до $1,3 \text{ мг/м}^3$, при температурі від $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+35 \text{ }^\circ\text{C}$, запиленості до 50 мг/м^3 і відносній вологості до 95% (при температурі $+25 \text{ }^\circ\text{C}$).

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики вентилятора місцевого провітрювання ВМЕ-8

Номінальний діаметр, мм	Номінальна подача, м ³ /с	Номінальний повний тиск, Па	Максимальний ККД, %	Потужність, кВт	Частота обертання, об/хв	маса, кг
800	10	3200	0,63	50	3000	600

3.2 Обґрунтування вибору регульованого електроприводу вентиляційних установок

При розробці енергозберігаючих систем регульованого електроприводу вентиляційних установок слід мати на увазі, що технологічний процес подачі повітря має більшу різноманітність, ніж процес подачі рідини насосними установками. Регулює режим роботи вентиляційних установок обумовлено,

головним чином, сезонними і добовими змінами температури, вологістю і щільністю повітря, його запиленість і загазованість, яка переважно залежить від характеру виробництв вентилязованого приміщення. Для гірського виробництва найбільш характерно саме запиленість і загазованість виробок, а для процесів збагачення – запиленість цехів і приміщень збагачувальних фабрик.

Регулювання кутової швидкості вентиляторів головного провітрювання шахт і рудників практично не зустрічається в зв'язку з тим, що використовуються в основному осьові вентилятори, подача яких регулюється за допомогою зміни кута лопаток. У разі використання відцентрових вентиляторів головного провітрювання необхідність регулювання подачі пов'язана, в основному, через зміни еквівалентного отвору виробок в процесі розвитку шахти або рудника[12].

Для вентиляторів місцевого провітрювання рекомендується змінювати подачу повітря з таких міркувань:

- початок проходки тупикових виробок характеризується малим значенням аеродинамічного опору, в цей період часу необхідна невелика подача повітря для провітрювання;
- в міру подовження вироблення аеродинамічний опір збільшується і потрібно подача повітря в зростаючих кількостях;
- збільшення аеродинамічного опору;
- важливим фактором є газовиділення з навколишніх порід, для видалення якого в окремі періоди часу може знадобитися більша кількість повітря, ніж обумовлене аеродинамічним опором;
- введення прохідницьких робіт буропідривних супроводжується способом виділенням великої кількості продуктів підривання і пилу, а для їх швидкого видалення з вироблення необхідна короткочасна подача підвищеної кількості повітря.

Різноманітність ситуацій та факторів не дозволяє сформувати автоматичне керування регульованим електроприводом вентиляційних установок. Тут можливий варіант регулювання в ручному режимі управління[12].

Невеликі вентилятори головного провітрювання з потужністю

електродвигуна до 160 кВт, зазвичай використовують низьковольтні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. При потужності від 160 до 400 кВт знаходять застосування низьковольтні і високовольтні асинхронні двигуни з фазним ротором, а при великих потужностях використовуються високовольтні синхронні двигуни. У вентиляторах місцевого провітрювання використовуються низьковольтні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором [11].

Вибір регульованого електроприводу для вентиляційних установок принципово не відрізняється від вибору приводу для насосів. Для вентиляторів, оснащених асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором потужністю до 160 кВт, використовується переважно низьковольтний частотно-регульований електропривод. Для потужних вентиляторів з високовольтними синхронними електродвигунами потужністю до 4000 кВт використовуються безтрансформаторні високовольтні частотно-регульовані електроприводи з автономним інвертором струму. Особливо слід відзначити можливість застосування асинхронно-вентильного каскаду як низьковольтного, так і високовольтного для регулювання кутової швидкості вентиляторів, так як така система електроприводу значно дешевше частотно-регульованого. Однак застосування АВК можливо, якщо вентиляторний агрегат має в своєму складі асинхронний електродвигун з фазним ротором. У деяких випадках можлива заміна асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором на асинхронний електродвигун з фазним ротором. У гірській промисловості є приклад використання електроприводу потужністю 6000 кВт за схемою асинхронно-вентильного каскаду. Недоліком АВК є некомплектність поставки обладнання, і необхідність застосування спеціальних заходів для фільтрації вищих гармонік, що виникають внаслідок комутації вентилів введеного мережею інвертора [11].

Енергетичний ефект у вентиляторних установках можна отримати, якщо потрібне забезпечення змінної подачі для оптимізації технологічного процесу. У цьому випадку економічно виправдане застосування регульованого електроприводу, який в більшості випадків є дорогим і вимагає кваліфікованого персоналу. Аналіз режимів роботи вентиляційних установок виконується для

визначення основних технологічних параметрів, необхідних для проектування систем автоматичного управління цих установок. До числа цих параметрів відносяться[13]:

- найбільша подача вентилятора за розрахунковий період (добу, місяць або рік);
- найменша подача за розрахунковий період;
- необхідний тиск, відповідне найбільшій подачі;
- необхідний тиск, відповідне найменшій подачі;
- середній діапазон коливань подачі або тиску.

Обумовлені технологічні параметри та інші вихідні дані, які використовуються для побудови системи автоматичного управління вентиляторним агрегатом, повинні найбільшою мірою відповідати їх фактичним значенням. Значна частина вихідних даних визначається шляхом побудови графіків спільної роботи вентиляторів і мережі. При цьому використовуються напірні характеристики вентиляторів, характеристики повітропроводів або мережі. При роботі вентиляторів на повітроводи або мережу користуються поняттям еквівалентного отвору [13].

При виконанні аналізу режимів роботи вентиляційних установок систематизуються дані про річному споживанні електроенергії та річної продуктивності, про питомі витрати електроенергії, що витрачається на подачу повітря. Ці дані дозволяють підготувати техніко-економічне обґрунтування на виконання енергозберігаючих проектів.

3.2.1 Вибір і визначення параметрів електродвигуна

Двигуни призначені для роботи в якості приводу вентилятора місцевого провітрювання у вугільних і сланцевих шахтах, небезпечних щодо газу або вугільного пилу, а також у всіх галузях гірничорудної промисловості. Буква *M* типі двигуна позначає спеціальне виконання для вентиляторів місцевого провітрювання.

Двигуни призначені для тривалого режиму роботи *S1* від мережі змінного

струму частотою 50 Гц при номінальній напрузі до 660 В і мають виконання у вибухозахисту РВЗВМ для 2ВРМ200LА2.

3.2.2 Розрахунок робочих параметрів вентилятора при змінною кутової швидкості робочого колеса

Зміна кутової швидкості робочого колеса вентилятора веде до зміни всіх його робочих параметрів. При цьому змінюється і робоча характеристика вентилятора. Перерахунок характеристик вентилятора на іншу кутову швидкість здійснюється за допомогою формул 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 формулах приблизно, так як при зміні подачі Q і статичного тиску p одночасно змінюється ККД. Напірна характеристика вентилятора, що працює зі змінною кутовою швидкістю робочого колеса, описується рівнянням квадратичної параболи:

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

де p_ϕ – фіктивне статичний тиск, відповідне нульовій подачі вентилятора, в розрахунках слід приймати для вентиляторів $p_\phi = 2 \cdot p_{ном}$; $p_{ном}$ – номінальне (паспортне) статичний тиск вентилятора; $\omega, \omega_{ном}$ – змінна і номінальна кутові швидкості вентилятора; S – аеродинамічний опір вентилятора.

З виразу видно, що аеродинамічний опір вентилятора при одній і тій же подачі документів не залежить від кутової швидкості. Це означає, що при зміні кутової швидкості напірні характеристики вентилятора залишаються подібними і тільки змінюють своє положення по вертикалі в координатах Q і p на графіку спільної роботи вентилятора (рис. 3.2)[8].

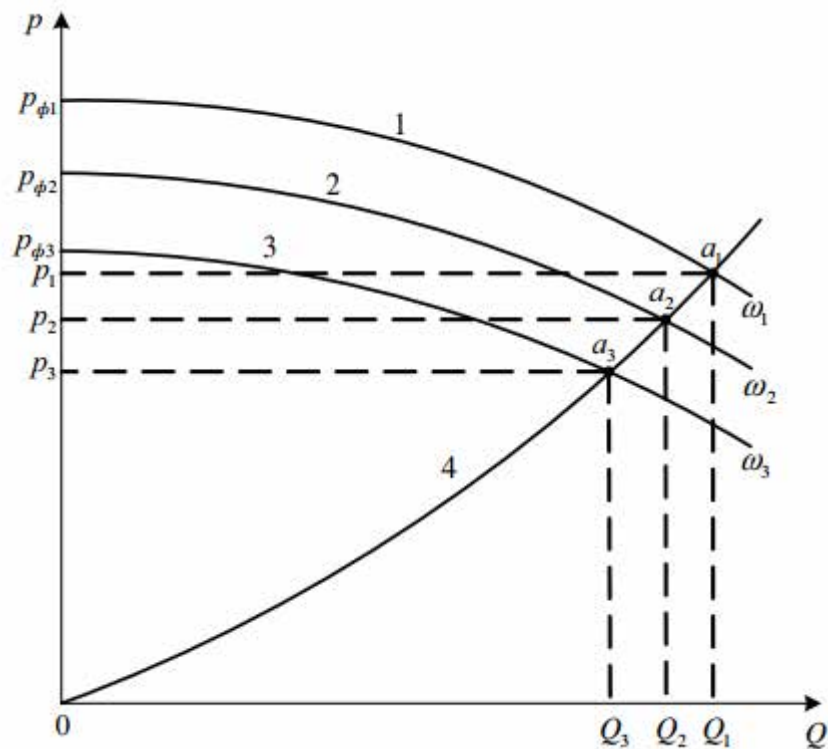


Рис. 3.2 – Напірні характеристики вентилятора зі змінною кутовою швидкістю робочого колеса

Перетин напірних характеристик 1, 2, 3 вентилятора, послідовно змінює свою кутову швидкість $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ з характеристикою повітрорудувки, визначає положення робочих точок a_1, a_2, a_3 . Цим точкам відповідають значення робочих параметрів вентилятора: тиску p_1, p_2, p_3 і подачі Q_1, Q_2, Q_3 . Таким чином, робочі точки характеристики вентилятора при зміні кутової швидкості робочого колеса розташовуються на характеристиці повітрорудувки. На відміну від, характеристик

насосних установок, вентиляційні установки не відчують тиску, обумовленого статичним напором, якщо вентилятор не працює в групі з іншими вентиляторами або на реверс. Тому для одиночного вентилятора відповідно до формулами приведення маємо наступні залежності подачі і статичного тиску від його кутової швидкості[7]:

– для подачі

$$Q = Q_{ном} \cdot \frac{\omega}{\omega_{ном}}; \quad (3.7)$$

– для статичного тиску

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

де $Q_{ном}$ – номінальна (паспортна) подача вентилятора. Найважливішим параметром вентилятора є його ККД. Зміна ККД в залежності від кутової швидкості вентилятора визначається за допомогою формули Муді:

$$\eta_v = 1 - \frac{1 - \eta_{в.ном}}{\left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^{0,36}},$$

де $\eta_{в.ном}$ – номінальний (паспортний) ККД вентилятора. Потужність, споживана вентилятором, визначається виразом:

$$N = \frac{Q \cdot p}{1000 \cdot \eta_v},$$

де Q – секундна подача вентилятора, $м^3 / с$; p – повне статичний тиск, що створюється вентилятором, Па. Дуже важливим параметром вентилятора є його механічна характеристика, тобто залежність моменту статичного опору від кутової швидкості робочого колеса. Від виду механічної характеристики залежать енергетичні показники вентилятора (втрати і ККД). Момент статичного опору будь-якого механізму, в тому числі і вентилятора, визначається виразом

$$M_c = N / \omega, \text{ або}$$

$$M_c = \frac{Q \cdot p}{\omega \cdot \eta_v},$$

Момент статичного опору вентилятора, підставивши попередні вирази, можна визначити відповідно до рівняння:

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

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

Номінальний момент статичного опору вентилятора визначається при номінальних значеннях подачі, тиску і ККД.

Момент тертя M_m згідно досвідченим даними становить близько 5% від номінального моменту статичного опору вентилятора, тобто

$$M_m = 0,05 \cdot M_{в.ном}.$$

Таким чином, механічна характеристика вентилятора являє собою рівняння ділянки квадратичної параболи.

Потужність вентилятора агрегату, що працює в складі регульованого електроприводу визначається виразом[7]:

$$P_v = \frac{N_v}{\eta_{дв} \cdot \eta_{пр}},$$

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

ККД приводного електродвигуна практично не залежить від кутової швидкості двигуна, тому в розрахунках можна приймати номінальний ККД, що приводиться в довідковій літературі. Як перетворювальних пристроїв, для вентиляційних агрегатів, можуть використовуватися перетворювачі частоти або

інвертори, введені мережею, з некерованими випрямлячами в системі АВК. Для цих перетворювальних пристроїв в розрахунках можна застосовувати $\eta_{np} = 0,96$ [7].

3.2.3 Структурна схема вентиляторного агрегату з частотно-регульованим електроприводом

Структурну схему вентиляторного агрегату умовно можна представити у вигляді електромеханічної та механічної частин. До електромеханічної частини відноситься приводний електродвигун, а до механічної – вентилятор.

Частотно-регульований асинхронний електропривод має робочу гілку механічних характеристик в зоні розташування робочих точок (перетин механічних характеристик електроприводу і вентилятора), що володіє практично лінійним характером. Жорсткість механічних характеристик електроприводу при зміні кутової швидкості практично не змінюється. Тому, для дослідження енергетичних властивостей вентиляторного агрегату в статичному режимі, математичний опис частотно-регульованого електроприводу можна лінеаризувати. Отже, асинхронний електродвигун в системі частотного управління можна уявити в спрощеному вигляді, як аперіодична ланка другого порядку. Перетворювач частоти, як з інвертором напруги, так і з інвертором струму має лінійну зовнішню характеристику, тому його можна представити у вигляді аперіодичної ланки першого порядку [11].

Структурну схему вентилятора представляємо у вигляді функціональних блоків, реалізують різного виду залежності по подачі, тиску, потужності і моменту статичного опору.

Структурна схема частотно-регульованого вентиляторного агрегату представлена на рисунку 3.3.

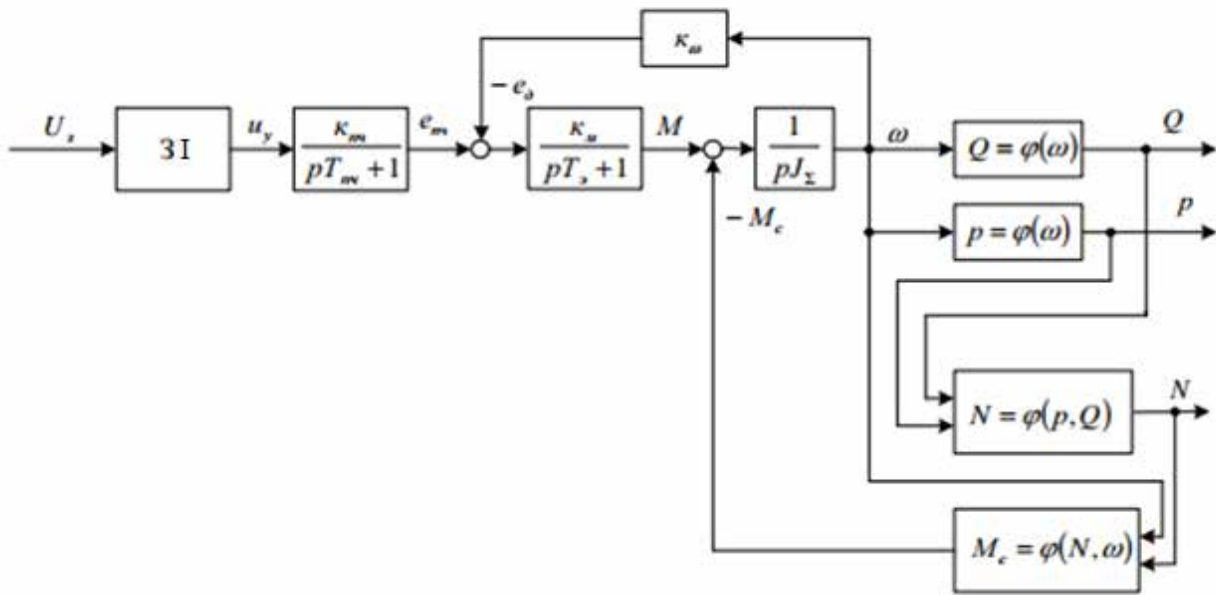


Рис. 3.3 – Структурна схема частотно-регульованого вентиляторного агрегату

Передавальні коефіцієнти і сталі часу структурної схеми електропривода визначаються згідно виразів, наведених нижче. Задатчик інтенсивності ($3I$) на вході системи управління дозволяє задавати прискорення при пуску вентиляторного агрегату [7].

Блоки структурної схеми вентилятора на рисунку 3.3 представляють собою функціональні залежності подачі $Q = \varphi(\omega)$, тиску $p = \varphi(\omega)$, потужності $N = \varphi(Q, p)$ і моменту статичного опору $M_c = \varphi(N, \omega)$ від кутової швидкості вентилятора. Ці залежності є нелінійними і їх аналіз і синтез можливий тільки засобами імітаційного моделювання. Завдання спрощується внаслідок того, що дослідження енергетичних процесів у вентиляторному агрегаті необхідно проводити в сталих (стаціонарних) режимах, які є окремим випадком динамічних процесів. Внаслідок вирішення енергетичної задачі при стаціонарних умовах, блоки структурної схеми виконують функції алгебраїчного обчислювача, результати обчислення якого використовуються для аналізу електромеханічних і енергетичних процесів у вентиляторній установці [6].

3.3 Розрахунок частотно-регульованого електропривода вентилятора місцевого провітрювання

Вентилятор шахтний місцевого провітрювання з електричним приводом ВМЕ-8 осьовий одноступінчатий, вибухобезпечний, призначений для провітрювання тупикових гірничих виробок в шахтах, включаючи небезпечні по газу до пилу. Особливості технології ведення гірничих та шахтних робіт вимагають підтримання режиму роботи вентиляторної установки з циклічністю по чотири години протягом доби. Необхідний тиск отримано на підставі хронометражу протягом місяця і усереднено для однієї доби[8]. Дані хронометражу представлені 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
Павний тиск, Па	1800	1100	2600	2700	2200	1900

Час роботи вентилятора в рік становить 7500 год / рік.

Вентиляторний агрегат оснащений асинхронним вибухозахисним електродвигуном з короткозамкненим ротором типу 2ВРМ200ЛА.

Паспортні дані вентилятора місцевого провітрювання типу ВМЕ-8:

- Номінальна подача $Q_{ном} = 10 \text{ м}^3/\text{с}$;
- Номінальний повний тиск $p_{ном} = 3200 \text{ Па}$;
- Номінальний ККД $\eta_{в.ном} = 0,63 \%$

Паспортні дані електродвигуна типу 2ВРМ200ЛА:

- Номінальна потужність $P_{ном} = 50 \text{ кВт}$;
- Номінальна напруга статора $U_{1ном} = 660 \text{ В}$;
- Номінальна напруга фази $U_{ном.ф} = 380 \text{ В}$;

- Номінальна частота обертання $n_{ном} = 3000$ об/хв ($S_{ном} = 0.017$)
- Номінальний ККД $\eta_{дв.ном} = 91$ %;
- Число пар полюсів $P_n = 1$;
- Номінальний коефіцієнт потужності $\cos \phi = 0.89$;
- Перевантажувальна здатність двигуна $\lambda = M_{max} / M_{ном} = 2.8$;
- Момент інерції ротора $J_{дв} = 0.29$ кг·м²

Для забезпечення режиму роботи вентиляторної установки зі змінним тиском приймається рішення про оснащення вентиляторного агрегату частотно-регульованим електроприводом. Для харчування приводного електродвигуна вентилятора місцевого провітрювання приймається перетворювач частоти типу FR-F820-01540-LD фірми: «Mitsubishi Electric» потужністю 50 кВт.

3.3.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

При розрахунку необхідно звернути особливу увагу на те, що схема заміщення приведена для фази асинхронного двигуна, тому розрахункові значення струмів і напруг є фазними.

Розрахунок

Номінальний струм фази статора

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

Активний опір фази статора

$$r_1 = \frac{U_{ном.ф} \cdot S_{ном}}{I_{1ном}^2} = \frac{380 \cdot 0,017}{54,6^2} = 0,119 \text{ Ом}$$

Номінальна кутова швидкість магнітного поля статора двигуна

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

Номинальна кутова швидкість вала двигуна

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

Номинальний момент двигуна

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

Максимальний момент двигуна

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

Індуктивний опір короткого замикання

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

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

$$\begin{aligned} r_2' &= S_{ном} \cdot \left(\frac{3 \cdot U_{ном}^2}{2 \cdot \omega_{1ном} \cdot M_{max}} - r_1\right) + S_{ном} \cdot \sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{ном}^2}{2 \cdot \omega_{1ном} \cdot M_{max}} - r_1\right)^2 - (r_1^2 + x_{сума}^2)} = \\ &= 0,017 \cdot \left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 314 \cdot 161,9} - 0,119\right) + 0,017 \cdot \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 314 \cdot 453,57} - 0,119\right)^2 - (0,119^2 + 1,358^2)} = \\ &= 0,1337 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Номинальний наведений струм ротора

$$I'_{2ном} = \sqrt{\frac{M_{ном} \cdot \omega_{1ном} \cdot S_{ном}}{3 \cdot r_2'}} = \sqrt{\frac{159,2 \cdot 314 \cdot 0,017}{3 \cdot 0,1337}} = 46,43 \text{ А}$$

Номинальний коефіцієнт потужності роторному ланцюзі

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

$$\text{тоді } \sin \varphi_{2ном} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{2ном}} = \sqrt{1 - 0,996^2} = 0,086$$

Номинальний струм, що намагнічує ланцюга

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

Номинальна ЕРС фази статора відповідно

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

Індуктивний опір намагнічуючої ланцюга

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

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

$$b = \tau_1 \cdot (1 + \tau_2) = 0,044 \cdot (1 + 0,044) = 0,046$$

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

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

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

Графік електромеханічної характеристики, розрахований за наведеною вище формулою в математичній системі MathCAD, наведено на рисунку 3.4.

Оскільки механічні характеристики двигуна розраховані для електромагнітного моменту, то повне навантаження на валу електродвигуна повинна враховувати власний момент тертя двигуна. Момент від сил тертя на валу електродвигуна можна прийняти постійним і рівним.

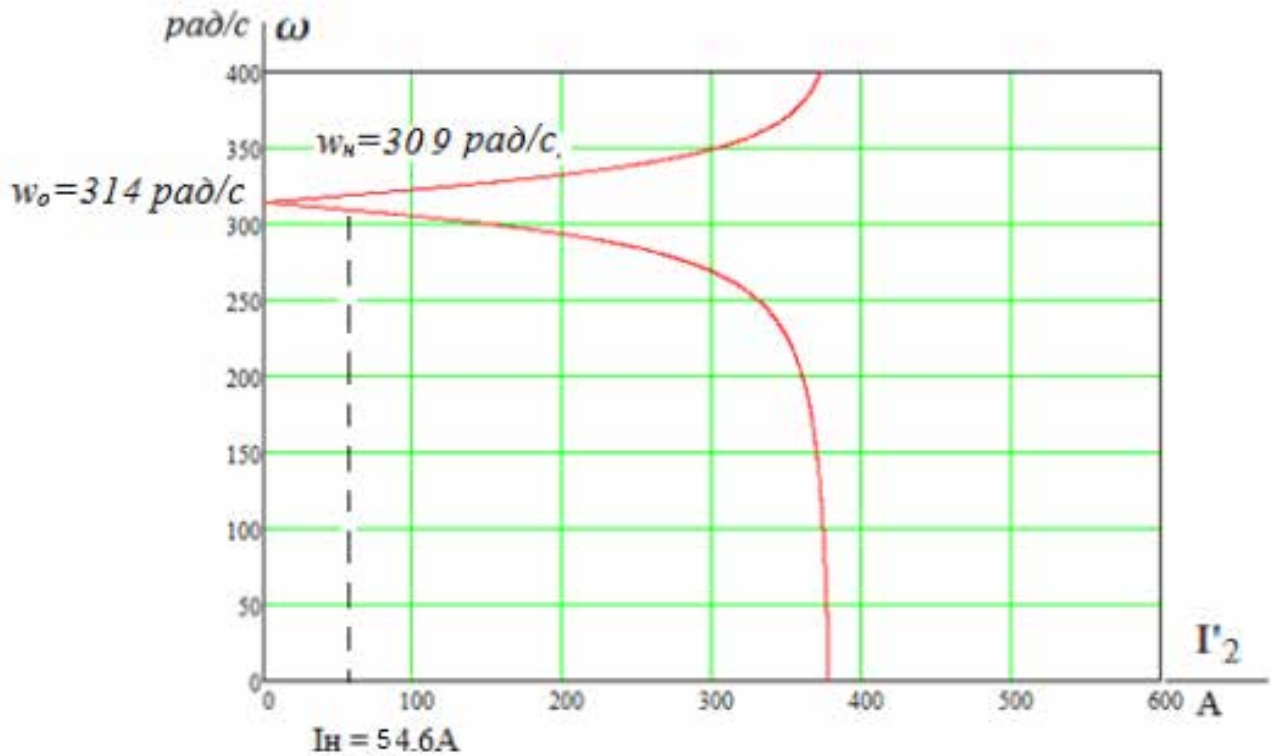


Рис. 3.4 – Графік електромеханічної характеристики

3.3.2 Розрахунок параметрів структурної схеми частотно-регульованого електроприводу

Розраховуються параметри структурної схеми, яка наведена на рис. 3.5.

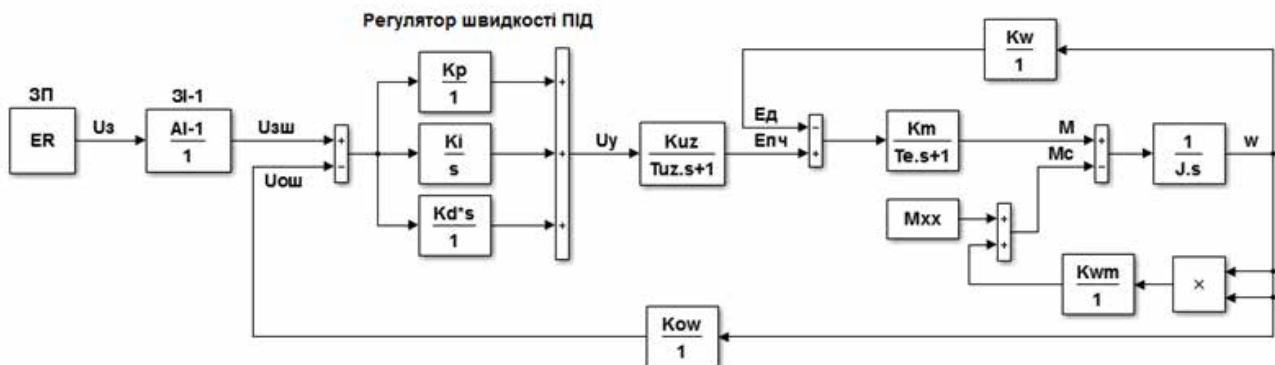


Рис. 3.5 – Структурна схема вентилятора з ЧРП

Розрахунок

Статичний коефіцієнт передачі перетворювача частоти

$$K_{nc} = \frac{E_{nc}}{U_{y,ном}} = \frac{387,26}{10} = 38,73;$$

$$\text{де } E_{nc} = \frac{U_{ном}}{0,985 - 0,00375 \cdot p_n} = \frac{380}{0,985 - 0,00375 \cdot 1} = 387,26 \text{ В};$$

$U_{y.ном} = 10$ В — номінальну напругу управління.

Електромагнітна постійна часу перетворювача може бути прийнята в межах $T_{nc} = (0,003 \div 0,005)$ с. Приймається $T_{nc} = 0,005$ с.

Коефіцієнт внутрішнього зворотного зв'язку за швидкістю

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

Коефіцієнт передачі ланки моменту

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

Момент холостого ходу

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

Визначити необхідні параметри

$$\kappa_{\omega m} = \frac{(M_{ном} - M_{xx})}{\omega_{ном}^2} = \frac{(161,98 - 8,09)}{308,6^2} = 0,0016.$$

$$\kappa_{\omega\omega} = \frac{10}{\omega_{ном}} = \frac{10}{308,6} = 0,032.$$

Індуктивність розсіювання обмоток статора і ротора

$$L_1 = L_2' = \frac{x_1}{314} = \frac{x_2'}{314} = \frac{0,679}{314} = 0,0026 \text{ Гн.}$$

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

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

Еквівалентна індуктивність частотно-регульованого електроприводу

$$L_e = L_{dp} + \frac{3}{2} \cdot \kappa_i^2 \cdot \left(L_s - \frac{L_\mu^2}{L_r} \right) = 0,032 + 1,5 \cdot 2,08^2 \cdot \left(0,05 - \frac{0,049^2}{0,05} \right) = 0,031 \text{ Гн.}$$

де $L_{dp} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ — індуктивність дроселя в ланцюзі постійного струму перетворювача частоти типу FR-F820-01540-LD.

Еквівалентна активний опір частотно-регульованого електроприводу

$$R_e = r_{dp} + \frac{3}{2} \cdot \kappa_i^2 \cdot \left(r_1 + r_2' \cdot \frac{L_\mu^2}{L_r} \right) = 0,0072 + 1,5 \cdot 2,08^2 \cdot \left(0,119 + 0,1337 \cdot \frac{0,049^2}{0,051} \right) = 0,824 \text{ Ом.}$$

де $r_{dp} = 0,0072 \text{ Ом}$ — 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

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

Визначити коефіцієнти

$$\kappa_p = \frac{J_{дв}}{a_\omega \cdot \kappa_{нч} \cdot T_{нч} \cdot \kappa_m \cdot \kappa_\omega} = \frac{0,435}{2 \cdot 38,73 \cdot 0,005 \cdot 24,47 \cdot 1,24} = 0,037;$$

$$\kappa_d = \frac{J_{дв} \cdot T_e}{a_\omega \cdot \kappa_{нч} \cdot T_{нч} \cdot \kappa_m \cdot \kappa_\omega} = \frac{0,435 \cdot 0,037}{2 \cdot 38,73 \cdot 0,005 \cdot 24,47 \cdot 1,24} = 0,0014.$$

3.3.3 Розрахунок статичних характеристик асинхронного частотно-регульованого електроприводу вентилятора агрегату

Розглядається електродвигун типу 2BPM200LA потужністю 50 кВт для вентилятора місцевого провітрювання ВМЕ-8. Вентиляторний агрегат оснащений перетворювачем частоти з автономним інвертором напруги. Для вентиляторного характеру статичного навантаження в розрахунках

використовується закон частотного регулювання $E_1 / f_1^2 = const$.

Розрахунок

Електромеханічні і механічні характеристики частотно-регульованого електроприводу залежать від відносної частоти струму ν і параметра абсолютного ковзання β . Так як вентиляційні установки можуть працювати з подачами вище номінального значення до $Q_{\max} = 1,5 \cdot Q_{\text{ном}}$, то приймаємо верхню межу регулювання частоти 75 Гц, тобто $\nu = 1,5$. По-цьому для розрахунку сімейства статичних характеристик задаємося $\nu = 0,25 \div 1,5$.

Для розрахунку статичних характеристик необхідно задаватися параметром абсолютного ковзання. Розрахунок проводиться для робочої частини механічної характеристики. По-цьому задаємося $\beta = 0 \div \beta_{\text{кр}}$, при цьому необхідно ставити $\beta_{\text{ном}} = S_{\text{ном}} = 0,017$ для контролю номінальних значень струму і напруги статора в процесі обчислення, а також ряд проміжних значень параметра абсолютного ковзання [9].

Параметр критичного абсолютного ковзання.

$$\beta_{\text{кр}} = r'_2 \cdot \sqrt{\frac{d^2 + e^2 \nu^2}{b^2 + c^2 \nu^2}}$$

Задаємося відносною величиною частоти струму ν і обчислені значення параметра критичного абсолютного ковзання $\beta_{\text{кр}}$ наводимо 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
$\beta_{\text{кр}}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0101	0,0101

Виконуємо розрахунки коефіцієнтів

$$A(\nu, \beta) = (b^2 + c^2 \cdot \nu^2) \cdot \beta^2 + 2 \cdot r_1 \cdot r'_2 \cdot \nu \cdot \beta + (d^2 + e^2 \cdot \nu^2) \cdot (r'_2)^2$$

$$C(\beta) = (r'_2 / x_0)^2 + (1 + \tau_2)^2 \cdot \beta^2$$

Задаємося значенням параметра абсолютного ковзання для різних частот струму і обчислені значення коефіцієнтів наводимо 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 розрахунку задаємося такими ж значеннями параметра абсолютного ковзання, як і в таблиці 3.2 використовуючи дані цієї таблиці по величинам $C(\beta)$ і $A(\nu, \beta)$. Перехід 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 виконаних обчислень проводиться по контрольних точках природної характеристики ($\nu = 1,0$):

- номінальному параметру абсолютному ковзанню $\beta_{ном}$ повинні відповідати номінальні значення струму статора $I_{1ном}$ і моменту $M_{ном}$;
- критичного параметру абсолютного ковзання $\beta_{кр}$ повинен відповідати максимальний момент.

Таблиця 3.4 – Розрахункові дані електромеханічних і механічних характеристик

$\nu = 0,25$							
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
$\nu = 0,5$							
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
$\nu = 0,75$							
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
$\nu = 1,0$							
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
$\nu = 1,25$							
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
$\nu = 1,5$							
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

Аналіз даних табл. 3.4 показує, що похибка обчислень становить: струму статора – 5,0%; моменту за номінальним значенням – 9,7%; моменту за максимальною величиною – 0,9%. Для інженерних розрахунків дані показники є задовільними. Похибка обчислень навіть по одному з показників понад 15% свідчить про допущені помилки. Зазвичай помилки виникають при обчисленні

параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна. Типова помилка полягає в тому, що замість фазних величин напруг і струмів використовують їх лінійні значення[5].

Для розрахунку 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 приймаємо в розмірі 5% від номінального моменту вентилятора

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

Розрахунок механічної характеристики вентилятора

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

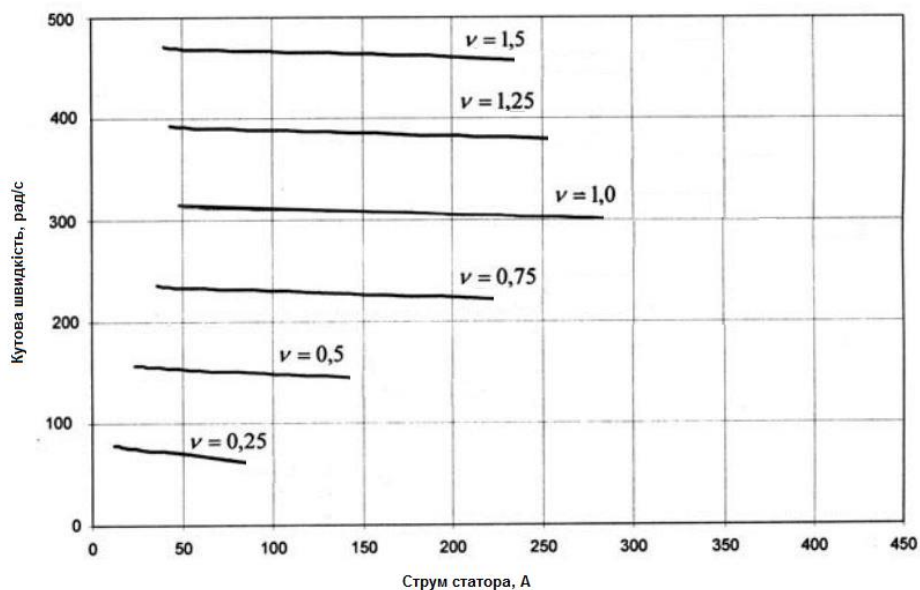


Рис. 3.5 – Електромеханічні характеристики частотно-регульованого електроприводу вентилятора місцевого провітрювання ВМЕ-8

На рисунку 3.5 і 3.6 представлені електромеханічні та механічні характеристики частотно-регульованого електроприводу вентилятора місцевого провітрювання ВМЕ-8 з двигуном 2ВРМ200LА. При розрахунку статичних характеристик електроприводу використаний закон частотного регулювання $E_1 / f_1^2 = const$.

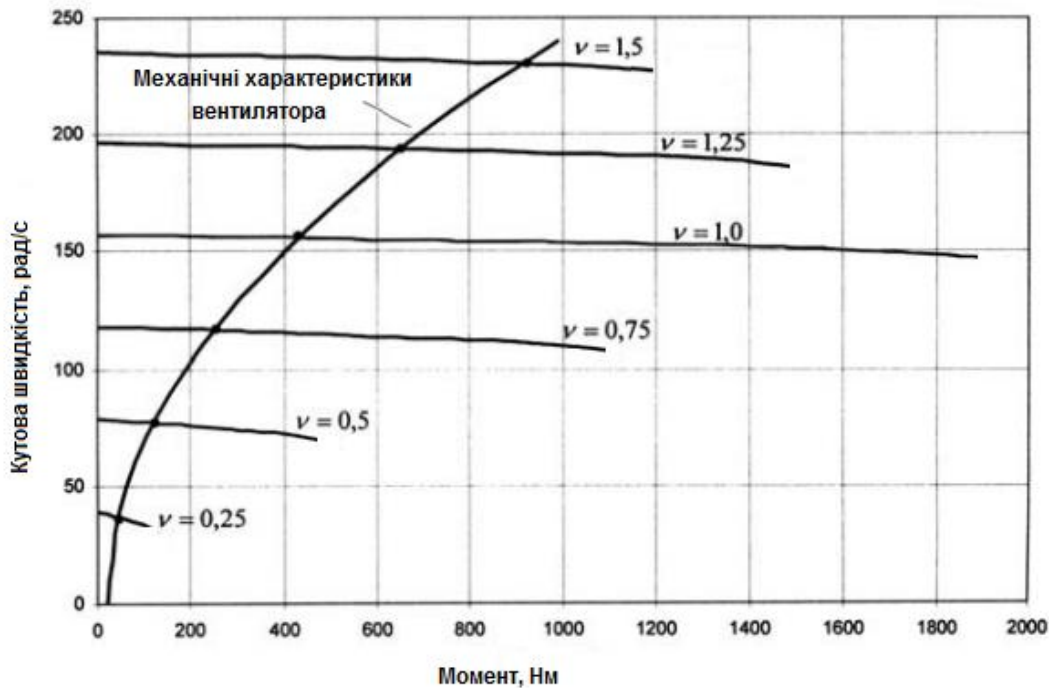


Рис. 3.6 – Механічні характеристики частотно-регульованого електроприводу вентилятора місцевого провітрювання ВМЕ-8

Задаємося кутовий швидкістю вентилятора і обчислюємо момент статичного опору. Розрахункові дані наводяться в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Розрахункові дані 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 графічному поданні механічної характеристики електроприводу спільно з нею подається механічна характеристика механізму, в даному випадку - механічна характеристика вентилятора.

Розрахунок споживання електроенергії вентиляторним агрегатом

Вихідні дані для розрахунку споживання електроенергії визначаються за даними таблиці 3.2 при річній роботі вентилятора = 7500 Тр год / рік.

Розрахунок

Визначається кутова швидкість вентилятора агрегату при необхідному тиску на i -му інтервалі доби

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

Визначається подача вентилятора для створення необхідного тиску на i -му інтервалі доби

$$Q_i = Q_{ном} \cdot \frac{\omega_i}{\omega_{ном}} \cdot M^3 / c .$$

Визначається ККД вентилятора з i -ою кутовою швидкістю

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

Визначається потужність, споживана вентиляторним агрегатом при регулюванні режимів роботи

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

Визначається споживана електроенергія на i -му інтервалі доби

$$W_i = P_i \cdot T_i ,$$

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

Інтервал часу, коли проводиться хронометраж по визначенню необхідного тиску, може бути нерівномірним, на відміну від того, як це представлено в таблиці 3.2. У цьому випадку необхідно використовувати відповідний час T_i на кожному з інтервалів.

Результати розрахунків наводяться в табл. 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
Кутова швидкість, c^{-1}	231,5	181	278,2	283,5	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, кВтчас	105,9	54,1	176,06	185,5	139,7	114,1

Підсумувавши споживану електроенергію по кожному інтервалу часу, отримуємо добове електроспоживання $W_{сут} = 775,4 \text{ кВт час} / \text{сут}$, тоді річне споживання

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

Визначаємо потужність вентиляторного агрегату при нерегульованому варіанті

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

Річне споживання електроенергії при нерегульованому варіанті.

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

Річна економія електроенергії.

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

Річне виробництво повітря вентиляційної установкою:

– при нерегульованому варіанті

$$Q_1 = Q_{ном} \cdot T_p \cdot 3600 = 10 \cdot 7500 \cdot 3600 = 270000 \text{ тис. м}^3 / \text{год}.$$

– 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 $Q_{ср} = \frac{\sum Q_i}{i} = \frac{47,56}{6} = 7,93 \text{ м}^3 / \text{с}$; $\sum Q_i = 98,5 \text{ м}^3 / \text{с}$ — сумарна подача по

кожному інтервалу часу; $i = 6$ - кількість інтервалів часу за добу.

Питомий споживання електроенергії на вироблення повітря вентиляційної 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

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

Отримано механічні та електромеханічні характеристики обраного асинхронного двигуна, побудовані за розрахунковими і каталожними значенням. Для підвищення пускового моменту на малих швидкостях до необхідних значень передбачена можливість настройки вольт-частотної характеристики.

Ефективність впровадження частотно-регульованого електроприводу визначається не тільки економією електроенергії, підвищенням надійності роботи обладнання та зниженням експлуатаційних витрат. Важливою перевагою є можливість оптимізації режимів роботи, підвищення рівня автоматизації, а також зручність і простота впровадження.

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 перевірки можливості застосування частотно-регульованого електроприводу для вентиляційної установки місцевого провітрювання розробимо імітаційну модель в програмі MATLAB-simulink.

На рисунку 4.1 представлена схема моделювання робочого процесу системи з урахуванням вентиляторного навантаження.

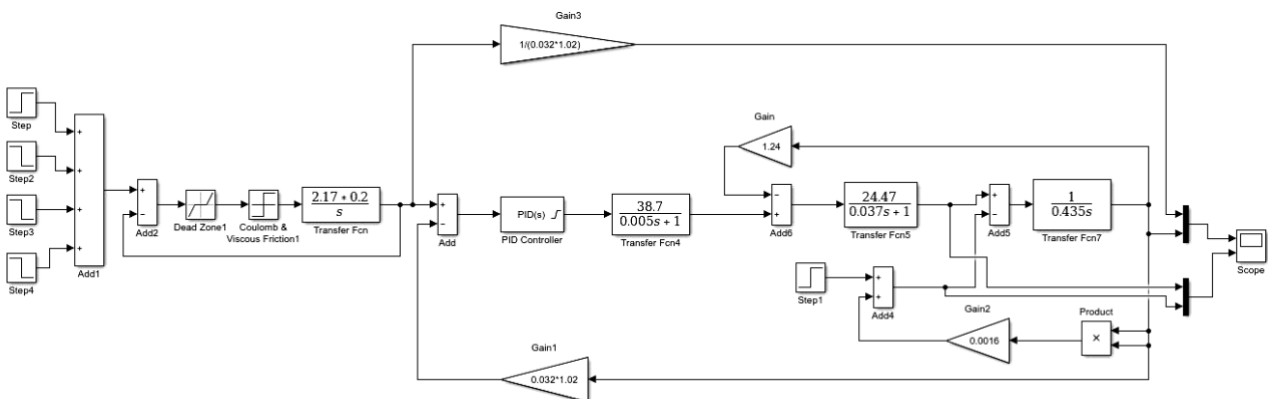


Рис. 4.1 – Модель електроприводу асинхронного двигуна

Результати моделювання процесів пуску, регулювання швидкості та зупинки двигуна представлені на рисунку 4.2. На часовому відрізку помітно час розгону від 0 до 2,1 с. Двигун розганяється до швидкості 303 рад/с.

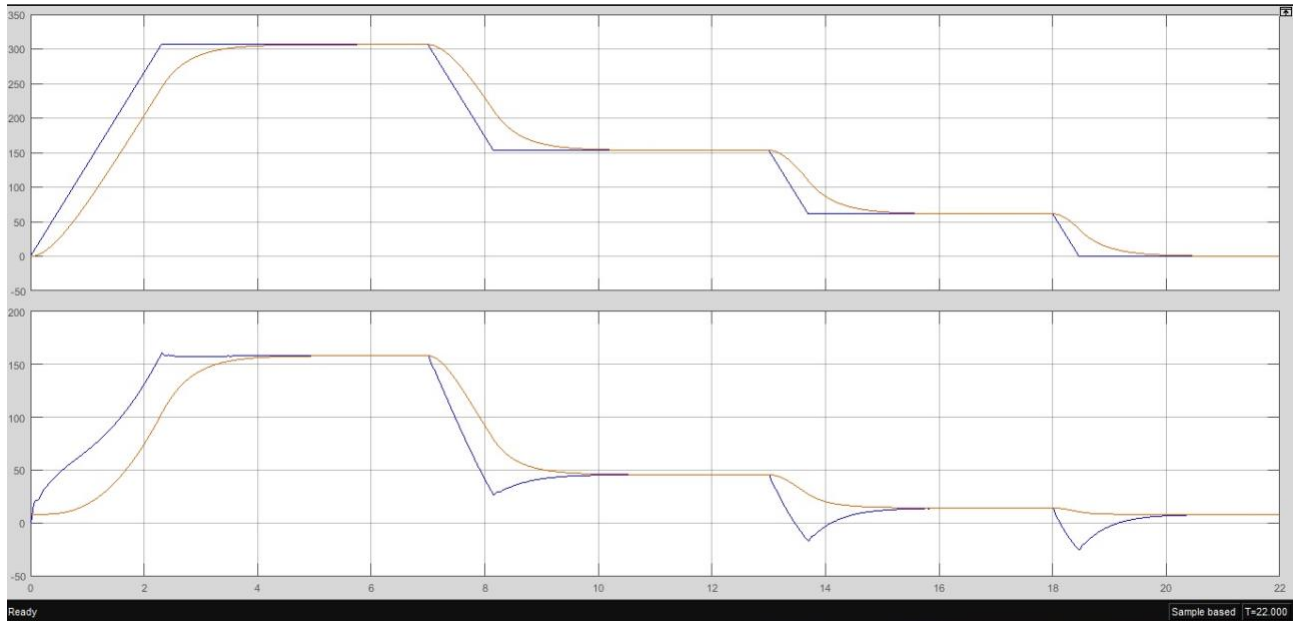


Рис. 4.2 – Діаграма зміни кутової швидкості та моменту вентилятора для системи ПЧ-АД з ПІД-регулятором

4.2 Розробка імітаційної моделі регульованого та нерегульованого електроприводу вентиляційних установок для визначення споживання електроенергії

Необхідність регулювання подачі повітря для вентиляторів місцевого провітрювання визначається наступними особливостями технологічного процесу [7]:

- початок проходки тупикових виробок характеризується малим значенням аеродинамічного опору, тому в цей період часу необхідна невелика подача повітря для провітрювання;
- з подовженням виробки аеродинамічний опір збільшується й потрібна подача повітря в зростаючій кількості;
- окрім збільшення аеродинамічного опору, важливим фактором являється газовиділення із навколишніх порід, для видалення котрого окремі періоди часу може знадобитися значніша кількість повітря, ніж обумовлене аеродинамічним опором;
- ведення прохідницьких робіт буропідривним способом супроводжується виділенням великої кількості продуктів вибухання й пилу, тому для їх швидкого видалення із виробки необхідна короточасна подача підвищеної кількості повітря.

Для розрахунку споживання електроенергії вентиляторного агрегату використані рекомендації, наведені в [7]. Реалізація відповідних положень здійснюється за допомогою синтезованої імітаційної моделі, зображеної на рисунку 4.3.

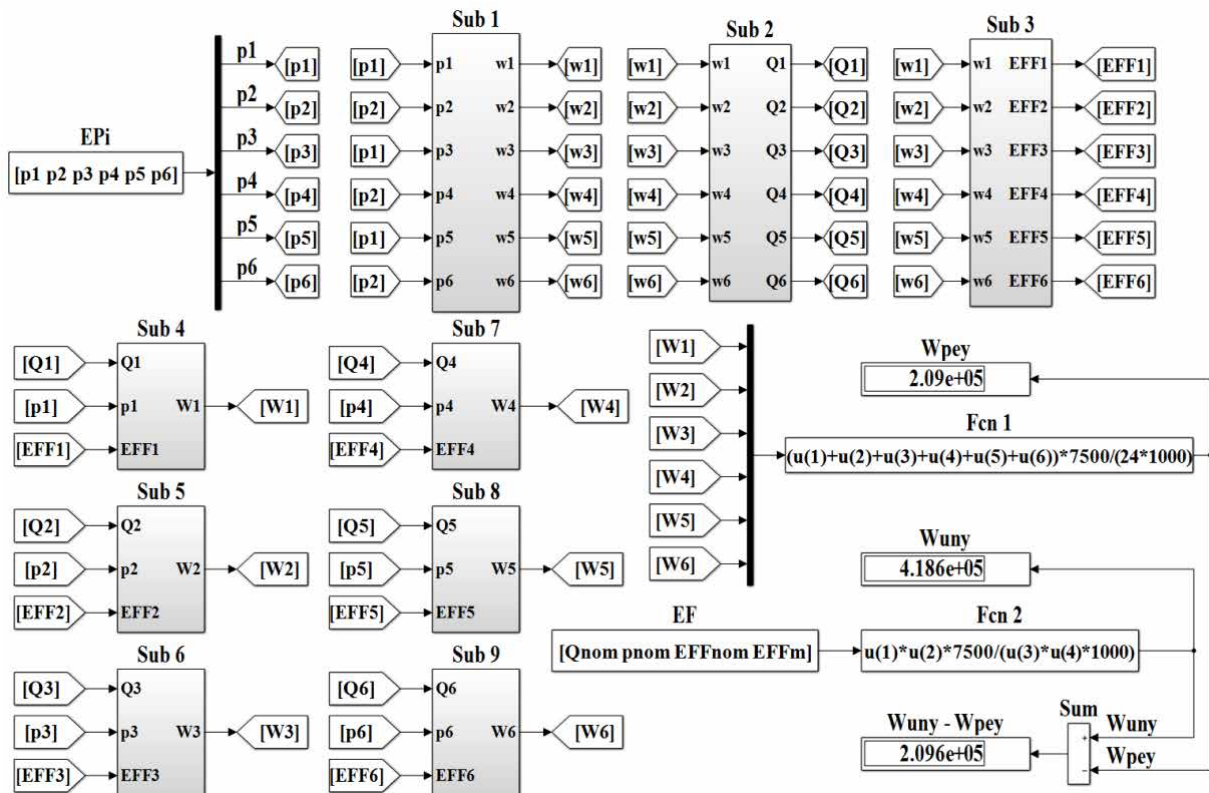


Рис. 4.3 – Імітаційна модель для визначення споживання електроенергії вентиляційної установкою

Оснoву моделі складають підсистеми *Sub1* – *Sub9*. Базовим елементом кожної з них є блок *Fcn* з бібліотеки *User-Defined Functions* пакету *Simulink* системи *MATLAB*. В полі настроювання цього блоку безпосередньо вводиться відповідна формула. Необхідні зв'язки між підсистемами забезпечують блоки *Goto* – куди та *From* – звідки з позначенням відповідних перемінних в піктограмах елементів.

В якості об'єкту дослідження прийнято вентиляторний агрегат місцевого провітрювання ВМЕ-8 з регульованим електроприводом й 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 $\eta_{uz} = 0,95$.

Вихідні дані відносно потрібного тиску вентилятора наведені в табл. 4.1 при часі річної 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) вентиляторного агрегату при необхідному тиску p_i на i -му інтервалі доби (*Sub 1*)

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

Продуктивність вентилятора Q_i (м³ / с) для створення необхідного тиску на i -му інтервалі доби (*Sub 2*)

$$Q_i = Q_{nom} \cdot \frac{\omega_i}{\omega_{nom}} .$$

Коефіцієнт корисної дії вентилятора η_i при роботі з i -ой швидкістю ω_i (*Sub 3*)

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

Споживана вентиляторним агрегатом потужність P_i (Вт) й електроенергія W_i (Вт·год) на i -му інтервалі доби (*Sub 4...9*)

$$W_i = P_i \cdot T_i ,$$

Де P_i можна розрахувати за формулою

$$P_i = \frac{Q_i \cdot p_i}{\eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_{uz}} .$$

Річне споживання електроенергії W_{pey} (кВт·год/рік) з регульованим

електроприводом (*Fcn 1*)

$$W_{pey} = \frac{T_p \cdot \sum W_i}{24 \cdot 1000}.$$

Потужність P_{nom} (Вт) й річне споживання електроенергії W_{uny} (кВт·год/рік) при нерегульованому електроприводі (*Fcn 2*)

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

$$W_{uny} = P_{nom} \cdot T_p / 1000.$$

Річна економія електроенергії ΔW (кВт·год/рік) вентиляторним агрегатом місцевого провітрювання (*Sum*)

$$\Delta W = W_{uny} - W_{pey}.$$

Блок *EPi* задає значення тиску вентилятора $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ протягом доби згідно табл. 4.1, а блок *EF* задає номінальні параметри вентиляторного агрегату $Q_{nom}, p_{nom}, \eta_{nom}, \eta_m$.

Результати моделювання зведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Споживання електроенергії вентиляторним агрегатом

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

Слід зазначити, що аналогічний підхід може бути застосовано і для визначення річного вироблення повітря вентиляційною установкою з нерегульованим та регульованим електроприводом. Це дасть можливість розрахувати питоме споживання електроенергії вентилятором з нерегульованим та регульованим електроприводом, як відношення річного споживання

електроенергії до річного виробітку повітря, з подальшим порівнянням отриманих результатів.

Вироблено моделювання робочого процесу вентилятора при регулюванні швидкості двигуна в програмному середовищі MatLab Simulink. Був реалізований задатчик інтенсивності. З використанням імітаційної моделі побудовані динамічні характеристики.

Доведена можливість суттєвої економії споживаної електроенергії вентиляторними установками при застосуванні частотно-регульованого електроприводу замість нерегульованого.

ВИСНОВОК

Отримано механічні та електромеханічні характеристики обраного асинхронного двигуна, побудовані за розрахунковими і каталожними значенням.

Також вироблено моделювання робочого процесу вентилятора в програмному середовищі MatLab Simulink. Побудовані динамічні характеристики.

У результаті застосування ПЧ значно знижуються експлуатаційні витрати. При зміні частоти обертання, продуктивність вентилятора також зміниться, створюваний тиск зміниться в два рази, а споживана потужність в три рази. ККД вентилятора залишається незмінним. Даний спосіб регулювання є найбільш економічно вигідним.

Ефективність впровадження частотно-регульованого електроприводу визначається не тільки економією електроенергії, підвищенням надійності роботи обладнання та зниженням експлуатаційних витрат. Важливою перевагою є можливість оптимізації режимів роботи, підвищення рівня автоматизації, а також зручність і простота впровадження.

Застосування регульованого електроприводу вентиляторного агрегату замість нерегульованого дає економію споживаної електроенергії до 50%. При цьому, цей показник тим більше, чим більше час роботи вентилятора із необхідною зменшеною швидкістю протягом доби.

Розроблена імітаційна модель для дослідження процесів споживання електричної енергії вентиляторного агрегату місцевого провітрювання є універсальною для вентиляторних установок різного призначення. Фактично треба знати потрібний тиск вентилятора протягом доби й ввести номінальні значення параметрів стосовно продуктивності, тиску, кутової швидкості, коефіцієнтів корисної дії вентилятора, двигуна та силового перетворювача.

Отримані залежності дозволили сформулювати екстремальний закон частотного управління, застосування якого дає зниження втрат енергії на 5-10% в порівнянні з традиційним законом скалярного управління приводу з

вентиляторним навантаженням.

За допомогою комп'ютерного моделювання показано, що додатковий енергозберігаючий ефект дає застосування спеціальних законів пуску двигуна, які дозволяють мінімізувати втрати енергії в приводі під час пуску і підвищити коефіцієнт потужності за рахунок зниження споживаної реактивної потужності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Высш. проф. образование.— Москва: Изд-во «Академия», 2004. – 56 с.
2. Ивановский И.Г. Шахтные вентиляторы: Учеб. пособие.— Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003. С. 6 <http://bergmaster.narod.ru/edu-lit-common/vent.pdf>
3. Порцевский А.К. Вентиляция шахт. Аэрология карьеров. – М.,2004. С. 9-19 <http://www.geoprotection.narod.ru/genesis/aero-1.pdf>
4. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод энерго- и ресурсосбережение: Высш. проф. образование.— Москва: Изд-во «Академия», 2008. – 200 с.
5. Гликман А.Г. Почему взрываются шахты? (интервью Всероссийскому отраслевому журналу «СТРОИТЕЛЬСТВО», апрель 2007) // http://www.newgeophys.spb.ru/ru/article/mines_blasts/
6. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходушных установках [Текст] / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
7. Фащиленко, В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: Учеб. пособие [Текст] / В.Н. Фащиленко. – М.: Издательство «Горная книга», 2011. – 260 с.
8. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А. В. Шинянского. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 616 с.
9. Голинько В.И., Лебедев Я.Я., Муха О.А. Вентиляция шахт и рудников. — .:учебное пособие для студентов высших учебных заведений Украины, 2014. – 70-71 с.
10. Чермалих А.В. Исследование динамики и энергетических характеристик вентиляторных установок с регулируемым электроприводом/ А.В. Чермалих, В.Н.Пермяков, И.Я. Майданський/ Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – Вип.27. – 160с.

11. Пак В. В. , Иванов С. К. , Верещагин В. П. Шахтные вентиляционные установки местного проветривания. – М.: Недра, 1974. – 240 с.
12. Автоматизация технологических процессов подземных горных работ. Пособие/А. В. Бубликов, М. В. Козарь, С. М. Проценко та ін., під заг. ред. В. В. Ткачова – .: Національний гірничий університет, 2012. – 304 с.
13. Браславский И. Я., Зубрицкий О. Б., Ольков А. Е. Энергетика регулировочных режимов асинхронного электропривода при потенциальном моменте нагрузки // Изв. вузов. Электромеханика. — 1975. — № 1. — С. 82—85.
14. Онищенко Г. Б., Юньков М. Г. Электропривод турбомеханизмов. — М.: Энергия, 1972. — 240 с.
15. Шевчук Н. А. Розробка та впровадження стартап проекту на прикладі геосинтетичного модуля-опалубки / Шевчук Н. А., Вапнічна В. В. // Сучасні проблеми економіки і підприємництва [Текст]: Збірник наукових праць. – Вип. 23. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2019 С.32-40.
16. Стартап-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.