

Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ ” _____ 2022р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **за другим (магістерським) рівнем вищої** **освіти**

на тему

**“ Дослідження ефективності використання частотно-керованих
електроприводів у вентиляційних установках**

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-21М3
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____Віталій ЛІЩЕНКО

« ____ » _____ 2022р.

Керівник роботи

к.т.н., доцент

_____Іван Савеленко

« ____ » _____ 2022 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет центр заочної та дистанційної освіти

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«_____» _____ 2022 р.

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

Ліщенко Віталія Петровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження ефективності використання частотно-керуваних електроприводів у вентиляційних установках

Study of the effectiveness of using frequency-controlled electric drives in ventilation installations

2. Керівник роботи (проекту) Савеленко Іван Володимирович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 05.12.2022 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

Теоретичне дослідження розвитку силових елементів регульованого електроприводу; Дослідження ефективності використання частотно-керуваних електроприводів; Імітаційне моделювання частотно-регульованого асинхронного електропривода вентиляторної установки; Розробка комп'ютерної моделі частотнорегульованого асинхронного електроприводу вентилятора.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Економічна частина</i>	<i>к.е.н., доц. Журило І.В.</i>		
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ..</i>	<i>4.10.22</i>	
2	<i>Теоретичне дослідження розвитку силових елементів регульованого електроприводу;</i>	<i>11.10.22</i>	
3	<i>Дослідження ефективності використання частотно-керованих електроприводів;</i>	<i>14.10.22</i>	
4	<i>Імітаційне моделювання частотно-регульованого асинхронного електропривода вентиляторної установки;</i>	<i>22.10.22</i>	
5	<i>Розробка комп'ютерної моделі частотнорегульованого асинхронного електроприводу вентилятора</i>	<i>28.10.22</i>	
6	<i>Охорона праці</i>	<i>5.11.22</i>	
7	<i>Економіка</i>	<i>15.11.22</i>	
8	<i>Висновки</i>	<i>22.11.22</i>	
9	<i>Оформлення пояснювальної записки та презентації магістерської роботи</i>	<i>25.11.22</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2022 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2022 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Ліщенко В.П. Дослідження ефективності використання частотно-керованих електроприводів у вентиляційних установках

Study of the effectiveness of using frequency-controlled electric drives in ventilation installations.

Спеціальність 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». - Центральноукраїнський національний технічний університет. - м. Кропивницький, 2022 р.

Метою кваліфікаційної роботи є пошук шляхів енергозаощадження в асинхронних електроприводах вентиляційних систем за рахунок використання частотного керування асинхронним двигуном. Проведено аналіз сучасного стану теорії і практики використання керованого приводу і методів керування АЕП вентиляційних систем з метою визначення шляхів вдосконалення системи керування дозволить обґрунтувати критерії використання частотного керування в поєднанні з динамічними і статичними режимами роботи керованого приводу і характерними особливостями вентиляційних систем.

Аналіз результатів моделювання динамічних режимів асинхронного двигуна дозволив підтвердити економічну ефективність практичного впровадження отриманих результатів в керованому приводі вентиляційних установок.

ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦІЇ ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ, ШИРОТНОІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ.

ABSTRACT

Lyshcenko V. Study of the effectiveness of using frequency-controlled electric drives in ventilation installations.

.Дослідження ефективності використання частотно-керованих електроприводів у вентиляційних установках

Specialty 141 - "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". - EPP " Electrical systems of power consumption ". - Central Ukrainian National Technical University. - Kropyvnytskyi, 2022

The purpose of the qualification work is to find ways to save energy in asynchronous electric drives of ventilation systems due to the use of frequency control of an asynchronous motor. An analysis of the current state of the theory and practice of the use of a controlled drive and methods of controlling AEP ventilation systems was carried out in order to determine ways to improve the control system, which will allow to justify the criteria for using frequency control in combination with dynamic and static modes of operation of the controlled drive and characteristic features of ventilation systems.

The analysis of the simulation results of the dynamic modes of the asynchronous motor made it possible to confirm the economic efficiency of the practical implementation of the obtained results in the controlled drive of ventilation units.

VECTOR CONTROL, ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE,
VENTILATION SYSTEM PARAMETER IDENTIFICATION, PULSE
WIDTH MODULATION

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	12
ВСТУП.....	13
1. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗВИТКУ СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	13
1.1. Аналіз тиристорних структур силової електроніки.	17
1.2. Аналіз транзисторних структур силової електроніки.....	20
1.3. Задачі підвищення енергоефективності в регульованому електроприводі	22
Висновки до розділу 1	24
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНО- КЕРОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ	25
2.1. Аналіз шляхів економії електроенергії в електроприводах	25
2.2. Основні принципи роботи частотного керування електроприводом.	32
2.3. Економічна ефективність впровадження пристрою частотного керування	35
Висновки до розділу 2	39
3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРНОЇ УСТАНОВКИ	40
3.1. Загальна структурна схема системи автоматичного керування рівнем тиску вентиляторної установки на основі частотнорегульованого асинхронного електропривода	40
3.2. Комп'ютерна імітаційна модель вентилятора.....	42
3.3 Комп'ютерна імітаційна модель виконавчого пристрою	46
3.4 Синтез системи автоматичного регулювання подачі вентилятора	49

Висновки до розділу 3	52
4. РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВЕНТИЛЯТОРА.....	53
4.4. Комп'ютерні імітаційні моделі регульованого асинхронного електроприводу вентилятора.....	53
4.2. Результати моделювання режимів роботи скалярного частотнорегульованого електроприводу вентилятора.....	54
Висновки до розділу 4	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	61
ДОДАТКИ.....	63
ДОДАТОК А. Охорона праці. Розрахунок заземлення.....	64
ДОДАТОК Б. Порівняльний аналіз ефективності заходів з енергозбереження.....	68
ДОДАТОК В. Найпоширеніші марки перетворювачів частоти.....	86

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун

ОК – об'єкт керування

ПІ – пропорційно-інтегральний регулятор

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

ПТЕЕС – правила технічної експлуатації електроустановок споживачів

ЧРП – частотно-регульований привод

GTO – Gate Turn Off

GCT – Gate Commutated Thyristor

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor

IGCT – Integrated Gate Commutated Thyristor

MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. В сучасних електроприводах витрачається близько 60% всієї електроенергії промислових об'єктів, тому проблема енергозбереження в електроприводі є актуальною. Тому дослідження ефективності використання асинхронних двигунів в промисловості є досить важливим.

На сьогоднішній день для регулювання частоти обертання асинхронних двигунів в застосовуються системи «перетворювач частоти - асинхронний електродвигун» (ПЧ - АД).

Силові напівпровідникові пристрої, які складають основу частотного перетворювача, стають дешевшими та досконалішими, що в свою чергу сприяє їх широкому розповсюдженню. Очікується, що застосування системи ПЧ - АД дасть економію електроенергії в межах 10 – 70 % в залежності від типу навантаження та умов застосування.

За термін експлуатації двигун споживає електроенергію вартість якої в сотні разів більша, ніж вартість двигуна, тому енергетична складова має значно більший вплив ніж першорядні капітальні витрати, тому оптимізація режимів роботи електроприводів актуальною на даний час.

Важливим аспектом керування асинхронним двигуном є можливість регулювання напругою живлення, що дозволяє отримати значну економію при роботі двигунів у недовантаженому режимі. Тому для використання частотного перетворювача обов'язково необхідно мати розуміння для адекватної оцінки характеристик системи «частотний перетворювач - АД». Сучасні методики дозволяють дослідити рівняння двох систем з різними характеристиками. Частотний привод дозволяє зекономити не тільки електроенергію, а натуральні ресурси за рахунок зниження непродуктивних втрат.

При регулюванні частоти обертання АД застосовують векторне і скалярне керування. В приводах насосів використовують перетворювачі частоти (ПЧ), як правило, зі скалярним керуванням через меншу вартість, відносно ПЧ із векторним керуванням (ВК).

Застосування ПЧ з ВК дозволяє відмовитись від встановлення передаточних редукторів і отримати якісніше режимом роботи. У порівнянні зі скалярним, можна отримати більшу точність керування, що приведе до підвищення ефективності використання електроприводів.

Векторне керування дозволяє оцінювати швидкість та потокозчеплення без контактних датчиків. Використання керованого асинхронного електропривода (АЕП) на базі ВК в системах вентиляції підвищить ефективність енергозаощадження та експлуатаційні показники

В [23] висвітлені аспекти роботи регульованих асинхронних електроприводів при роботі у вентиляційних установках. На підприємствах типовим прикладом таких пристроїв є відцентрові вентилятори, механічна характеристика має вид рівняння квадратичної параболи. Незначне зниження швидкості електропривода дозволяє оптимізувати споживання електричної потужності. Економія електроенергії є метою використання керованого електропривода з вентиляторами. Для вибору перетворювача частоти аналізується характер навантаження, механічна характеристика двигуна.

Якщо розглянути роботу електроприводу в межах витрат, що менші за номінальні, то для цих режимів раціонально працювати на зниженій частоті обертання. У цьому випадку ККД вентилятора вищий, ніж при роботі на номінальній частоті обертання. Таким чином, зниження частоти обертання ротору АД, відповідно до технологічного навантаження, дозволяє заощадити споживання електроенергії та одержати економічний ефект за рахунок підвищення коефіцієнта корисної дії самого вентилятора.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є дослідження енергетичних характеристик частотного керування в електроприводах вентиляційних систем для підвищення їх енергоефективності. Проведено аналіз сучасного стану теорії і практики використання керованого приводу і методів керування АЕП вентиляційних систем з метою визначення шляхів вдосконалення системи керування дозволить обґрунтувати критерії використання частотного керування в поєднанні з динамічними і статичними режимами роботи керованого приводу і характерними особливостями вентиляційних систем.

Об'єкт дослідження – статичні та динамічні процеси в асинхронному електроприводі з векторним керуванням вентиляційної установки.

Предмет дослідження – статичні та динамічні характеристики систем векторного керування асинхронним електроприводом для підвищення ефективності вентиляційних систем

Практичне значення одержаних результатів. Аналіз результатів моделювання динамічних режимів асинхронного двигуна дозволив підтвердити економічну ефективність практичного впровадження отриманих результатів для керованих приводів вентиляційних установок.

Структура та обсяг дослідження. Робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний обсяг роботи – 62 сторінка, робота містить 4 таблиць, 49 рисунків, 1 додатки, 20 джерело інформації.

1. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗВИТКУ СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Вибір основного ключового елемента в електроприводі грає життєво важливу роль виконанні трансформації будь-якого типу. Перетворення в електроенергетиці завжди наближені до ідеальному вигляду, що забезпечують сприяють наступні характеристики:

- значна величина струму;
- якість напруга в мережі;
- швидкі перемикавання;
- невеликі витрати;
- висока частота перемикавання;
- краща надійність;
- компактність.

Ці підходи у розробці силових елементів реалізуються декількома шляхами: використанням схем з транзисторами та використання схем з тиристорами, що характеризуються перевагами схем на базі тиристора меншими статичні витрати, а на базі транзистору – якість комутаційних перемикань.

Протягом багатьох років силовий потрійний тиристор на основі класичної чотиришарової конструкції р-п був з єдиним напівпровідниковим пристосуванням для в елементах силової електроніки. Незмінність функціональних можливостей силової електроніки призвела до того, що довго залишалися без змін і основні схемні рішення їх основи.

Ситуація в силовій електроніці змінилася в кінці 80-х років минулого століття через розробку та запровадженням силових тиристорів, які мають замикаючий ключ. Через значну ступінь нагріву, використовувалися великі блоки для розподілу нагріву та систем передачі енергії на нагрівальний електрод тиристорів.

В кінці минулого тисячоліття з'явилися біполярні транзистори з ізолюваним затвором (IGBT). Маючи гірші статичні характеристики, вони принципово перевершували існуючі GTO за динамічними характеристиками.

Крім того, IGBT характеризуються незначними струмами при включенні і виключенні, це спрощує їх систему управління.

На сьогоднішній день транзистори IGBT випускаються елементами з одностороннім або двостороннім охолодженням.

Розроблення нових пристроїв, що скористаються перевагами в роботі тиристорів та можливостями транзисторів у вимкненому стані є актуальною задачею сьогодення.

1.1. Аналіз тиристорних структур силовій електроніки.

Використання тиристорів переважає кількістю використання у різноманітних приладах, через можливість оперувати значними робочими струмами, за безпечуючи при цьому низький рівень втрат. Останнім часом широко використовуються прилади, що комбінують характеристики тиристорів і транзисторів з високою надійністю.

Тиристори з комутованим електродом керування мають інтегрований блок керування.

В тиристорах типу GCT основою яких є GTO структура через низьку індуктивність в колі керування, при вимиканні характеризуються властивостями біполярних транзисторів.

В приладах типу GCT реалізовані симетрична компактна конструкція з двостороннім тепловідвід, використовуються низькоенергоємні кола блоків керування, висока завадостійкість; незначні втратах в роботі ключа.

У порівнянні з тиристорами GTO, в GCT значно зменшено час комутації та комутаційні втрати. В тиристорах GCT можуть не використовувати

ємність для захисту від паразитних імпульсів при комутаціях.

Недоліком тиристора типу GTO є його значні втрати енергії при його комутації, які залежать від їх робочої частоти. Частота комутацій на практиці рідко перевищує 250-300 Гц.

Логічним розвитком GTO стали GCT. Процеси перемикань, провідності та блокування сигналу в GTO тотожні робочим фазам тиристорів GCT тиристор, що мають має дві особливості:

- струм керування практично не відрізняється від анодного струму на відміну від GTO в яких струм керування значно менше за анодний;
- швидкість зростання струму керування значно більша ніж в GTO зі значеннями 30-40 А/мкс.

Яскравим розвитком концепції тиристорів є створення тиристорів з інтегрованим блоком керування (IGCT), недоліком яких у порівнянні з GTO є значно менша потужність керування. В тиристорах IGCT реалізована можливість послідовної інтеграції різнотипних моделей тиристорів, що дозволить отримати новий тип високовольтних керованих тиристорних вентилів.

Забезпечення паралельного й послідовного об'єднання IGCT дозволяє використати їх в установках з потужністю до сотень МВА.

На ринку силової електроніки широко представлена напівпровідникових приладів, що мають досконалу конструкцію та розраховані на значні робочі струми. Широкий асортимент різноманітних варіантів силових ключів сприяють розвитку та широкому впровадженню в перетворювачах. Від правильного вибору основного силового приладу, що обумовлює його конструктивні та функціональні переваги перед аналогами з менш вдалою реалізацією.

Технічні параметри потужних напівпровідникових силових приладів різних типів наведено в табл. 1.1

Таблиця 1.1. Технічні параметри напівпровідникових силових приладів

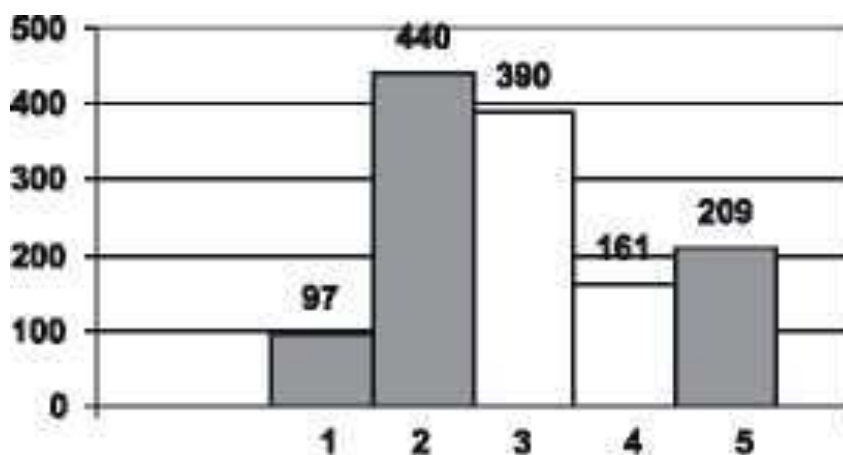
Тип тиристору	I, A	U _{drm} , B	U _{rrm} , B	ΔU , B
SCR	3350	4400	4200	2,54
GTO	3000	6000	17	3,35
IGC	4000	6000	19	2,65
IGT	4000	4500	19	2,65
IGBT	1200	3300	20	4,5

Порівняльний аналіз технічних характеристик електронних ключів наведених в таблиці 1.1. наведено в таблиці 1.2.

Таблиця № 1.2. Порівняльний аналіз технічних характеристик електронних ключів

Тип тиристору	Переваги	Недоліки
SCR	Некерований. Незначні втрати в роботі. Гарна перевантажувальна здатність. Висока надійність.	Неперемикається. Працює на невисоких робочих частотах.
GTO	Керований. Значна перевантажна спроможність.	Високі втрати при роботі.
IGC	Керований. Низькі втрати на перемикання. Вбудований блок керування. Можливість послідовної комбінації.	Високі втрати при роботі.
IGBT	Керований. Можливість паралельно-послідовної комбінації.	Дуже високі втрати при роботі.

Структура приладів силової електроніки на світовому ринку зображена на рис. 1.1.



1 - біполярні елементи; 2 - IGBT; 3 - тиристори; 4 - GTO; 5 - діоди

Рис. 1.1. Структура приладів силової електроніки на світовому ринку

Значну частку ринку складають силові польові транзистори з ізольованим затвором. Малий час перемикання та незначні втрати на керування обумовили їх широке розповсюдження серед низьковольтних пристроїв (нижче 200 В). Використання сучасних технології в мікроелектроніці дозволили знизити питомий опір до декільком мОм в транзисторах з відкритим ключем.

1.2. Аналіз транзисторних структур силової електроніки

В електроприводах середньої потужності від 25 кВт і вище в силовій електроніці використовують дискретні IGBT.

Не зважаючи на високу вартість силових блоків на основі IGBT, їх продаж перевищив продажі тиристорів.

IGBT забезпечують комутацію струмів до 200 А при напрузі до 4,5 кВ з малим часом перемикання, що лежить у діапазоні 200 — 400 нс.

Можливість роботи IGBT без застосування снабберних кіл, а також зменшення розмірів блоків керування, враховуючи можливість послідовного об'єднання розширяє їх можливості використання у високовольтних перетворювачах.

Тиристори мають переваги в порівнянні з транзисторами в блоках силової електроніки через здатність блокувати напругу понад 2,5 кВ, у результаті напруги при перемиканнях має оптимальне співвідношення.

Порівняльні характеристики IGBT та IGCT у високовольтних інверторах наведені на рис. 1.2.

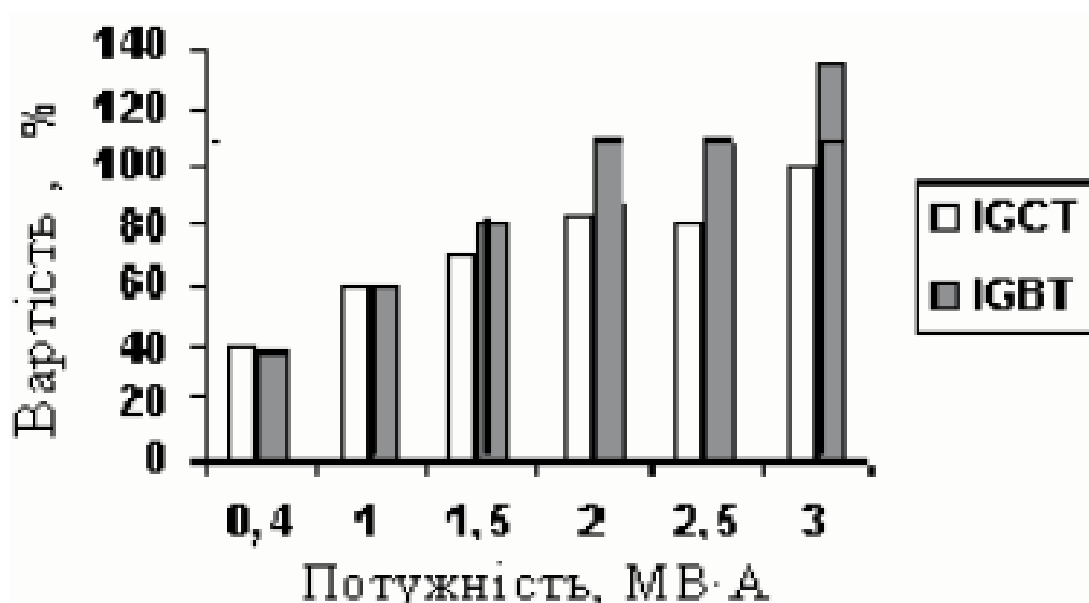


Рис. 1.2. Порівняльні характеристики високовольтних інверторів IGBT та IGCT

Інвертори з IGCT поєднують комбінацію технологій тиристорів з низькими втратами і високоефективної технології вимикання. Інвертор на базі IGBT призначені для застосування в блоках силової електроніки середньої і високої напруги.

Поява новітніх силових інтегральних схем перемінило і характер виробництва перетворювального обладнання, забезпечивши значне зниження частини ручної праці. За рахунок автоматизації виробництва

перетворювального устаткування підвищується якість виготовлення. Проведення діагностики підвищує надійність експлуатації обладнання, через зменшення монтажних контактів. Функціональні можливості силових інтегральних схем прямим доступом до мікроконтролеру.

Використання гібридних схем полегшує виготовлення інверторів на всі напруги промислових і побутових мереж.

На сьогоднішній день елементи силової електроніки на базі IGBT змають ряд переваг для потужностей від одиниць кіловат до одиниць мегават. Розвиток IGBT пов'язаний з технічними вимогами ринку і направлений на:

- розширення діапазонів комутуючих струмів;
- підвищення стійкості аварійних режимів;
- стабілізації від прямого падіння напруги;
- розробка нових структур з високою щільністю струмів;
- розвиток IGBT з функціями діагностики і захисту;
- створення нових конструкційних матеріалів та конструкцій.

1.3. Задачі підвищення енергоефективності в регульованому електроприводі

Розробка високоякісної силової напівпровідникової техніки на основі транзисторів IGBT і тиристорів IGCT вирішує задачі підвищення енергоефективності керованого електроприводу. Повністю керована техніка задовільняє питанням якості споживаної енергії.

У системах фазового керування напругою легко регулювати за значних коефіцієнтів потужності і коефіцієнту спотворення напруги.

Застосування техніки на базі транзисторів IGBT дає істотне зниження витрат в електротехнічному обладнанні. Використання регульованого електропривода з некерованим випрямлячем дозволяє

знизити розрахункову потужність узгоджувального трансформатора за тахограмою робочого механізму.

Застосування елементів на базі IGBT, в електроприводах постійного струму дозволить знизити вихідну напругу, що зворотно-пропорційна $\cos$ мінімального значення кута випередження.

Застосування на базі IGBT дозволить використати сучасні технічні рішення в блоків системах електропривода. Стало реальним створення електромеханічних систем із синхронними двигунами на постійних магнітах, що підвищує перевантажувальну спроможність вентильних двигунів і зменшує складнощі у пусковому режимі.

Відкриваються також широкі можливості створення масового частотно-регульованого привода з асинхронними короткозамкненими двигунами. Силова техніка, що зазирається, дозволила створити системи електропривода змінного струму, що за своїми характеристиками, включаючи динамічні, істотно перевищують показники приводів постійного струму.

Висновки до розділу 1

Використання комбінованих схем інверторів на базі транзисторів та тиристорів полегшує їх використання у різноманітних приладах за забезпечуючи при цьому низький рівень втрат.

На сьогоднішній день використання гібридних схем на базі IGBT в блоках силової електроніки полегшує виготовлення інверторів на всі напруги промислових і побутових мереж потужністю від одиниць кіловат до одиниць мегават.

Використання сучасних транзисторних і тиристорних схем керування в системи електропривода змінного струму за своїми характеристиками, включаючи динамічні, істотно перевищують показники приводів постійного струму та змінного струму на старій елементній базі тиристорів.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

2.1. Аналіз шляхів економії електроенергії в електроприводах

Підвищення середнього навантаження робочих машин знижує питомі витрати електроенергії. На рис 2.1 видно, що при зменшенні навантаження зменшується ККД електродвигуна і особливо робочої машини.

Для визначення економії енергії при збільшенні навантаження робочих машин вводиться поняття питомої витрати енергії на даній робочій машині. Ця витрата дорівнює кількості енергії, яка споживається двигуном із мережі E_m , віднесеному до кожної кіловат-години корисної роботи при даному технічному режимі

$$E_{\text{л}} = P_m T_m$$

де: P_m – потужність, яка споживається робочим органом машини, кВт; T_m – машинний час або час корисної роботи, год.

Питома витрата енергії

$$\Delta E = \frac{1}{\eta_{\text{м.н}} K_n} \left(K_n + \frac{\alpha(1 - \eta_{\text{м.н}})}{K_T} \right);$$

де $\eta_{\text{м.н}}$ – ККД робочої машини при максимальному навантаженні;
 $K_n = P_m / P_{\text{м, ном}}$ – коефіцієнт навантаження; $P_{\text{м, ном}}$ – номінальна потужність електродвигуна, кВт;
 $K_T = T_m / (T_m + T_x)$ – коефіцієнт використання робочої машини; T_m – час використання двигуна, год.; T_x – час холостої роботи,

год.; α – коефіцієнт, що залежить від конструктивних особливостей даного типу робочого двигуна, рівний 0,7-0,9.

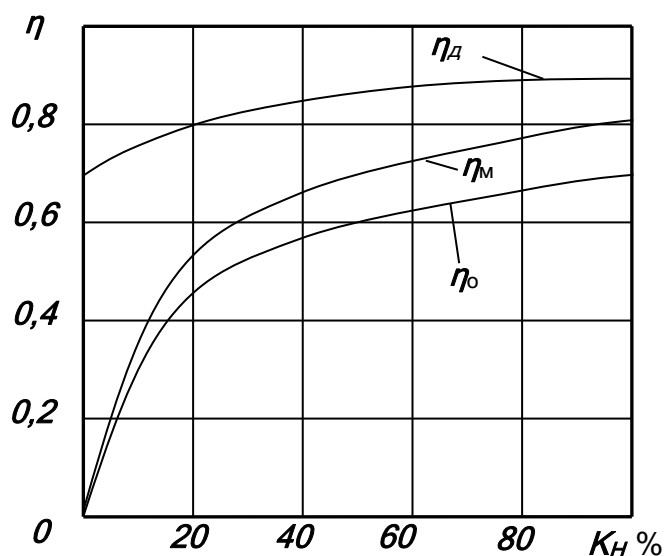


Рис 2.1 Залежність ККД робочого двигуна η_m двигуна η_d і всього приводу η_o від коефіцієнта навантаження K_H .

Питома витрата енергії за відсутності холостого ходу ($K_T = 1$)

$$\Delta E' = \frac{K_H + \alpha(1 - \eta_{m,H})}{\eta_{m,H} K_H}$$

За максимального застосування робочого двигуна ($K_T = 1$) і повному навантаженні машини ($K_H = 1$), питома витрата енергії буде мінімальна:

$$\Delta E_0 = \frac{1 + \alpha(1 - \eta_{m,H})}{\eta_{m,H}}$$

Співвідношення $\beta = \Delta E / \Delta E_0$ обґрунтовує коефіцієнт збільшення питомої витрати енергії через ріст навантаження і тривалості режиму холостого ходу:

$$\beta = \frac{\kappa_H \kappa_T + \alpha(1 - \eta_{м.н})}{[1 + \alpha(1 - \eta_{м.н})\kappa_H \kappa_T]}$$

На рис 2.2 наведені криві $\beta = f(\kappa_H)$, з яких можна визначити економію енергії, яку отримаємо в результаті підвищення навантаження робочих машин.

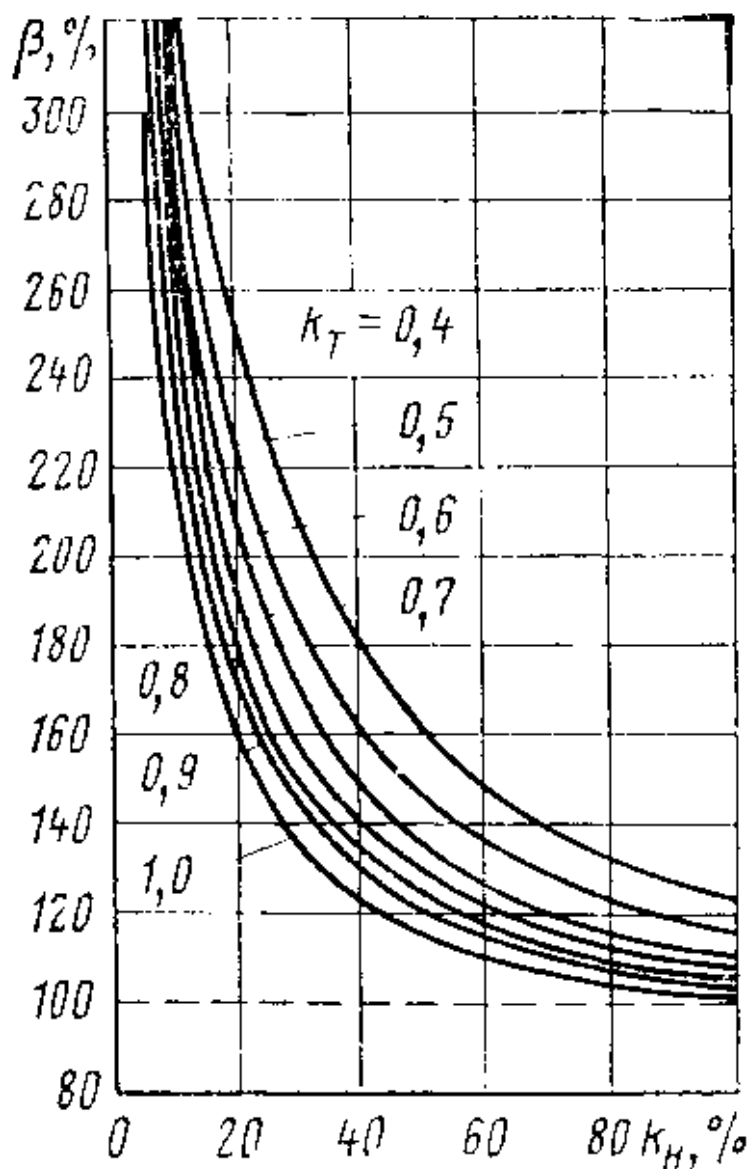


Рис 2.2. Залежність коефіцієнту навантаження робочого двигуна на питомі витрати електроенергії.

Автоматичних обмежувачів холостого ходу.

Використання обмежувачів холостого ходу на обладнанні з часом холостого ходу більше 10 с приводить до економії електроенергії. Якщо у технологічному процесі час між операціями менше 10 с, ефективність використання обмежувачів холостого ходу визначається результатами контрольного розрахунку.

З допомогою діаграми наведеної на рис 2.3 можливо орієнтовно визначити економію та обґрунтувати економічну доцільність використання обмежувачів холостого ходу.

Для користування діаграмою необхідно мати наступні вихідні данні:

а) усереднене значення потужності холостого ходу P_0^n , визначається, як сума додатків: механічної потужності хх системи електропривода P_m^n і втрат в сталі електродвигуна ΔP_x . Середня потужність P_0^n визначається орієнтовно після проведення вимірювань навантаження електроприводу в холостому режимі роботи;

б) паспортна потужність електродвигуна $P_{д.ном}$, кВт;

в) тривалість границь операційного часу $T_{всп}$, с;

г) повторюваність циклів роботи Z , год.

За цими даними визначають параметри діаграми:

$$a = \frac{P_0^n}{P_{д.ном}} ; \quad b = \frac{1}{4T_{всп}} .$$

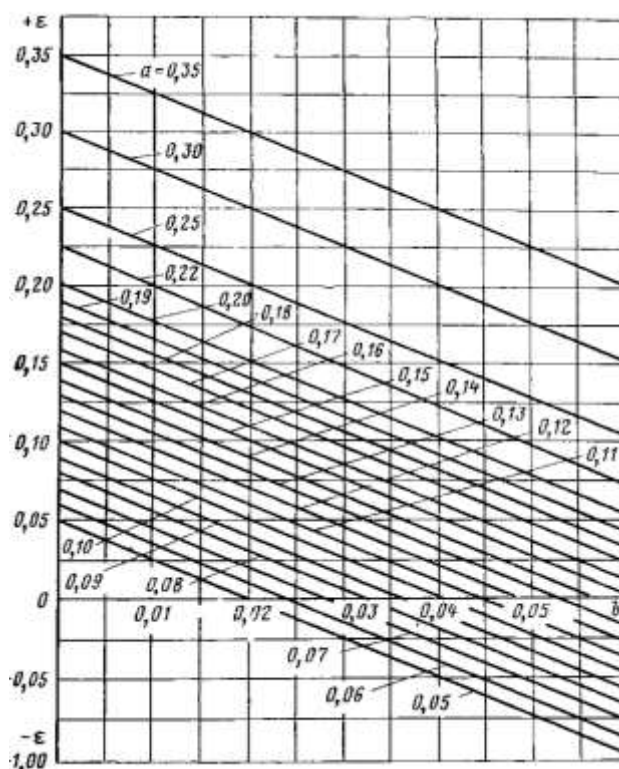


Рис 2.3 Діаграма визначення ефективності використання обмежувачів холостого ходу.

За параметрами a і b на діаграмі (рис. 2.3.) знаходять показним ефективності ϵ . За допомогою показника ефективності ϵ обґрунтовується економія електроенергії електроприводом за годину, кВт·год:

$$\Delta E = \epsilon \frac{z P_{\text{д.ном}} T_{\text{всп}}}{3600} .$$

Заміна недонавантажених електродвигунів на двигуни меншої потужності. При середньому завантаженні електродвигуна менше 45% від його номінальної потужності, то доцільність заміни не викликає сумнівів і перевірка розрахунками не потрібна.

При роботі електродвигуна з навантаженням більш 70% від його номінальної потужності його заміна недоцільна.

При роботі з навантаженням 45-70% від номінальної потужності двигуна доцільність його заміни залежить від зменшення загальних втрат активної потужності в електричній системі і в двигуні. Загальні втрати активної потужності в електроприводі можуть бути визначені за формулою:

$$\Delta P_{\text{сум}} = [Q_x (1 - \kappa_n^2) + \kappa_n^2 Q_{\text{ном}}] \kappa_e + \Delta P_x + \kappa_n^2 \Delta P_{a,n}$$

де $Q_x = \sqrt{3} U_{\text{ном}} I_x$ – реактивна потужність двигуна, яка споживається на холостому ході, кВар; I_x – струм електродвигуна на холостому ході, А; $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга на затискачах електродвигуна, В; $\kappa_n = P / P_{\text{ном}}$ – коефіцієнт навантаження електродвигуна; P – середньобобове навантаження електродвигуна, кВт; $P_{\text{ном}}$ – номінальна паспортна потужність електродвигуна, кВт; $Q_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_d} \operatorname{tg} \varphi_{\text{ном}}$ – реактивна потужність електродвигуна в режимі навантаження, кВар; η_d – ККД електродвигуна за максимального навантаження; $\operatorname{tg} \varphi_{\text{ном}}$ – відношення споживання реактивної потужності до активної потужності електродвигуна; κ_e – коефіцієнт зростання втрат (приймається рівним 0,1 кВт/кВар); $\Delta P_x = P_{\text{ном}} \left(\frac{1 - \eta_d}{\eta_d} \right) \left(\frac{\gamma}{1 + \gamma} \right)$ – втрати активної потужності електродвигуна на холостому ході, кВт; $\Delta P_{a,n} = P_{\text{ном}} \left(\frac{1 - \eta_d}{\eta_d} \right) \left(\frac{1}{1 + \gamma} \right)$ – зростання втрат активної потужності в електродвигуні при навантаженні

100%, кВт; $\gamma = \frac{\Delta P_x}{\Delta P_{a.n}}$ – розрахунковий конструктивний коефіцієнт

електродвигуна, визначається за виразом:

$$\gamma = \frac{\Delta P_x, \%}{(1 - \eta_n, \%) - \Delta P_x, \%},$$

де $\Delta P_x, \%$ - втрати холостого ходу активної потужності, що споживається двигуном за навантаження 100%.

Заміна недовантажених електродвигунів, якщо вона навіть виправдана результатами техніко-економічного розрахунку, виконується після проведення ретельної перевірки можливості їх оптимального завантаження за рахунок правильного перерозподілу навантаження робочих машин які сумісно з ним працюють. Такий захід завжди буде енергоефективний, якщо при виборі двигуна була допущена помилка або відсутній був двигун потрібної потужності і тому був вибраний двигун із завищеною за потужністю в порівнянні з потребою робочої машини.

Використання двигуна меншої потужності, не зважаючи на недостатнє використання робочої машини може перешкоджати подальшому вдосконаленню технологічного процесу.

Аналіз технологічних схем та режимів роботи електроприводів, дозволяє стверджувати, що більшість режимів роботи пов'язані зі зміною частоти обертання ротора двигуна.

В більшості підприємств технологічний процес на 90% забезпечується електричними машинами, переважна частина з яких, є асинхронними двигунами, тому дослідження енергетичної ефективності впровадження частотно-керованого асинхронного електроприводу має актуальний характер.

2.2. Основні принципи роботи частотного керування електроприводом

Для роботи з високим рівнем енергетичних показників у електродвигунів з частотним керуванням необхідно одночасно зі регулюванням частоти струму f_1 регулювати напругу, в обмотці статора напруга U_1 . Під час регулювання частоти обертання ротора двигуна при перманентному навантажувальному моменті на валу електродвигуна, то напруга, яка підводиться до нього, повинна змінюватися пропорційно зміні частоти струму, описується співвідношенням:

$$U_{\text{вих}} = U_1 f_{\text{вих}} / f_1.$$

Головним елементом в схемі частотного керування трифазним асинхронним двигуном М є блок ПНЧ — перетворювач частоти і напруги (рис. 2.4), на вхід якого подається напруга U_1 змінного струму частотою f_1 . Керування роботою ПНЧ виконується за допомогою сигналу керування U_k , що надходить із керуючого пристрою КП. Від значення керуючого сигналу залежать значення напруги $U_{\text{вих}}$ і частоти $f_{\text{вих}}$ на виході ПНЧ. Трифазна напруга $U_{\text{вих}}$, що знаходиться в необхідному співвідношенні з частотою $f_{\text{вих}}$, будучи поданою на обмотку статора електродвигуна М, забезпечує задані значення частоти обертання n_2 та обертового моменту М електродвигуна.

Жорсткість механічних характеристик асинхронного електродвигуна при частотному керуванні буде незмінною (рис.2.5). Зниження перевантажувальної здатності електродвигуна при значній зміні частоти $f_{\text{вих}}$ в менший бік, викликана активним опором обмотки статора. Дану ситуацію можна усунути шляхом збільшення напруги живлення, при цьому максимальний момент електродвигуна на діапазоні регулювання частоти обертання буде залишатися незмінним.

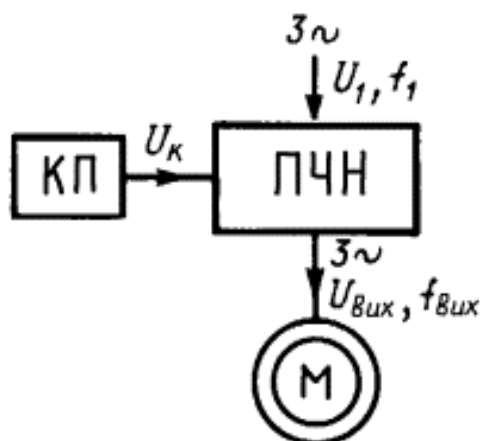


Рис. 2.4. Структурна схема частотного керування електроприводом асинхронного електроприводу з частотним керуванням

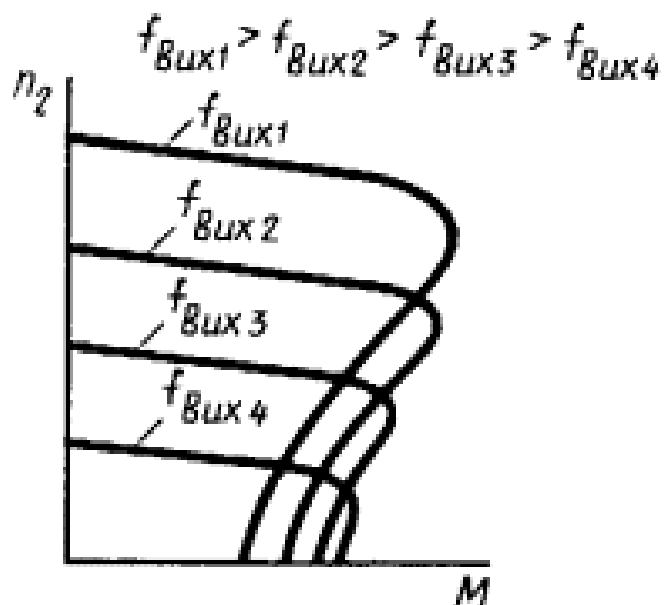


Рис.2.5. Механічні характеристики асинхронного електроприводу

У сучасних пристроях частотного керування у більшості, використовуються статичні перетворювачі напруги/частоти, якості перемикань використовуються схеми на тиристорах. Багато перетворювачів працює за перетворенням змінного струму в постійний із наступним інвертуванням постійного струму в змінний необхідної

частоти. На рис.2.6 зображена структурна блок-схема розімкненої системи частотного керування електроприводом змінного струму. Керуючий пристрій КП формує для перетворювача напруги/частоти ПНЧ два сигнали: сигнал U_u надходить на керований випрямляч КВ, сигнал U_f надходить на керований інвертор КІ. Можливе створення більш складної системи частотного керування з зворотніми зв'язками (напруга, поточозчеплення, струм, частота обертання ротора електродвигуна). Зворотні зв'язки за частотою обертання ротора забезпечують дотримання жорсткості механічних характеристик керованим двигуна.

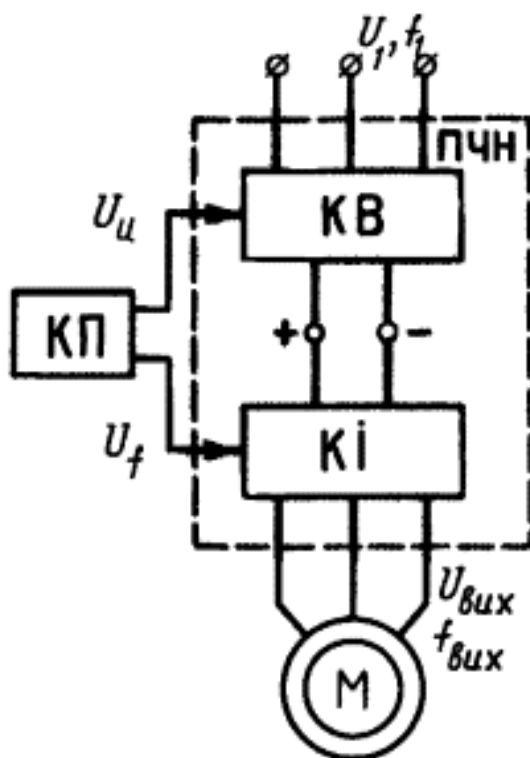


Рис. 2.6. Структурна схема розімкненої системи частотного керування

В частотно-керованому електроприводі оптимальні рівні електромагнітних втрат для різних частотних завдань можна визначити без дослідження залежності електромагнітних втрат від частоти. Рівень електромагнітних втрат можна визначити аналітично за допомогою простих функціональних перетворювачів.

Регулювання енергоефективною роботою електродвигуна з метою мінімуму втрат визначаються залежністю оптимального потоку асинхронного двигуна від частоти та завантаження. На рис. 2.7. наведена схема енергозберігаючого частотно-керованого приводу.

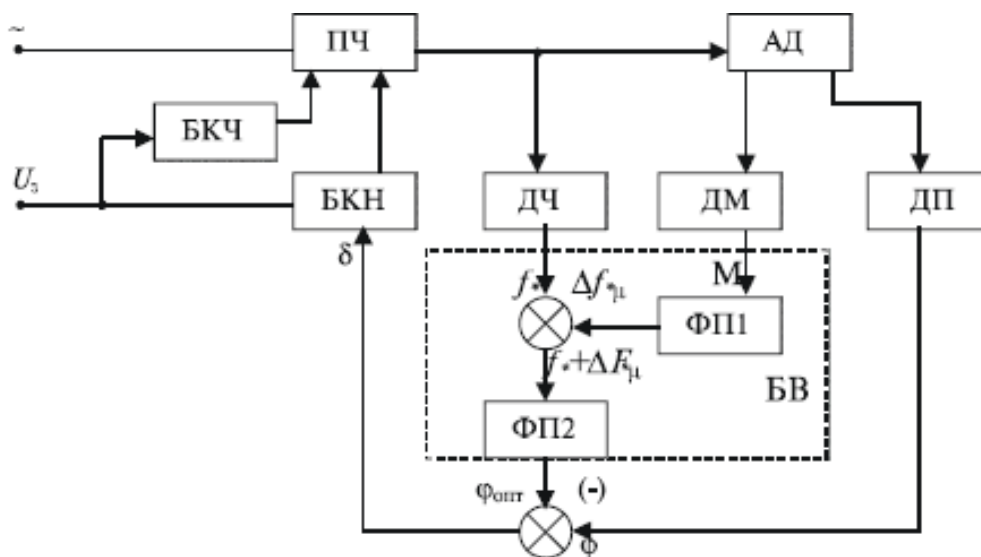


Рис. 2.7. Схема енергозберігаючого частотно-керованого приводу

Розвиток різнопланових схем та елементів силової електроніки обумовив значне впровадження та застосування частотно-керованих асинхронних електроприводів з оптимальним вибором частоти обертання двигуна та способів керування ним. Для визначення ефективності застосування частотного керування проведемо імітаційне моделювання робочих режимів електроприводу вентиляторів.

2.3. Економічна ефективність впровадження пристрою частотного керування

В роботі пропонується впровадження перетворювача частоти для регулювання продуктивності вентилятора. Це дозволить при повністю відкритих заслонках проводити регулювання частоти обертання

приводного двигуна вентилятора зміною числа оборотів двигуна, а не механічними засобами.

Застосування перетворювача частоти дозволить забезпечити:

1. Можливість регулювання продуктивності вентилятора головного провітрювання при повністю відкритих заслінках за рахунок зміни частоти обертання приводного електродвигуна в найбільш економічному режимі споживання електроенергії.
2. Плавний, частотний пуск і розгін електродвигуна вентилятора до заданої швидкості, що виключає динамічні і пневматичні удари у вентиляційній системі.
3. Зниження електродинамічних ударних навантажень при пуску в трансформаторно-фідерних ланцюгах.
4. Збільшення міжремонтних циклів і надійності електричного комутаційного устаткування.
5. Забезпечення можливості автоматичного регулювання продуктивності вентиляційної установки по сигналу завдання швидкості від зовнішньої системи регулювання.

Залежність споживаної потужності двигуна вентилятора від його частоти обертання є статичною функцією і має кубічну залежність, а у відносних одиницях $P/P_{\max}$ – квадратичну. Її вигляд показаний на рисунку 10.7 (залежність 2).

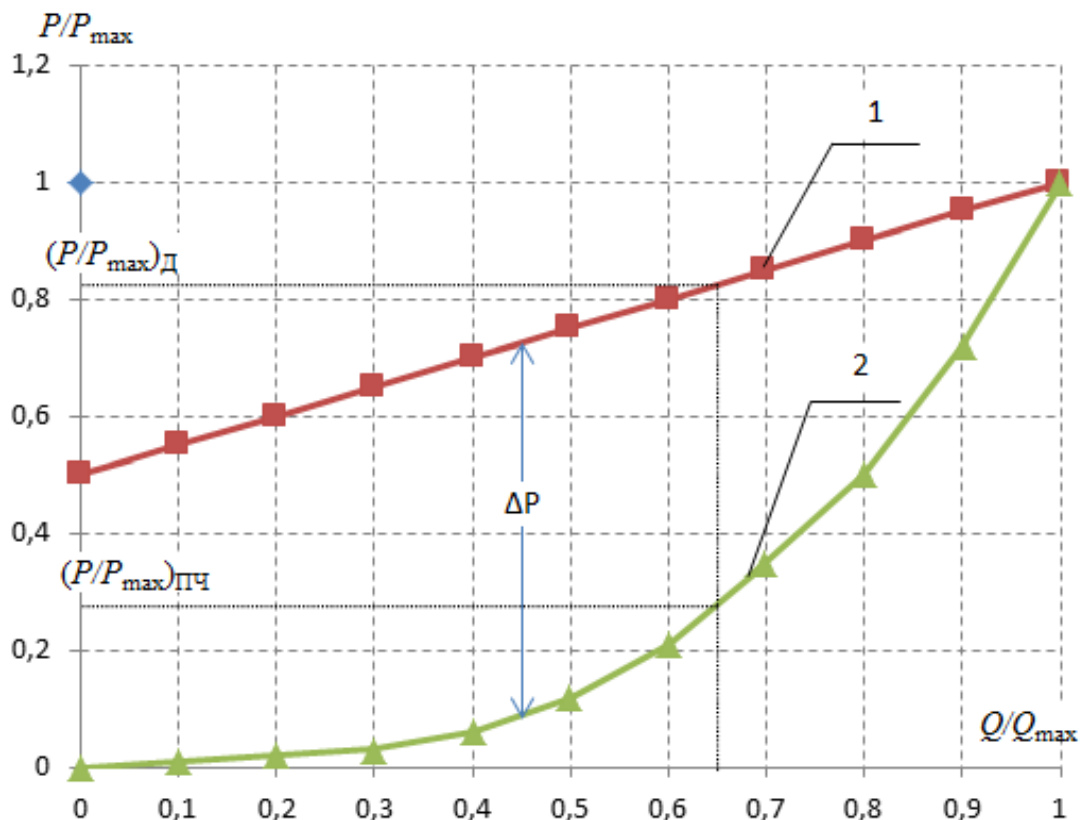


Рисунок 10.7 - Залежність споживаної потужності двигуна вентилятора від частоти обертання

Відрізком ΔP показана різниця між значеннями споживаних потужностей при двох способах регулювання продуктивності (вниз від номінальної):

- дроселюванням - крива (1);
- регулюванням числа оборотів за допомогою перетворювача частоти – крива (2).

У вентилятора холодної зони положення лопастей ± 40 (при повному закритті ± 90), тобто існуючий робочий діапазон роботи вентилятора $Q/Q_{max} = 0,6 \dots 0,7$.

При дроселюванні (крива 1) $(P/P_{max})_Д = 0,82$;

При частотному регулюванні (крива 2): $P/P_{max} = 0,25 \dots 0,35$;

Приймаємо $(P/P_{max})_{ПЧ} = 0,3$;

Різниця між значеннями споживаних потужностей при двох способах регулювання продуктивності вентилятора:

$$\Delta P = (P/P_{max})_д - (P/P_{max})_{ПЧ} = 0,82 - 0,3 = 0,52;$$

Потужність двигуна $P_{дв} = 15$ кВт;

Час роботи в рік $T_{річ} = 1920$ годин;

Вартість ел. енергії $C_0 = 2,25$ грн/кВт·год.

Різниця між значеннями споживаних потужностей при двох способах регулювання продуктивності вентилятора $\Delta P = 0,52$;

Річна економія електроенергії при впровадженні ПЧ складає:

$$\Delta E_{пч} = P_{дв} \cdot \Delta P \cdot T_{річ} \cdot C_0 = 15 \cdot 0,52 \cdot 1920 \cdot 0,7 = 10483,2 \text{ грн/рік.}$$

При проведенні аналізу технологічного режиму електроприводу і введенні систем автоматичного управління завданням швидкості, надійність роботи установки вентилятора і економічний ефект також можуть бути збільшені.

Висновки до розділу 2

Аналіз технологічних схем та режимів роботи більшості електроприводів, дозволяє стверджувати, що енергоефективність режимів роботи пов'язані зі зміною частоти обертання ротора двигуна.

Розвиток елементів силової електроніки обумовив широке впровадження та застосування частотно-керованих асинхронних електроприводів з оптимальним вибором частоти обертання двигуна. Для визначення ефективності застосування частотного керування необхідно провести імітаційне моделювання робочих режимів електроприводу вентиляторів.

3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Для визначення параметрів режиму роботи вентиляторної установки з частотно-регульованим асинхронним електроприводом необхідно використати комп'ютерне імітаційне моделювання. Для реалізації даного підходу, спочатку необхідно розробити структурну схему автоматичного керування режимом роботи вентиляторної установки, та виконати розроблення комп'ютерних імітаційних моделей для окремих її блоків та елементів. В даному розділі кваліфікаційної роботи роботи вирішуються питання автоматичного керування режимом роботи вентиляторної установки за допомогою системи частотного регулювання.

3.1. Загальна структурна схема системи автоматичного керування рівнем тиску вентиляторної установки на основі частотнорегульованого асинхронного електропривода

На рис. 3.1 наведено структурну схему системи автоматичного керування рівнем тиску вентиляторної установки на основі частотнорегульованого асинхронного електропривода

Умовні позначення на рисунку 3.1:

ОК – за об'єкт керування служить вентиляторна установка;

Датчик Р – датчик тиску в системі;

ВП – частотнорегульований асинхронний електропривод;

ПЧ – перетворювач частоти;

АД – асинхронний двигун;

САК – система автоматичного керування рівнем тиску в системі;

Q – позначення напору повітря в системі, тис. м³/год;

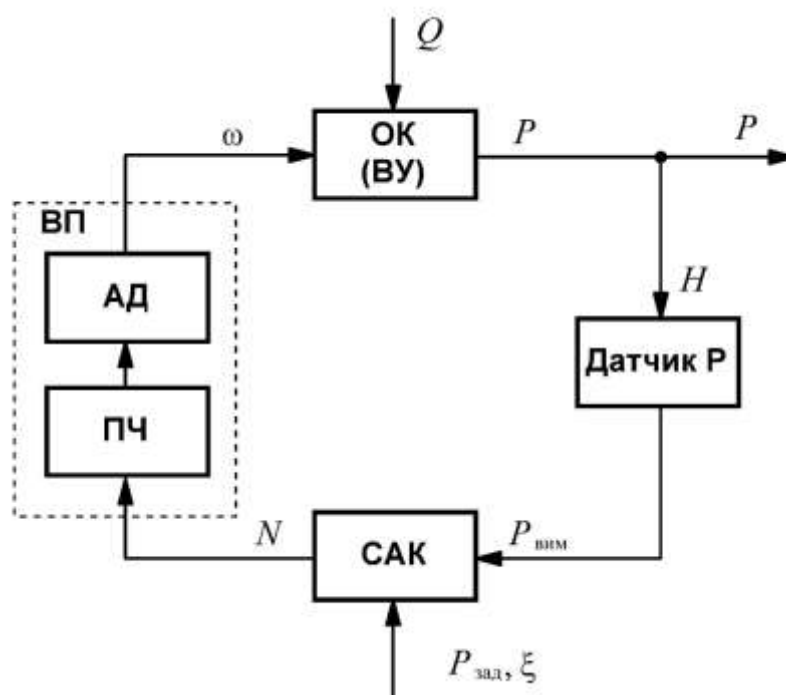


Рис. 3.1. Структурна схема САК рівнем тиску у вентиляційній системі

P – вихідний сигнал об’єкта керування - тиск, м;

$P_{\text{вим}}$ – контрольне значення тиску;

N – вихідний сигнал елемента автоматичного керування - частота обертання ротору асинхронного електродвигуна;

ω – вхідний керуючий сигнал електродвигуна - кутова швидкості обертання (ω), рад/с;

$P_{\text{зад}}$ – задане значення для керування рівнем напору в системі %

ξ – векторні задаючі параметри САК.

Структурна схема система автоматичного керування наведена на рис. 3.2 має наступний алгоритм роботи:

1) Для встановлення заданого значення об’єму подачі повітря (Q) відбувається регулювання значення подачі вентиляторної установки.

2) З датчика напору надходить виміряне значення напору на вхід блоку керування.

3) За встановленим алгоритмом керування та величини помилки керування формується вихідний сигнал N - частота обертання валу електродвигуна.

4) Сформований сигнал керування N подається частотнорегульованого асинхронного електроприводу, який встановлює відповідне значення сигналу кутової швидкості обертання валу електродвигуна ω .

Як зазначено вище, при дослідженні режимів роботи вентиляторної установки на основі частотнорегульованого асинхронного електроприводу згідно методів комп'ютерного імітаційного моделювання, необхідно створити комп'ютерні моделі елементів за структурною схемою САК:

1) комп'ютерну модель двигуна вентиляційної установки.

2) комп'ютерну модель перетворювача частоти та блоку автоматичного керування.

3.2. Комп'ютерна імітаційна модель вентилятора

За структурною схемою, що відображена на рис. 3.2., в якості об'єкту керування виступає вентилятор марки УДАиЛ-В0г-9-И-2.

Як відомо, з теоретичних даних залежність тиску у вентиляційній системі P від витрати повітря Q називають напірною характеристикою вентилятора. Графічне зображення даної залежності залежить від типу вентиляційної установки або наводиться в технічному керівництві з експлуатації вентилятора в документації заводу-виробника. Напірна характеристика $Q-P$ вентиляторної установки УДАиЛ-В0г-9-И-2 предсталена на рис. 3.2.

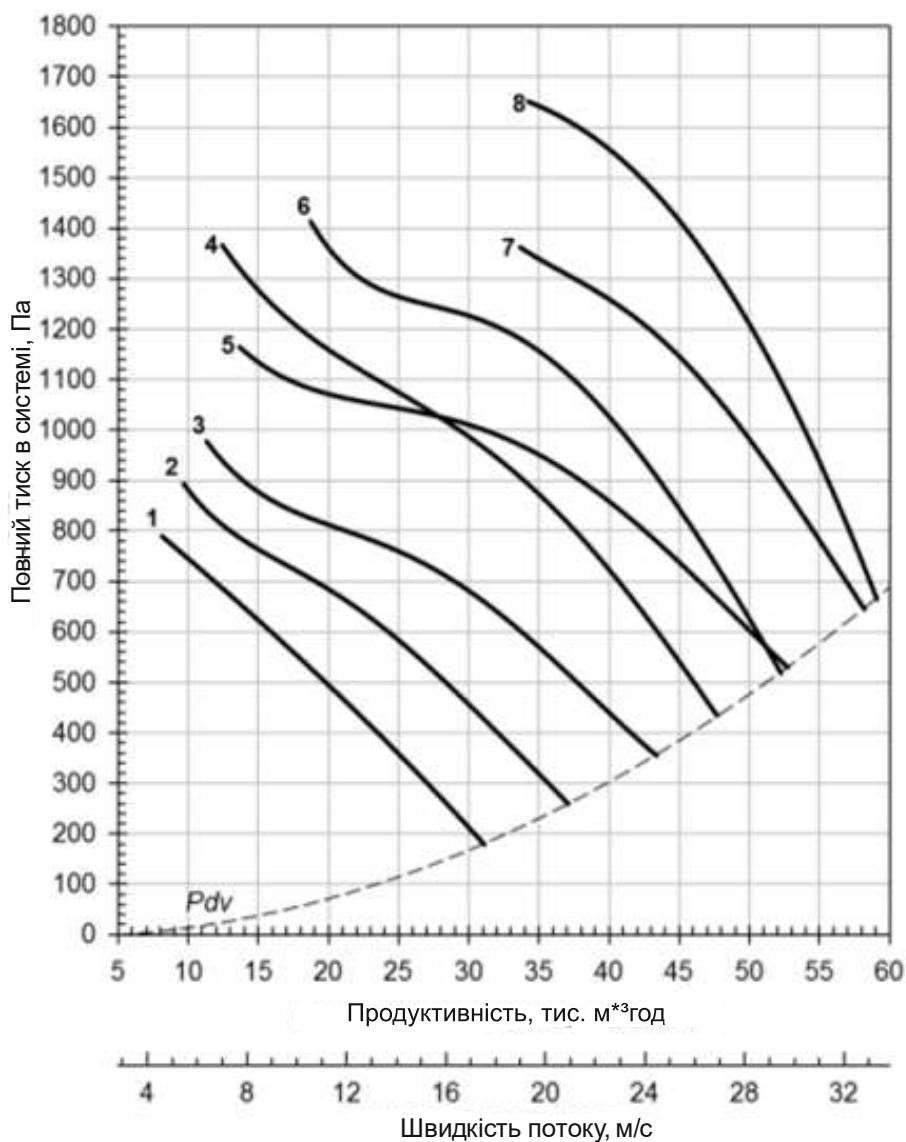


Рис. 3.2. Графік напірної характеристики вентилятора

Використання напірних характеристик в табличному або графічному вигляді без визначення аналітичних виразів є складним завданням для побудови математичної моделі, що описує напірні характеристики вентиляторної установки.

Для отримання аналітичного запису, що описує залежність напірної характеристики вентиляторної установки, використовувався один із методів регресивного аналізу. В теоретичних дослідження багатьох авторів аналітичний вираз, що описує напірну характеристику вентилятора пропонується представляти поліномом 2 порядку.

Графіки напірних характеристик вентилятора, побудовані за технічними даними та шляхом їх апроксимації у вигляді рівняння регресії з коефіцієнтом кореляції R^2 приведено на рис. 3.3.

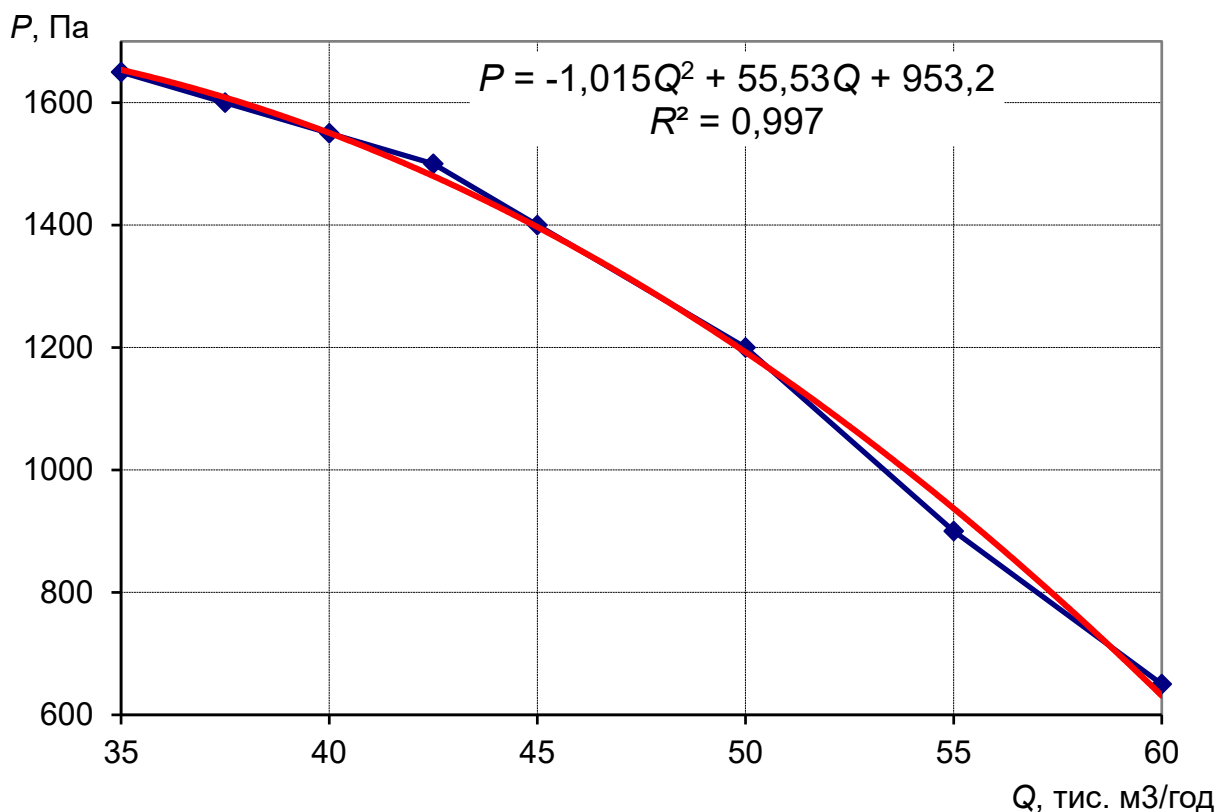


Рис. 3.3. Графіки напірні характеристик вентилятора
1 – технічні каталожні дані; 2 – графік апроксимації поліномом 2-го порядку

Так як процеси, що протікають в системі подібні, для обраної вентиляційної установки у певні моменти часу в значення напірних характеристик, що характеризують її стан будуть тотожними. Використовуючи принцип подібності, математичний вираз, що описує напірну характеристику вентилятора УДАиЛ-ВОг-9-И-2 для будь-якої швидкості обертання може бути представлено виразом:

$$P(\omega, Q) = (a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 =$$

$$= (953,2 - 55,53Q - 1,015Q^2) \left(\frac{\omega}{303,68} \right)^2, \quad (3.1)$$

де P – величина тиску в системі, м;

Q – задане значення об'єму повітря, що використовується, м³/год;

ω – кутова швидкість обертання валу електродвигуна, рад/с;

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

a_0, a_1, a_2 – коефіцієнти у рівнянні регресійного аналізу.

Графіки напірних характеристик вентилятора УДАиЛ-ВОГ-9-И-2, а також графіки залежностей які апроксимовані на різних частотах обертання ротора двигуна наведено на рис. 3.4.

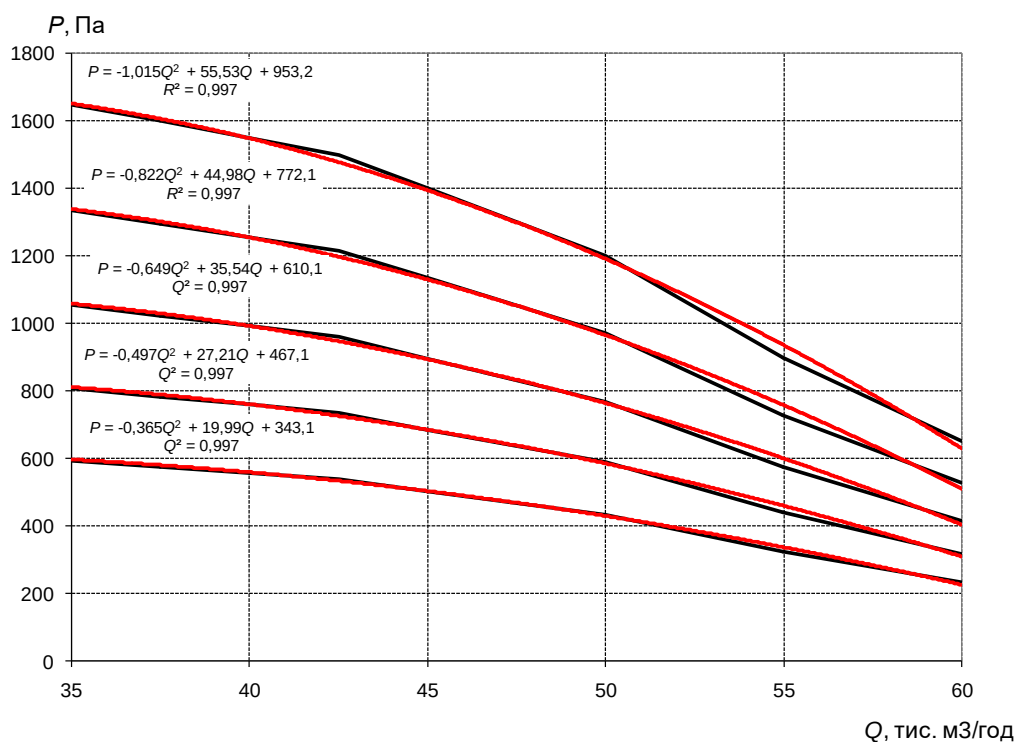


Рис. 3.4. Графіки напірних характеристик для різних частот обертання валу електродвигуна.

Таким чином, математична модель описана виразом (3.1) представляє розрахункові значення для об'єкту керування. Необхідно прийняти до уваги, що затримку часу при регулюванні тиску в системі у випадку зміни подачі та/або швидкості обертання ротору можна невраховувати. Відповідно, дану модель об'єкту керування можна представити, як безінерційну ланку САК. В середовищі Matlab/Simulink представимо залежність (3.1) у вигляді комп'ютерної імітаційної моделі, опис якої виконано у наступному розділі.

3.3 Комп'ютерна імітаційна модель виконавчого пристрою

Комп'ютерна модель САК, структурна схема якої наведена на рис. 3.1, складається з двох блоків: імітаційна модель перетворювача частоти та асинхронного двигуна. Структурна схема частотно-регульованого електроприводу з асинхронним двигуном зображена на рис. 3.5.

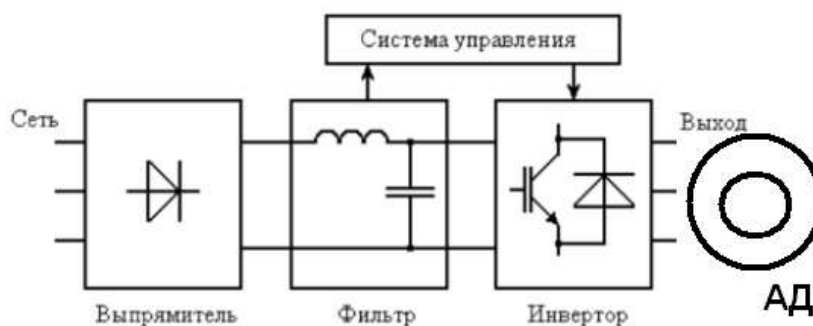


Рис. 3.5. Схема частотно-регульованого електроприводу з асинхронним двигуном

Як уже зазначалося вище, для керування швидкістю обертання ротору асинхронного електродвигуна можна застосувати скалярне або векторне керування, відповідно будуть відрізнятися і моделі частотного електроприводу з асинхронним двигуном.

Побудова повноцінної імітаційної моделі частотно-регульованого асинхронного електроприводу, що враховує всі процеси що притікають в двигуні є складною інженерною задачею. Високим рівень складності математичного апарату, що описує фізичні процеси, що відбуваються в частотному перетворювачі через наявність значної кількості нелінійних зв'язків. Опис динамічних процесів математичної моделі асинхронного двигуна є достатньо складною науково-технічною задачею. Для опису динамічних процесів, що протікають у електричній машині використовують систему диференціальних рівнянь Парка-Горєва.

В середовищі Matlab/Simulink вже частково розроблені типові схеми асинхронних двигунів і частотних регуляторів, то використання блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive» значно полегшить моделювання режимів роботи частотнорегульованого асинхронного електроприводу за скалярним законом керування. В основі даного блоку є математичні моделі трьохфазних перетворювачів частоти та асинхронного двигуна, розроблена з використанням диференціальних рівнянь Парка-Горєва.

Зовнішній вигляд блоку, який описує процеси, що протікають в частотно-регульованому асинхронному електроприводі наведено на рис. 3.6.

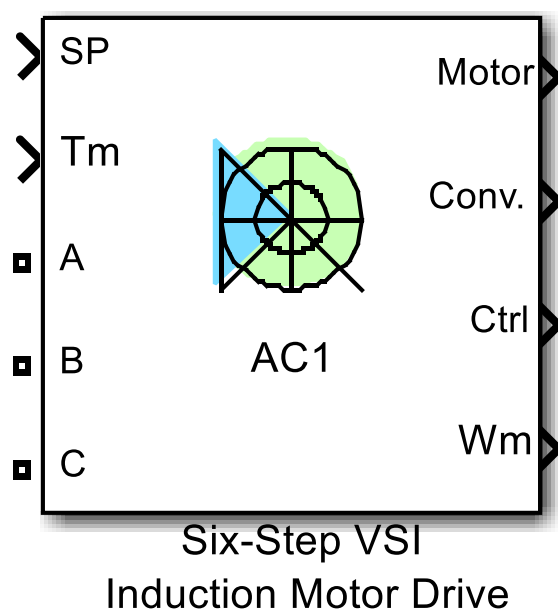


Рис. 3.6. Зовнішній вигляд блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive»

Структурна схема, що враховує елементи силової апаратури у «Six-Step VSI Induction Motor Drive» зображена на рис. 3.7.

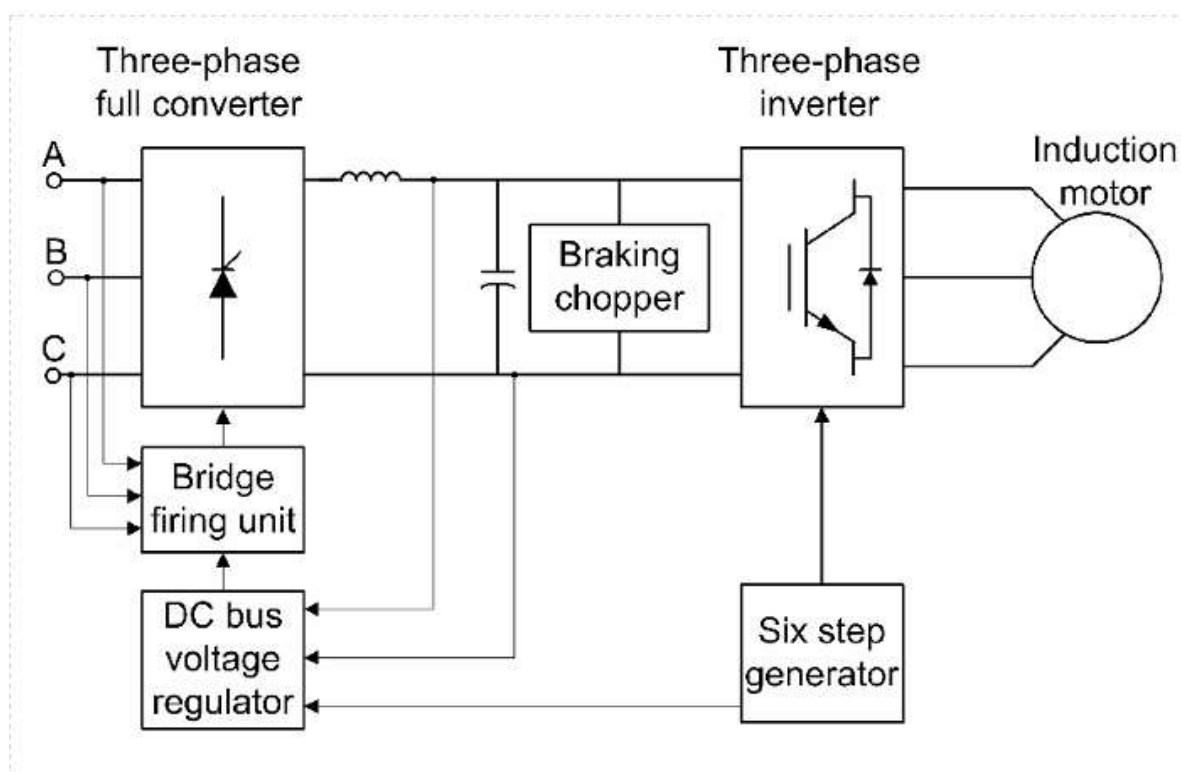


Рис. 3.7. Структурна схема елементів силової апаратури в блоці «Six-Step VSI Induction Motor Drive»

Для вентиляторної установки використовується асинхронний електродвигун марки AIP30M2 з встановленою потужністю 30 кВт з частотою обертання 3000 об./хв. Технічні параметри електродвигуна наведено в табл. 3.1.

Таблиця 11.1. Технічні параметри АД двигуна

Марка	P_n , кВт	n_2 , об./хв	I_n , А	η , %	$\cos \varphi$	I_p/I_n	M_p/M_n	M_{max}/M_n	J , кгм ²
AIP30M2	30	2950	55,4	91,4	0,9	7,5	2,0	2,3	0,7

Параметри комп'ютерної моделі електродвигуна AIP30M2 визначені за функцією Matlab «power_AsynchronousMachineParams». Дана функція

включає в собі графічний додаток, що дозволяє встановити параметри в моделі електродвигуна за його паспортними даними.

Механічна характеристику вентилятора яка описує динаміку навантажувального моменту, представлена формулою:

$$\begin{aligned}
 M_c &= M_0 + (M_{\text{ном}} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 = 2,93 + (97,78 - 2,93) \left(\frac{\omega}{314,16} \right)^2 = \\
 &= 2,93 + 94,85 \cdot \left(\frac{\omega}{314,16} \right)^2
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

де M_c – механічний навантажувальний момент на валу, Н·м;

$M_{\text{ном}}$ – номінальний момент електродвигуна, Н·м;

M_0 – момент при холостому ході.

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

Реалізацію блоку, що моделює механічну характеристику вентиляторної установки в середовищі Simulink наведено в наступних розділах.

3.4 Синтез системи автоматичного регулювання подачі вентилятора

Розроблено багато підходів для створення системи автоматичного управління подачею вентилятора. Найбільш поширені з них регулювання з використанням пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора (ПІД), оптимальне управління за принципом максимуму Понтрягіна або оптимальне управління за методами динамічного програмування Беллмана.

Використання оптимальних регуляторів в САК асинхронними двигунами не знайшов широкого використання через складність математичного опису оптимальних систем управління.

Тому доцільно реалізувати систему автоматичного регулювання рівня тиску вентиляційній системі використовуючи пропорційно-інтегрально-диференціальний закон управління.

Так як в управлінні подачею вентилятора швидкість перехідного процесу не обмежена, тому для пропонується використати більш простий, закон ПІ-керування без диференціальної складової закону регулювання.

Для синтезу САК електроприводом на основі ПІ регулятора значення тиску в вентиляційній системі виконаємо лінеаризацію математичної моделі об'єкту управління та виконавчого пристрою.

Частотно-регульований асинхронний електропривод у простішому вигляді представляє собою сукупність аперіодичного ланки першого порядку та ланки затримки. Результуюча передатна функція частотно-регульованого асинхронного електроприводу має такий вигляд:

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

де k_m – коефіцієнт підсилення;

T_1 – постійна часу, с.

Значення величин k_m та T_1 визначаються розрахунковим шляхом або експериментально.

Як вже обґрунтовано вище в даній роботі виконано синтез ПІ-регулятора. На рис. 3.8 зображена Схема лінеаризованої моделі САК подачею вентилятора.

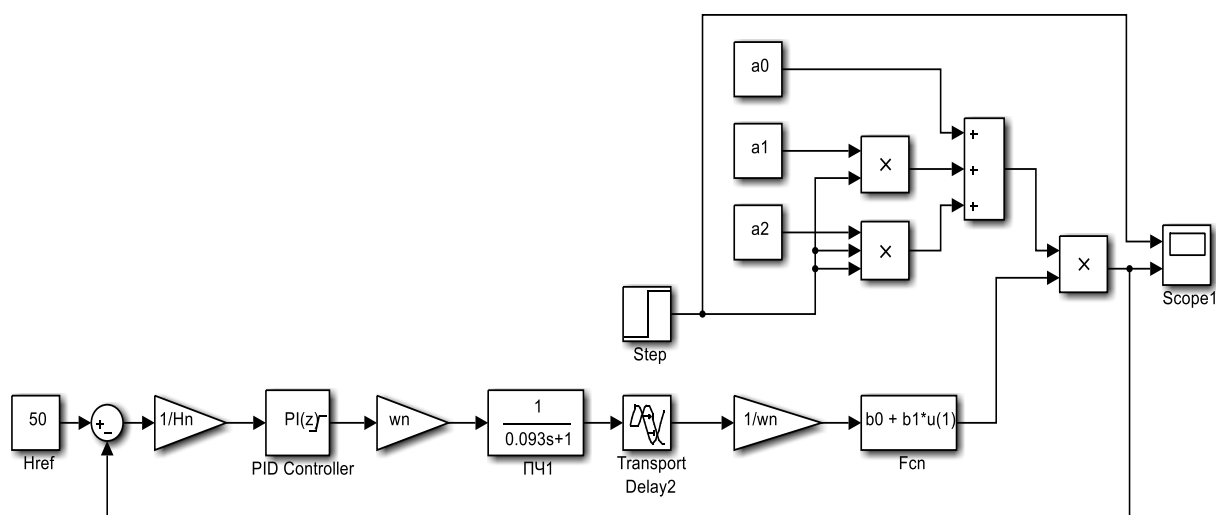


Рис. 3.8. Структурна схема Matlab/Simulink лінеаризованої моделі САК
подачею вентилятора

В блоці “PID Controller” закладено алгоритм ПІ регулювання.

Як видно з рис. 3.8, даний блок реалізує в дискретному вигляді пропорційно-інтегральний закон керування.

Для налаштування коефіцієнтів ПІ регулятора треба скористатись інструментом «PID tuner» для чого використовуємо кнопку «Tune...» в діалоговому вікні налаштувань блоку “PID Controller”.

За допомогою математичного пакету Matlab/Simulink дозволяє в інтуїтивно налаштовувати необхідні характеристики перехідного процесу САК.

Значення коефіцієнтів, що характеризують швидкодію та похибку регулювання даного ПІ регулятора, становлять: $K_p = 0,167$; $K_i = 1,651$.

Висновки до розділу 3

Використання методів регресивного аналізу дозволило отримати аналітичну формулу, що описує зміну напірної характеристики.

В середовищі Matlab/Simulink для визначеного аналітичного опису розроблено комп'ютерну імітаційну модель САК асинхроним двигуном вентиляторної установки.

Реалізовано систему автоматичного регулювання рівня тиску у вентиляційній установці використовуючи пропорційно-інтегрально-диференціальний закон управління.

Для синтезу САК електроприводом на основі ПІ регулятора значення тиску в вентиляційній системі виконано лінеаризацію математичної моделі об'єкту управління та виконавчого пристрою.

4. РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВЕНТИЛЯТОРА

4.4. Комп'ютерні імітаційні моделі регульованого асинхронного електроприводу вентилятора

Комп'ютерна імітаційна модель для випадку скалярного автоматичного керування рівнем напору в вентиляційній установці на основі частотно-регульованого електроприводу асинхронного двигуна зображена на рис. 4.1.

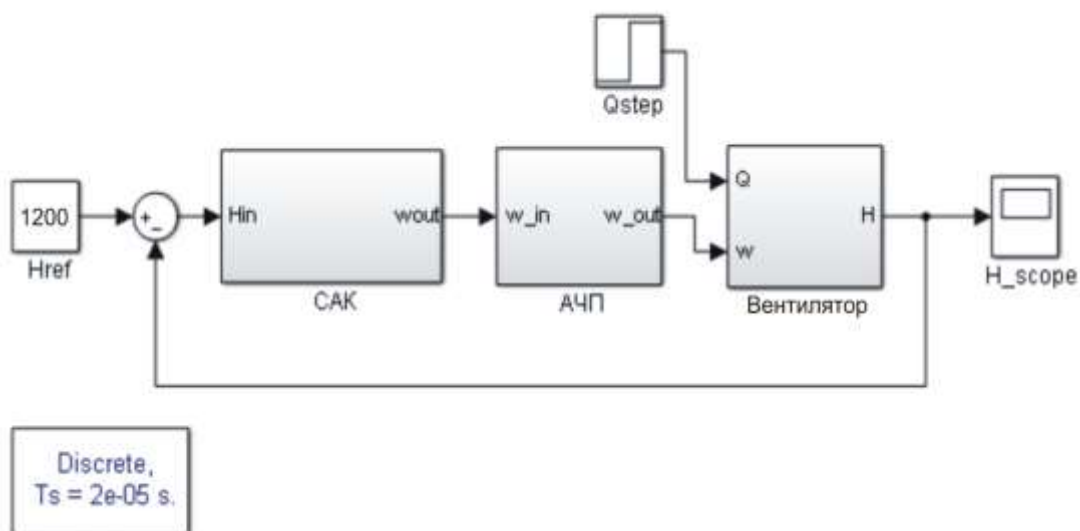


Рис. 4.1. Комп'ютерна імітаційна модель для випадку скалярного автоматичного керування рівнем подачею вентилятора на основі частотно регульованого асинхронного електроприводу

Модель блоку «САК» зображена на рис. 4.2.

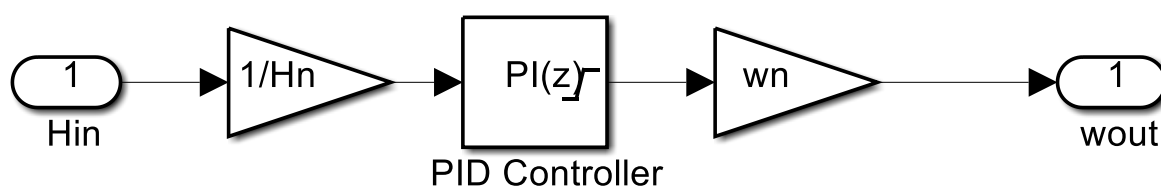


Рис. 4.2. Модель блоку «САК»

Модель блоку «Вентилятор» зображена на рис. 4.3.

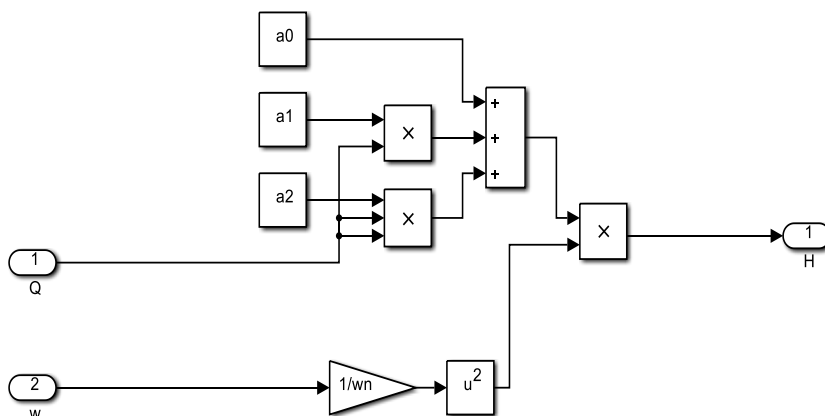


Рис. 4.3. Модель блоку «Вентилятор»

Модель блоку «АЧП» зображена на рис. 4.4.

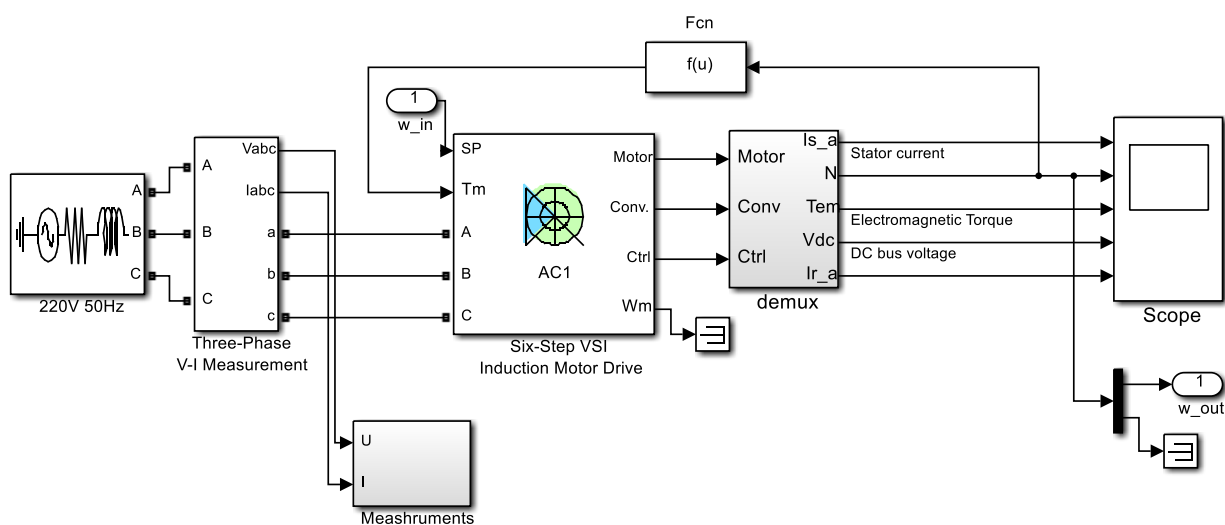


Рис. 4.4. Модель блоку «Вентилятор»

4.2. Результати моделювання режимів роботи скалярного частотнорегульованого електроприводу вентилятора

(Для моменту часу $t = 8$ с відбувається зміна подачі повітря)

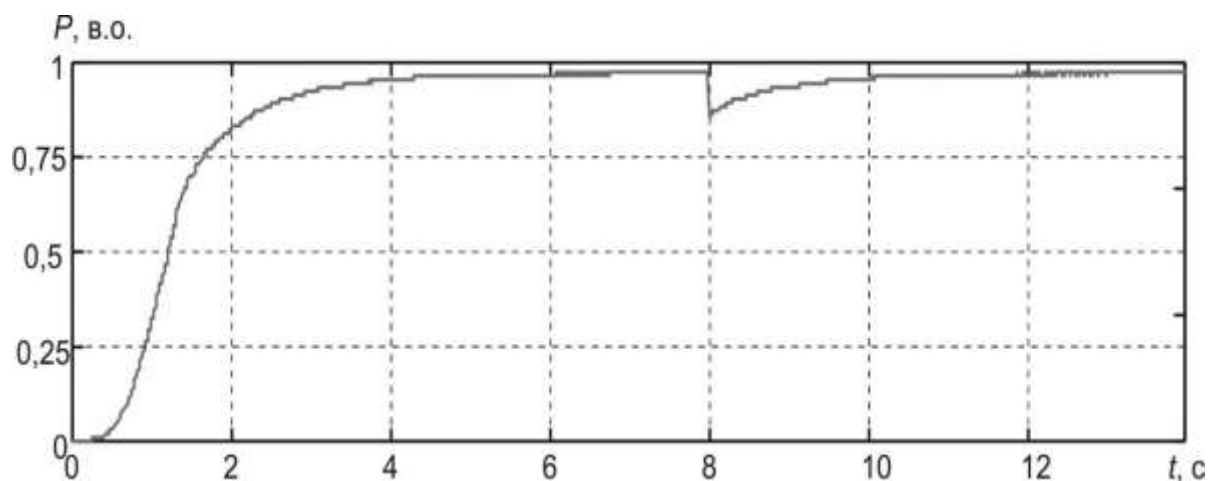


Рис. 4.5. Графік зміни подачі Q вентилятора

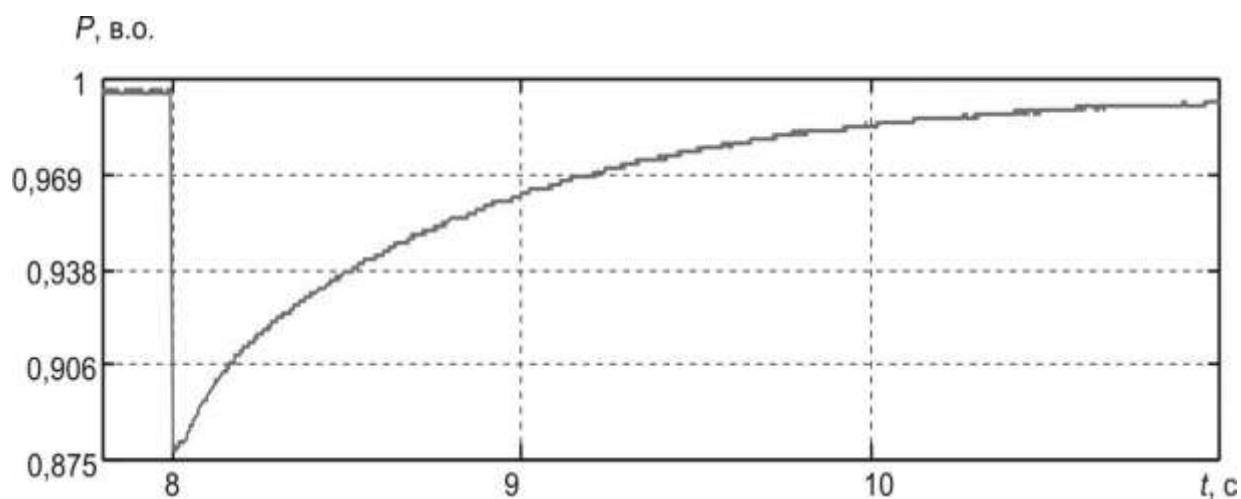


Рис. 4.6. Графік зміни подачі вентилятора (збільшено у масштабі 1:2)

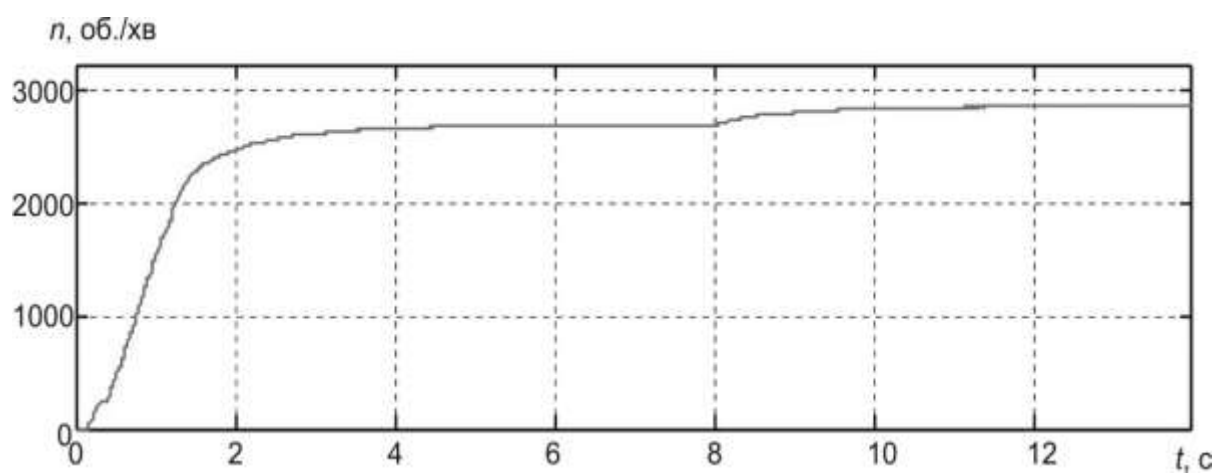


Рис. 4.7. Графік зміни частоти обертання ротора двигуна вентилятора

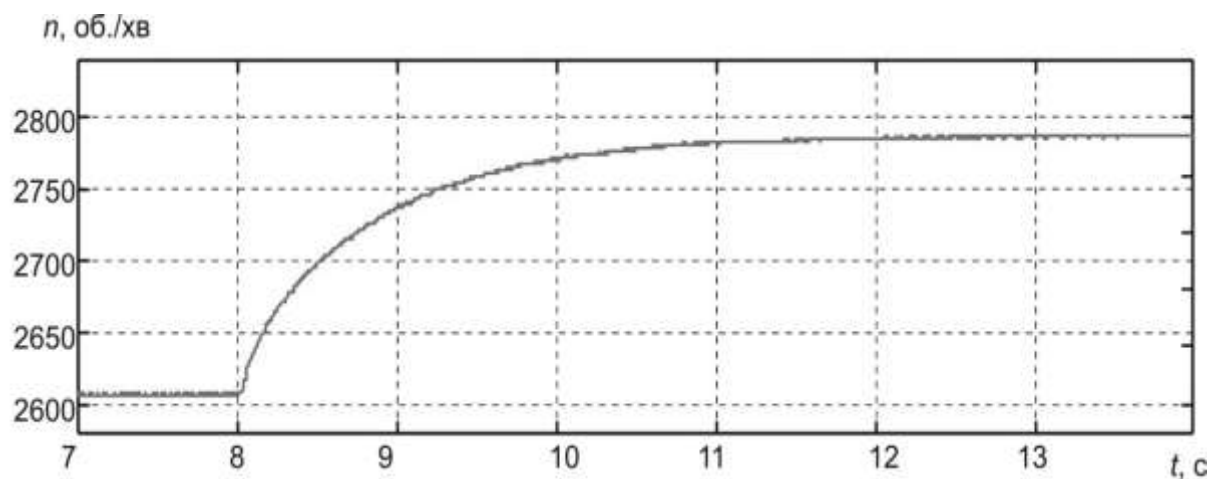


Рис. 4.8. Графік зміни частоти обертання валу двигуна вентилятора

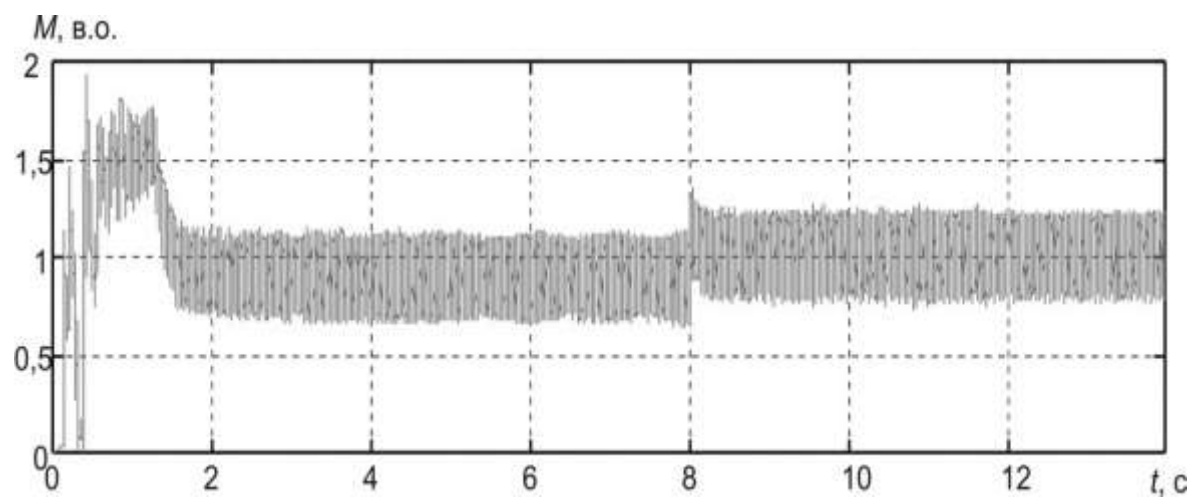


Рис. 4.9. Графік зміни електромагнітного моменту M_{em}

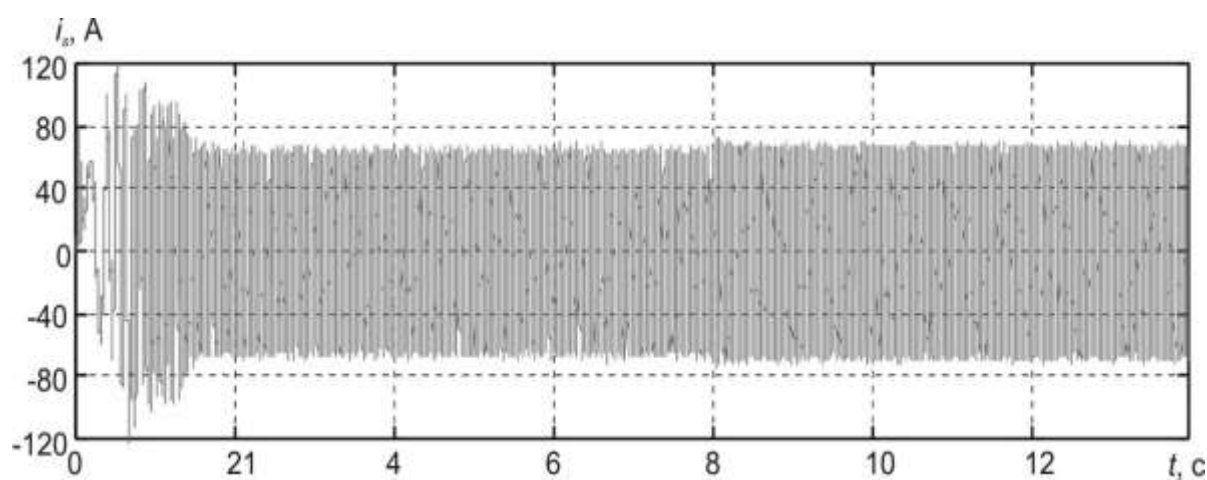


Рис. 4.10. Графік коливань струмів статорі i_s

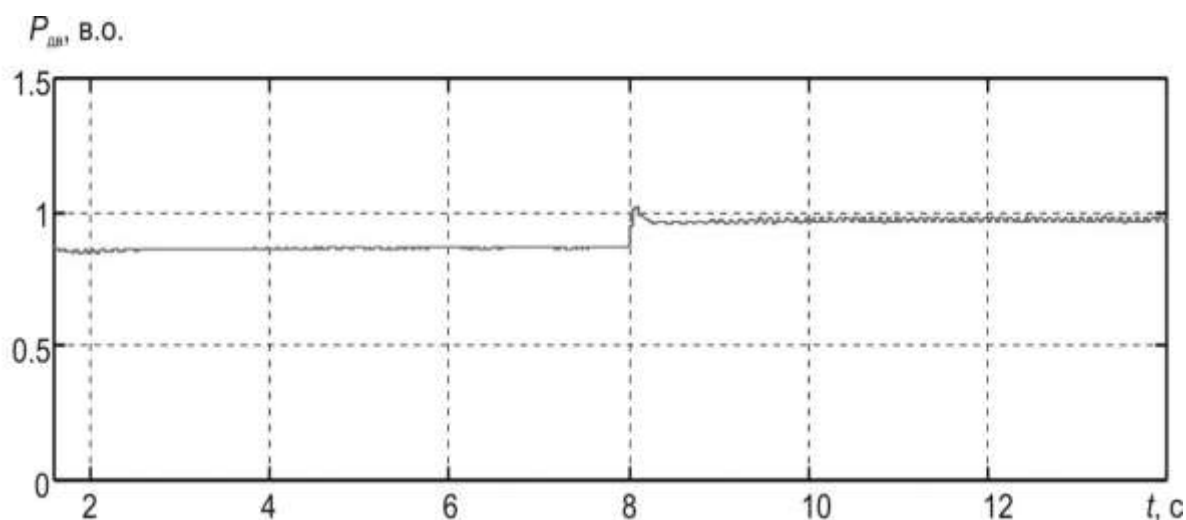


Рис. 4.11. Графік зміни активної потужності P (в.о.)

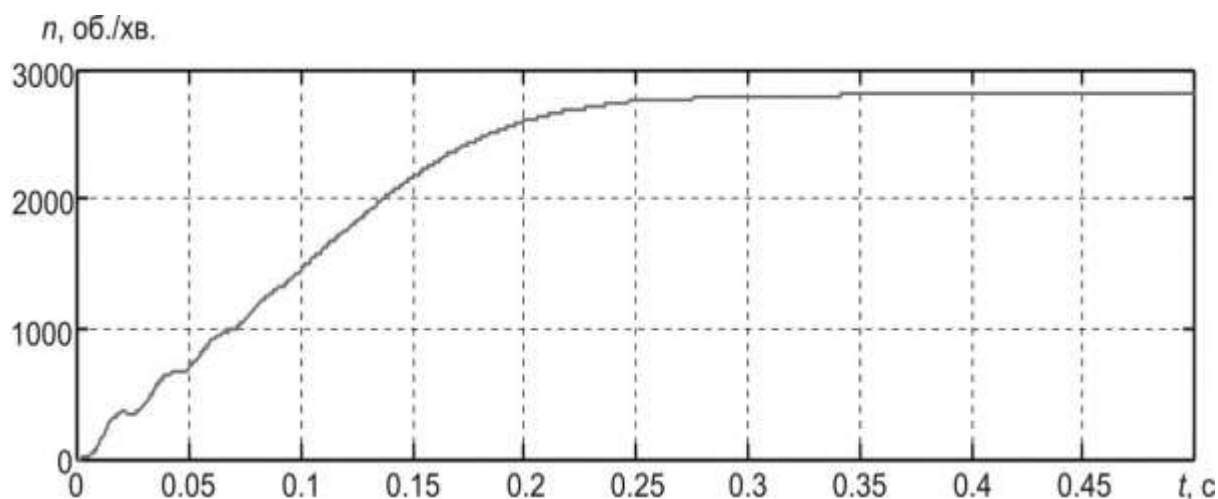


Рис. 4.12. Графік зміни швидкості

Аналізуючи отримані діаграми в зміни швидкості обертання в динамічних та статичних режимах необхідно зазначити, що структура з ПІ-регулятором швидкості забезпечує досить точне виконання заданого значення. Особливістю роботи електроприводу при навантаженнях – це зміна динамічного моменту в залежності від швидкості обертання вентилятора.

Висновки до розділу 4

Розроблена комп'ютерна імітаційна модель для випадку скалярного автоматичного керування подачею вентилятора на основі частотно регульованого асинхронного електроприводу дозволила провести моделювання динамічних та статичних режимів.

Отримані результати моделювання довели, що зміна швидкості обертання в динамічних та статичних режимах в САК з ПІ-регулятором швидкості забезпечує досить точне виконання заданого значення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Використання комбінованих схем інверторів на базі транзисторів та тиристорів полегшує їх використання у різноманітних приладах за забезпечуючи при цьому низький рівень втрат.

На сьогоднішній день використання гібридних схем на базі IGBT в блоках силової електроніки полегшує виготовлення інверторів на всі напруги промислових і побутових мереж потужністю від одиниць кіловат до одиниць мегават.

Використання сучасних транзисторних і тиристорних схем керування в системи електропривода змінного струму за своїми характеристиками, включаючи динамічні, істотно перевищують показники приводів постійного струму та змінного струму на старій елементній базі тиристорів.

Аналіз технологічних схем та режимів роботи більшості електроприводів, дозволяє стверджувати, що енергоефективність режимів роботи пов'язані зі зміною частоти обертання ротора двигуна.

Розвиток елементів силової електроніки обумовив широке впровадження та застосування частотно-керованих асинхронних електроприводів з оптимальним вибором частоти обертання двигуна. Для визначення ефективності застосування частотного керування необхідно провести імітаційне моделювання робочих режимів електроприводу вентиляторів.

Використання методів регресивного аналізу дозволило отримати аналітичну формулу, що описує зміну напірної характеристики.

В середовищі Matlab/Simulink для визначеного аналітичного опису розроблено комп'ютерну імітаційну модель САК асинхронним двигуном вентиляторної установки.

Реалізовано систему автоматичного регулювання рівня тиску у вентиляційній установці використовуючи пропорційно-інтегрально-диференціальний закон управління.

Для синтезу САК електроприводом на основі ПІ регулятора значення тиску в вентиляційній системі виконано лінеаризацію математичної моделі об'єкту управління та виконавчого пристрою

Розроблена комп'ютерна імітаційна модель для випадку скалярного автоматичного керування подачею вентилятора на основі частотно регульованого асинхронного електроприводу дозволила провести моделювання динамічних та статичних режимів.

Отримані результати моделювання довели, що зміна швидкості обертання в динамічних та статичних режимах в САК з ПІ-регулятором швидкості забезпечує досить точне виконання заданого значення.

Список використаної літератури

1. Шидловский А.К. Тиристорные преобразователи постоянного напряжения для низковольтного транспорта/ А.К. Шидловский, В.Б. Павлов. – Киев: Наукова думка, 1982.
2. Соколовский Г. Г.. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием/ Г.Г. Соколовский.– М.: АСАДЕМА, 2006.–265 с.
3. Новые системы электропривода на синхронных электродвигателях [Электронный ресурс] : ООО «Орион–мотор» . — Режим доступа. : <http://www.orionmotor.narod./rasvitie.htm>.
4. Аракелян А.К. Вентильные электрические машины в системах регулируемых электроприводов: Учеб. пособие для вузов: В 2 т. Т.1 / А.К. Аракелян, А.А .Афанасьев. — М.: Высш. шк., 2006. — 546 с.: ил.
5. Krøvel Ø. Design of Large Permanent Magnetized Synchronous Electric Machines/ Øystein Krøvel //Ph.D thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, pp 6-10, 14-15 Feb 2011
6. Голубев А.Н. Многофазный синхронный электропривод /А.Н. Голубев, А.А. Лапин// Электричество. - 2005, № 2, с. 43-49.
7. Kane D. M. and M. R. Warburton, "Integration of permanent magnet technology / D. M. Kane and M. R. Warburton//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting: IEEE, 2002.
8. Dorr G. Trends and Developments of Electrical Machines in the 21st Century/ G. Dorr// in ICEM Bruges, Belgium: ICEM, 2002.
9. Дубенский А.А. Бесконтактные двигатели постоянного тока/ А. А. Дубенский. – Москва: Энергия, 1967.
10. Шидловский А.К. Тиристорные преобразователи постоянного напряжения для низковольтного транспорта/ А.К. Шидловский, В.Б. Павлов. – Киев: Наукова думка, 1982.
11. Крайцберг М.И. Электропривод при автономном источнике

энергии/ Крайцберг М.И. – М. : Энергия, 1966. – 224 с

12. Злакоманов В.В. Взаимодействие динамических систем с источником энергии/ В.В. Злакоманов, Б.С. Яковлев. –М.: Энергия, 1980. – 176 с

13. Шрейнер Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами/ Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитренко. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.

14. Загорский А.Е. Электродвигатели переменной частоты/ А.Е. Загорский. – М.: Энергия, 1975.–152 с.

15. Гусев Б.Я. Асинхронные двигатели для тиристорного частотно–регулируемого привода/ Б.Я. Гусев, Б.В. Белов, С.В. Астраханцев // Элек-тротехническая промышленность. Электрические машины, 1975, №1(47). С. 3–6.

16. McLean G.W. Performance and design of induction motors with square–wave excitation/ G.W. McLean, G.F. Nix, S.R. Alwash// IEE Proc, 1969, vol. 116, №8. — P.1405–1411.

17. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов пере-менного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты/ Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000.

18. Регулируемые электродвигатели переменного тока: по материалам Всесоюз. науч.–техн. совещания/ [редкол.: Суворов Н.И. и др.]; Всесоюз. н.–и. проект.–конструкт. и технол. ин–т электромашиностроения. — Вла-димир: ВНИПТИЭМ, 1988. — 132 с.

19. Попович М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін. – К.: Либідь, 2005. – 680

20. Tavner, P. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines [Text] / P. Tavner, L. Ran, J. Penman, H. Sedding. – Institution of Engineering and Technology (IET), 2008. – 304 p.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Охорона праці. Розрахунок заземлення

У відповідності з ПУЕ, всі металеві частини електроустановок, які в процесі роботи не мають з'єднання з струмопровідними частинами, але можуть потрапити під напругу, повинні бути заземлені

Заземлення підстанції. Однієї з основних мір робіт, що забезпечують безпеку, в електроустановках є захисне заземлення. Заходу від дотику до частин нормально що не знаходиться під напругою, але оказавшись під напругою є надійні заземлення корпусів електроустаткування і конструктивних металевих частин електроустановок.

Опір пристрою, що заземлює, в електроустановках напругою вище 1000 В с великими струмами замикання на землю не повинне перевищувати 0,5 Ом. У нашому випадку потрібно розрахувати контурний заземлитель підстанції з наступними даними. Ґрунт у місці спорудження підстанції – іл і пісок дрібний вологий середньої щільності. Кліматична зона - третя. Додатково як заземлення використовується система трос-опора з опором заземлення 1,3 Ом. Тому що для сторони 110 кв потрібне опір заземлення 0,5 Ом, перевіримо величину опору заземлення для сторони 10 кв. У мережах з незаземленої нейтраллю що заземлює устрійство заземлень підстанцій високої напруги повинне мати опір

$$r_3 \leq \frac{U_{РАСЧ}}{I_{РАСЧ}}, \quad (A.1)$$

де $U_{РАСЧ}$ – розрахункову напругу приймаємо 125 В, тому що пристрій, що заземлює, використовується також і для установок підстанції напругою до 1000 В;

$I_{РАСЧ}$ – повний струм замикання фази на землю.

$$r_3 = \frac{125}{65} = 1,92.$$

У такий спосіб у якості розрахункового приймається опір $r_3 = 0,4$ Ом.

Опір штучного заземлителя розраховується з урахуванням використання системи трос- опора. Це опір R_n можна обчислити в такий спосіб:

$$\frac{1}{R_n} = \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_c}, \quad (A.2)$$

де r – опір системи трос – опора.

$$\frac{1}{R_n} = \frac{1}{0,5} - \frac{1}{1,3} = 1,23 \text{ См},$$

$$R_n = \frac{1}{1,23} = 0,812 \text{ Ом}.$$

Питомий опір ґрунту, що рекомендується для попередніх розрахунків, у місці спорудження заземлителя для нашого ґрунту складає 30 Ом·м. Підвищувальні коефіцієнти K_r і K_v рівні відповідно 3,5 і 1,5. Визначаються з таблиць для горизонтальних протяжних електродів при глибині закладення 0,8 м і для вертикальних електродів при глибині закладення вершини 0,5..0,8 м. Як вертикальні електроди застосовуються електроди, виготовлені з круглої сталі діаметром 12 мм, довжиною 5 м з одним відточеним кінцем. До них приєднуються горизонтальні електроди – смуги 30×4 мм², приварені до верхніх кінців вертикальних. Розрахунковий питомий опір для горизонтальних електродів

$$\rho_{\text{расч.г}} = K_r \cdot \rho_{\text{гр}}, \quad (A.3)$$

$$\rho_{\text{расч.у}} = K_v \cdot \rho_{\text{гр}}, \quad (A.4)$$

де $\rho_{\text{гр}}$ – питомий опір ґрунту.

$$\rho_{\text{расч.г}} = 3,5 \cdot 30 = 105 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

$$\rho_{\text{расч.у}} = 1,5 \cdot 30 = 45 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Визначимо опір розтіканню одного вертикального електрода при зануренні нижче рівня землі на 0,8 м

$$R_{BO} = \frac{\rho_{расч.г}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{d} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot t + 1}{4 \cdot t - 1} \right), \quad (A.5)$$

де l – довжина вертикального електрода, дорівнює 5 м;

d – діаметр вертикального електрода, рівний 0,012 м;

t – геометричний параметр, у даному випадку рівний $l/2 + 0,8$ м.

У такий спосіб

$$t = l/2 + 0,8 = 5/2 + 0,8 = 3,33 \text{ м},$$

$$R_{Al} = \left(\ln \frac{2 \cdot 5}{0,012} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot 3,33 + 1}{4 \cdot 3,33 - 1} \right) = 11,3 \text{ } \hat{=} \text{ } \Omega.$$

Визначимо зразкове число вертикальних електродів при попередньому коефіцієнті використання, прийнятому рівним $\eta_y = 0,6$

$$n = \frac{R_{BO}}{\eta_B \cdot R_n}, \quad (A.6)$$

$$n = \frac{11,3}{0,6 \cdot 0,812} = 23,2$$

Визначимо опір розтіканню горизонтальних електродів. Коефіцієнт використання сполучної смуги в контурі при числі електродів порядку 20 і відношенні між відстанями між вертикальними електродами і їхньою довжиною, рівному 1 дорівнює по таблицях $\eta_y = 0,27$.

Опір розтіканню смуги по периметрі контуру ($l = 296,4$) дорівнює:

$$R_{\Gamma} = \frac{1}{\eta_{\Gamma}} \cdot \frac{\rho_{расч.г}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2 \cdot l^2}{\pi \cdot t}, \quad (A.7)$$

де $b = 30$ мм – ширина смуги,

$$R_r = \frac{1}{0,27} \cdot \frac{105}{2 \cdot \pi \cdot 296,4} \cdot \ln \frac{2 \cdot 296,4^2}{0,03 \cdot 1,15} = 3,22 \text{ Ом.}$$

Уточнене число вертикальних електродів визначається при коефіцієнті використання $\eta_y = 0,47$, прийнятого при числі електродів порядку 20 і відношенні відстаней між вертикальними електродами і їх довжині рівному 1 м :

$$n = \frac{R_{BO}}{\eta_B \cdot R_n}, \quad (\text{A.8})$$

$$n = \frac{11,3}{0,47 \cdot 1,08} = 22,3.$$

Остаточно приймаємо 22 вертикальних електрода.

Усі з'єднання елементів пристроїв, що заземлюють, у тому числі і перетинання, виконуються зварюванням у перекриттях. У входів і виходів на територію ВРП повинне бути забезпечене вирівнювання потенціалів шляхом укладання двох смуг на відстані 1 і 2 м від заземлителя на глибині 1 і 1,5 м відповідно.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Енергозбереження в режимі частих пусків

Багато робочих машин і виробничі механізми працюють в повторно-короткочасному режимі або його різновидах. Для ЕП таких машин і механізмів важливим елементом аналізу їх роботи є визначення допустимої частоти включень, яка лімітується головним чином нагрівом двигунів. Знижуючи тим або іншим способом втрати енергії в двигуні в сталому або перехідних режимах, можна вирішувати як задачу енергозбереження, так і завдання підвищення допустимої частоти включення двигунів.

Рівняння теплового балансу отримуємо прирівнюванням кількостей виділеної і відданої теплоти:

$$\Delta W_{\text{пуск}} + \Delta P t_{\text{уст}} + \Delta W_{\text{т}} = (1 + \beta) \Delta P_{\text{ном}} (t_{\text{пуск}} + t_{\text{т}}) / 2 + \Delta P_{\text{ном}} (t_{\text{уст}} + \beta t_{\text{о}}).$$

Ввівши позначення для числа включень під час $h = 3600/t_{\text{ц}}$, і відносній тривалості включення $\epsilon = t_{\text{р}}/t_{\text{ц}}$ отримуємо після спрощень наступний вираз для допустимої частоти включення двигуна при даному циклі:

$$h = 3600 \frac{(\Delta P_{\text{ном}} - \Delta P) \epsilon + \Delta P_{\text{ном}} \beta (1 - \epsilon)}{\Delta W_{\text{пуск}} + \Delta W_{\text{т}}}.$$

З виразу виходить, що підвищення частоти включення двигунів може здійснюватися за рахунок зниження втрат потужності ΔP в сталому режимі і втрат енергії при пуску і гальмуванні $\Delta W_{\text{п}}$ і $\Delta W_{\text{т}}$, а також застосування інтенсивнішого охолодження (вентиляція) двигунів.

Розглянемо конкретний приклад розрахунку допустимої частоти включення.

Асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором типу АМР132S4 має номінальні потужність $P_{\text{ном}} = 7,5$ кВт; ковзання $s_{\text{ном}} = 0,04$; ККД $\eta_{\text{ном}} = 87,5$ %; $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}} = 2$; $M_{\text{мах}}/M_{\text{ном}} = 2,5$; $J_{\text{эд}} = 0,028$ кг·м². Розрахувати допустиму частоту включення.

Умови рішення задачі:

- двигун працює з $\epsilon = 0,42$ при номінальному навантаженні;
- відношення $R_1/R'_2 = 1,5$;
- коефіцієнт погіршення тепловіддачі $\nu = 0,3$;
- сумарний приведений до валу двигуна момент інерції електроприводу

$J_{\text{У}}$ складає $1,2J_{\text{эд}}$;

- гальмування двигуна здійснюється вибіганням (відключенням).

1. Визначаємо швидкість двигуна при холостому ході і в номінальному режимі:

$$\omega_0 = 2\pi f_1/p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 : 2 = 157 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{\text{ном}} = \omega_0(1 - s_{\text{ном}}) = 157(1 - 0,04) = 150,7 \text{ рад/с}.$$

2. Розрахунковий номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}} = 18\,500 : 150,7 = 50 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Знаходимо повні втрати потужності в двигуні в номінальному режимі:

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}}) / \eta_{\text{ном}} = 7\,500(1 - 0,875) : 0,875 = 1\,071 \text{ Вт}.$$

4. Визначаємо змінні втрати потужності в обмотках статора і ротора в номінальному режимі:

$$\begin{aligned} V_{\text{ном}} &= M_{\text{ном}} \omega_0 s_{\text{ном}} (1 + R_1 / R_2') = \\ &= 50 \cdot 157 \cdot 0,04(1 + 1,5) = 785 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

5. Знаходимо постійні втрати потужності:

$$K = \Delta P_{\text{ном}} - V_{\text{ном}} = 1\,071 - 785 = 286 \text{ Вт}.$$

6. Розраховуємо середній момент двигуна при пуску, приймаючи його рівним напівсумі пускового і максимального (критичного) моментів:

$$\begin{aligned} M_{\text{ср}} &= (M_{\text{пуск}} + M_{\text{max}}) / 2 = (2M_{\text{ном}} + 2,5M_{\text{ном}}) / 2 = \\ &= 50(2 + 2,5) : 2 = 113 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

7. Знаходимо час пуску двигуна:

$$t_{\text{пуск}} \approx J_{\Sigma} \omega_{\text{ном}} / (M_{\text{ср}} - M_{\text{с}}) = 1,2 \cdot 0,028 \cdot 150,7 : (113 - 50) = 0,08 \text{ с.}$$

8. Знаходимо втрати енергії при пуску ΔW_v обумовлені змінними втратами потужності V :

$$\begin{aligned} \Delta W_v &= J_{\Sigma} \omega_0^2 (1 + R_1/R_2') (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2) M_{\text{ср}} / 2(M_{\text{ср}} - M_{\text{с}}) = \\ &= 1,2 \cdot 0,028 \cdot 157^2 (1 + 1,5) (1^2 - 0,04^2) (113 : 2) (113 - 50) = 2547 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

9. Визначаємо втрати енергії, обумовлені постійними втратами потужності і сумарні втрати енергії за час пуску:

$$\begin{aligned} \Delta W_K &= K t_{\text{пуск}} = 286 \cdot 0,08 = 23 \text{ Дж;} \\ \Delta W_{\text{пуск}} &= \Delta W_v + \Delta W_K = 2547 + 23 = 2570 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

10. Розраховуємо допустиму частоту включення двигуна, враховуючи, що двигун працює при номінальному навантаженні і без втрат енергії при гальмуванні:

$$h = 3600 \frac{\Delta P_{\text{ном}} \beta (1 - \epsilon)}{\Delta W_{\text{пуск}}} = \frac{3600 \cdot 1071 \cdot 0,3 (1 - 0,42)}{2570} = 261 \text{ вкл/ч.}$$

Підвищення допустимої частоти включення двигунів однозначно пов'язане із зниженням втрат потужності і енергії в двигуні.

По-перше, зниження втрат енергії при пуску ΔW_p можливо за рахунок частотно-керованого пуску з використанням перетворювача частоти. Втрати

енергії при такому пуску в порівнянні з розглянутим в прикладі прямим пуском менше в $2T_m/t_{чп}$ разів, де $t_{чп}$ — час частотно-керованого пуску (ЧП);

$T_m = J_{\Sigma} \omega_0 / M_{пуск}$. При виконанні умови $t_{чп} > 2T_m$ матиме місце зниження втрат енергії при пуску і підвищення допустимої частоти включення двигуна.

Для даного прикладу $T_m = 1,2 \cdot 0,028 \cdot 157 : (2 \cdot 50) = 0,05$ з, тому зниження втрат енергії в двигуні відбуватиметься при часі наростання частоти при пуску більше 0,1 с.

Наявність перетворювача частоти дозволяє також реалізовувати частотно-кероване гальмування двигуна, зокрема з можливістю рекуперації енергії в мережу.

По-друге, зниження втрат при пуску може бути забезпечене за рахунок оптимального вибору передавального числа (радіусу приведення) механічної передачі і номінальної швидкості двигуна. Ці можливості були розглянуті раніше.

Економія енергії за рахунок обмеження часу холостого ходу двигунів

За відсутності корисного механічного навантаження асинхронний двигун проте споживає з мережі реактивну потужність і в двигуні і елементах системи електропостачання мають місце втрати енергії. У зв'язку з цим в цілях енергозбереження може бути виконане відключення двигуна від мережі на час його холостого ходу.

Підставою для ухвалення такого рішення є зіставлення втрат енергії за час роботи двигуна на неодруженому ходу з втратами енергії, які матимуть місце при новому включенні двигуна в роботу. Якщо втрати енергії при пуску двигуна

менше втрат енергії за час його холостого ходу, то відключення забезпечить енергозбереження в електроприводі, і навпаки.

Розглянемо приклад застосування отриманих співвідношень до двигуна 4A180S4.

Додатково до даним двигуна 4A180S4, відомі: момент інерції ротора $J_{\text{рот}} = 0,19 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, кратності критичного $\lambda_k = 2,3$ і пускового $\lambda_{\text{пуск}} = 1,4$ моментів.

Умови рішення задачі:

- приведений момент інерції $J_{\text{прив}} = 1,2 \cdot 0,19 = 0,23 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
- моментом навантаження двигуна на неодруженому ходу $M_{\text{хх}}$ нехтуємо.

1. Розраховуємо середній момент двигуна при пуску:

$$M_{\text{ср}} = (M_{\text{пуск}} + M_k)/2 = (\lambda_{\text{пуск}} M_{\text{ном}} + \lambda_k M_{\text{ном}})/2 = \\ = (1,4 \cdot 143 + 2,3 \cdot 143) : 2 = 264,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Визначаємо граничний час холостого ходу:

$$t_{\text{хх}} = J_{\text{прив}} \omega_0 / M_{\text{ср}} + J_{\text{прив}} \omega_0^2 (1 + R_1/R_2') / 2K = \\ = 0,23 \cdot 157 : 264,5 + 0,23 \cdot 157^2 (1 + 0,219 : 0,112) : 2 \cdot 1117 = 7,6 \text{ с}.$$

Таким чином, якщо час роботи електроприводу на холостому ходу перевищує 7,6 с, то відключення двигуна приведе до економії електроенергії в електроприводі і системі електропостачання.

Відключення завжди доцільно при часі роботи двигуна на холостому ходу більше 10 с.

Економія енергії при перемиканні обмоток статора по схемі «треугольник—звезда»

Ефективним засобом енергозбереження в асинхронних електроприводах є зниження напруги, що підводиться до двигуна, при його роботі з малими навантаженнями або в режимі холостого ходу. При цьому відбувається зниження споживаної реактивної потужності і тим самим втрат в елементах системи електропостачання електроприводу, а при певних коефіцієнтах навантаження — і втрат потужності в двигуні.

Розглянемо приклад оцінки економічної ефективності даного способу енергозбереження.

Визначимо доцільність способу енергозбереження в електроприводі перемиканням обмоток двигуна АОЗ-315М-6УЗ, що працює з коефіцієнтом навантаження $k_n = 0,3$, з схеми «трикутник» на схему «зірка». Номінальні дані двигуна: $P_{ном} = 132$ кВт; $U_{ном} = 380/660$ В; $s_{ном} = 0,017$; $I_{Iном} = 138$ А; $\cos\varphi_{ном} = 0,9$; $\sin\varphi_{ном} = 0,44$; $\eta_{ном} = 93,5\%$; $лм = Мк/Мном = 2,6$; $p = 3$; $f_{1ном} = 50$ Гц.

Умови рішення задачі:

- час роботи двигуна з вказаним коефіцієнтом навантаження в році складає $T_p = 1\,500$ ч;
- даний спосіб енергозбереження реалізується створенням релейно-контакторної схеми перемикання обмоток з використанням чотирьох контакторів. Для схеми вибираються контактори змінного струму типу КТ6022 на номінальний струм 160 А за ціною 2022 грн. за штуку (з урахуванням ПДВ за станом на квітень 2012 р.);
- витрати на транспорт, монтажні і пуско-налагоджувальні роботи приймаються у розмірі 60 % від вартості контакторів;

- коефіцієнт амортизаційних відрахувань не приймається у розмірі 10%;
- чисельність і зарплата обслуговуючого персоналу після модернізації не змінюються;

- тариф на електроенергію C_0 рівний 1,3 грн/кВт*год.

1. Визначаємо швидкість ідеального холостого ходу і номінальні кутову швидкість і момент:

$$\begin{aligned}\omega_0 &= 2\pi f_1 / p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 : 3 = 104,7 \text{ рад/с;} \\ \omega_{\text{ном}} &= \omega_0 (1 - s_{\text{ном}}) = 104,7 (1 - 0,017) = 103 \text{ рад/с;} \\ M_{\text{ном}} &= P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}} = 132\,000 : 103 = 1\,282 \text{ Н} \cdot \text{м.}\end{aligned}$$

2. Розрахунковий номінальний приведений струм ротора:

$$I'_{2\text{ном}} \approx I_{1\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}} = 138 \cdot 0,9 = 124 \text{ А.}$$

3. Знаходимо струм намагнічення двигуна:

$$\begin{aligned}I_{\mu} &\approx I_{1\text{ном}} (\sin \varphi_{\text{ном}} - \cos \varphi_{\text{ном}} / (\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1})) = \\ &= 138 (0,44 - 0,9 / (2,6 + \sqrt{2,6^2 - 1})) = 36 \text{ А.}\end{aligned}$$

4. Використовуючи вираз для втрат потужності в роторі $V_2 = I'^2_{22} R'_2 = M \omega_0 s$, записане для номінального режиму, знаходимо приведений активний опір ротора:

$$R'_2 = M_{\text{ном}} \omega_0 s_{\text{ном}} / 3 I_{2\text{ном}}^2 = 1\,282 \cdot 104,7 \cdot 0,017 : 3 \cdot 124^2 = 0,05 \text{ Ом.}$$

5. Розраховуємо реактивну потужність в номінальному режимі:

$$Q_{\text{ном}} = 3 U_{\text{ф}} I_{\text{ном}} \sin \varphi_{\text{ном}} = 3 \cdot 380 \cdot 138 \cdot 0,44 = 69\,221 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

6. Розраховуємо реактивну потужність холостого ходу:

$$Q_0 = m P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 0,31 \cdot 132\,000 : 0,935 = 43\,764 \text{ В} \cdot \text{А,}$$

де $m = 2,2 - 2,1 \cos \varphi_{\text{ном}} = 2,2 - 2,1 \cdot 0,9 = 0,31$.

7. З виразу для номінальної реактивної потужності

$$Q_{\text{ном}} = 3 U_{\text{ф}} I_{\text{н}} + M_{\text{ном}} \omega_0 s_{\text{ном}} X_{\text{к.з}} / R'_2 = Q_0 + \Delta Q_{\text{ном}}$$

знаходимо $X_{\text{к.з}}$:

$$\begin{aligned} X_{\text{к.з}} &= R'_2 (Q_{\text{ном}} - Q_0) / (M_{\text{ном}} \omega_0 s_{\text{ном}}) = \\ &= 0,05 \cdot (69\,221 - 43\,764) : 1\,282 \cdot 104,7 \cdot 0,017 = 0,55 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

8. Визначаємо активний опір ланцюгу статора, використовуючи формулу для критичного моменту асинхронного двигуна:

$$M_k = 3U_{\phi}^2 / 2\omega_0 (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{k.3}^2}).$$

Виражаючи з неї R_1 , як шукану величину, знаходимо:

$$\begin{aligned} R_1 &= ((3U_{\phi}^2 / 2\omega_0 M_k)^2 - X_{k.3}^2) / (2(3U_{\phi}^2 / 2\omega_0 M_k)) = \\ &= ((3 \cdot 380^2 : 2 \cdot 104,7 \cdot 2,6 \cdot 1282)^2 - 0,55^2) : \\ &: (2(3 \cdot 380^2 : 2 \cdot 104,7 \cdot 2,6 \cdot 1282)) = 0,07 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

9. Визначаємо повні номінальні втрати:

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}}) / \eta_{\text{ном}} = 132\,000(1 - 0,935) : 0,935 = 9\,176 \text{ Вт.}$$

10. Знаходимо змінні номінальні втрати:

$$\begin{aligned} V_{\text{ном}} &= V_{1\text{ном}} + V_{2\text{ном}} = 3I_{1\text{ном}}^2 R_1 + 3I_{2\text{ном}}'^2 R_2' = \\ &= 3 \cdot 138^2 \cdot 0,07 + 3 \cdot 124^2 \cdot 0,05 = 6\,306 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

11. Знаходимо постійні втрати потужності

$$K = \Delta P_{\text{ном}} - V_{\text{ном}} = 9\,176 - 6\,306 = 2\,870 \text{ Вт.}$$

12. Розраховуємо по формулі (2.18) зниження реактивної потужності при перемиканні обмоток статора з схеми «трикутник» на схему «зірка»:

$$\begin{aligned}\Delta Q_{\Delta-Y} &= Q_{\Delta} - \Delta Q_Y = 2Q_0/3 - 2k_H^2 \Delta Q_{\text{ном}} = \\ &= 2 \cdot 43\,764 : 3 - 2 \cdot 0,3^2 \cdot 25\,456 = 24\,594 \text{ В} \cdot \text{А}.\end{aligned}$$

13. Розраховуємо по формулі зниження активної потужності при перемиканні обмоток статора з схеми «трикутник» на схему «зірка»:

$$\begin{aligned}\Delta(\Delta P_{\Delta-Y}) &= \Delta P_{\Delta} - \Delta P_Y = 2\Delta P_0/3 - 2k_H^2 \Delta P_{\text{ном}} = \\ &= 2 \cdot 3\,859 : 3 - 2 \cdot 0,3^2 \cdot 9\,176 = 921 \text{ Вт}.\end{aligned}$$

14. Сумарне зниження втрат потужності складе:

$$\Delta P_{\text{эк}} = k_{\text{п}} \Delta Q_{\Delta-Y} + \Delta(\Delta P_{\Delta-Y}) = 0,1 \cdot 24\,594 + 921 = 3\,381 \text{ Вт},$$

де k_H — коефіцієнт зниження втрат потужності, що отримується від зниження реактивної потужності Q , кВт/квар.

15. Строк окупності, років:

$$\begin{aligned}T_{\text{ок}} &= \Pi_{\text{конт}} / (T_p c_{\text{э}} \Delta P_{\text{эк}} - p_a \Pi_{\text{конт}}) = \\ &= 1,6 \cdot 4 \cdot 2\,022 : (1\,500 \cdot 1,3 \cdot 3,381 - 0,1 \cdot 4 \cdot 2\,022) = 2,2\end{aligned}$$

Економія енергії при заміні малоавантажених двигунів

Аналіз роботи електроприводів, що діють, показує, що більшість приводних двигунів мають завищену номінальну потужність в порівнянні з тією, яка потрібна від електроприводу для реалізації технологічного

процесу. У європейській практиці прийнято вважати, що коефіцієнт навантаження (коефіцієнт використання) двигунів кн визначуваний відношенням потужності навантаження двигуна P_c до його номінальної потужності $P_{ном}$ складає величину порядку 0,6. У нашій країні цей коефіцієнт ще нижче і лежить в межах (0,3...0,5)*.

Розглянемо приклад визначення навантаження недовантаженого двигуна, при якому доцільна його заміна на двигун меншої потужності.

Визначимо оптимальне навантаження двигуна типу 4A180S4 і навантаження, при якому економічно доцільна його заміна на двигун меншої потужності.

Двигун 4A180S4 має наступні номінальні дані: потужність $P_{ном} = 22$ кВт; напруга 380/220 В; ковзання $s_{ном} = 0,02$; струм статора $I_{1ном} = 41,2$ А; ККД $\eta_{ном} = 90 \%$; $\cos \varphi_{ном} = 0,87$; активні опори обмоток статора $R_1 = 0,219$ Ом і приведені ротора $R_2 = 0,112$ Ом. Ціна двигуна 4A180S4 за станом на 2005 р. складає $C_{уст} = 19\,311$ грн; нормативний термін служби (термін амортизації) $T_{сл} = 20$ років; термін служби до модернізації $T_r = 15$ років; норма амортизації $\rho_a = 6,4 \%$ у рік.

Умови рішення задачі:

- двигуни меншої потужності;
- як тариф на електроенергію приймається одноставочный тариф рівний $1,11$ грн/кВт · год;
- заробітна плата обслуговуючого персоналу після модернізації не змінюється;
- витрати на демонтаж двигуна, що діє, не враховуються;
- витрати на транспортування, монтаж і пуско-налагоджувальні роботи нового двигуна приймаються у розмірі 35% його вартості;

• замінюваний двигун стає резервним на підприємстві, і його ліквідаційна вартість рівна нулю.

1. Визначаємо швидкість холостого ходу, номінальну швидкість і момент двигуна 4A180S4:

Таблиця Б.1. Значення $k_{н.опт}$ при різних відносинах при різних відносинах $K/V_{ном}$

$K/V_{ном}$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
$k_{н.опт}$	0,32	0,55	0,71	0,84	0,95

$$\begin{aligned}\omega_0 &= 2\pi f_1/p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 : 2 = 157 \text{ рад/с}; \\ \omega_{ном} &= \omega_0(1 - s_{ном}) = 157(1 - 0,02) = 154 \text{ рад/с}; \\ M_{ном} &= P_{ном}/\omega_{ном} = 22\,000 : 154 = 143 \text{ Н} \cdot \text{м}.\end{aligned}$$

2. Знайдемо для номінального режиму повні, змінні і постійні втрати потужності:

$$\begin{aligned}V_{ном} &= M_{ном}\omega_0 s_{ном}(1 + R_1/R_2') = \\ &= 143 \cdot 157 \cdot 0,02(1 + 0,219 : 0,112) = 1\,327 \text{ Вт}; \\ \Delta P_{ном} &= P_{ном}(1 - \eta_{ном})/\eta_{ном} = 22\,000(1 - 0,9) : 0,9 = 2\,444 \text{ Вт}; \\ K &= \Delta P_{ном} - V_{ном} = 2\,444 - 1\,327 = 1\,117 \text{ Вт}.\end{aligned}$$

3. Оптимальне навантаження двигуна :

$$k_{н.опт} = \sqrt{K/V_{ном}} = \sqrt{1\,117 : 1\,327} = 0,92.$$

4. ККД двигуна при цьому навантаженні складе:

$$\eta = k_H P_{\text{ном}} / (k_H P_{\text{ном}} + K + k_H^2 V_{\text{ном}}) =$$

$$= 0,92 \cdot 22\,000 / (0,92 \cdot 22\,000 + 1\,117 + 0,92^2 \cdot 1\,327) = 0,903.$$

5. Визначаємо залишкову вартість встановленого двигуна, грн:

$$\Pi_{\text{ост}} = \Pi_{\text{уст}} (1 - T_p / T_{\text{сл}}) = 19\,311 (1 - 15 : 20) = 4\,825$$

6. Визначаємо терміни окупності при заміні цього двигуна для коефіцієнтів навантаження $k_H = 0,25; 0,5; 0,75$ і часу роботи двигуна в рік $T_p = 1\,500, 3\,000, 4\,500$ і $6\,000$ год.

Відповідно до умов рішення задачі $З_{\text{дем}} = З_{\text{тр}} + З_{\text{монт}} + З_{\text{нал}} = 1,35 \Pi_{\text{нов}}$.

Термін окупності розраховуємо по формулі:

$$T_{\text{ок}} = (1,35 \Pi_{\text{нов}} + 4\,825) / (1,3 T_p \Delta P_{\text{экон}} + 0,064 (19\,311 - \Pi_{\text{нов}}^*)).$$

Результати розрахунку приведені в табл. Б.2.

Таблиця Б.2. Дані за розрахунком терміну окупності при заміні двигуна

Показник	Розрахункова формула	К _н = 0,25	К _н = 0,5	К _н = 0,75
Потужність навантаження при даному k_n кВт	$P_c = k_n P_{ном}$	5,5	11	15,4
Втрати потужності в замінюваному двигуні, кВт	$\Delta P = K + M_c \omega_p s_c \times (1 + R_1/R_2)$	1,2	1,45	1,87
Двигун для заміни	Серия АИР	112М4	132М4	160S4
Втрати потужності в новому двигуні в номінальному режимі, кВт	$\Delta P_{ном} = P_{ном}(1 - \eta_{ном})/\eta_{ном}$	0,933	1,071	1,668
Ціна нового двигуна, грн	—	4 584	6 985	12 860
Зниження втрат потужності при заміні, кВт	$\Delta P_{экон} = \Delta P - \Delta P_{ном}$	0,267	0,378	0,2
Термін окупності при $Tr = 1\,500$ ч в год	$T_{ок} = (1,35C_{нов} + 4\,825) : (1,3Tr\Delta P_{экон} + 0,064 \times (19\,311 - C_{нов})^*)$	7,5	9,3	27,3
Строк окупности при $Tr = 3\,000$ ч в год		5,6	6,3	18,6
Строк окупности при $Tr = 4\,500$ ч в год		4,4	4,8	14

Продовження таблиці Б.2

Показник	Розрахункова формула	$K_n = 0,25$	$K_n = 0,5$	$K_n = 0,75$
Строк окупності при $T_p = 6\,000$ ч в год		3,6	3,8	11,2

Як видно з отриманих даних, відносно прийнятний термін окупності виходить при $k_n = 0,25$ і $T_p = 6000$ год, що відповідає наявним в технічній літературі рекомендаціям.

Уточнення розрахунку терміну окупності може бути виконане за рахунок обліку втрат потужності в системі електропостачання і ліквідаційної вартості замінюваного двигуна. Облік цих чинників приведе до деякого зниження терміну окупності. Наприклад, якщо замінюваний двигун буде після демонтажу реалізований (проданий) за своєю залишковою вартістю, то термін окупності установки нового двигуна АІР112М4 при $k_n = 0,25$ і $T_p = 6000$ год складе приблизно два роки.

Енергозберігаючі двигуни

Один з шляхів підвищення економічності наймасовішого нерегульованого асинхронного електроприводу потужністю 0,3 — 400 кВт зв'язаний з використанням енергозберіжливих двигунів. У таких двигунах за рахунок збільшення маси активних матеріалів (міді і сталі), застосування високоякісної ізоляції, а також оптимізації конструкції знижуються втрати

енергії, і внаслідок цього відбувається підвищення їх ККД на декілька відсотків.

Оцінимо економічну доцільність застосування енергозбережного двигуна типу 5AM315S6e з номінальною потужністю $P_{\text{ном}} = 110$ кВт при показнику $e = 0,2$ для електроприводу, що працює в номінальному режимі протягом $T_p = 1\ 500, 3000$ і 4500 год в рік.

Двигун стандартного виконання 5AM315S6 має номінальний ККД $\eta_{\text{ст}} = 0,95$ і вартість (з урахуванням ПДВ за станом на 2005 р.) 103 641 грн

Прийняти, що тариф на електроенергію складає $C_0 = 1,13$ грн./кВт-год, а коефіцієнт амортизації складає 6,4%, тобто $p_a = 0,064$.

1. ККД енергозбережного двигуна 5AM315S6e відповідно складе $\eta_{\text{ст}} = 0,965$.

2. Коефіцієнт здорожчання відповідно буде рівний $k_{\text{уд}} = 1,2$, ціна енергозбережного двигуна при цьому складе $C_{\text{ес}} = 124\ 369$ грн, а різниця цін $\Delta C = 20728$ грн

3. Економія енергії за рік при використанні енергозбережного двигуна розраховується, що приймає при роботі з номінальним навантаженням наступний вигляд:

$$\Delta \mathcal{E} = P_{\text{ном}} T_p (1/\eta_{\text{ст}} - 1/\eta_{\text{эс}}),$$

а час окупності за відсутності обліку зміни витрат на амортизацію визначається по формулі

$$T_{\text{ок}} = \Delta C / (c_{\text{э}} \Delta \mathcal{E} - p_a \Delta C).$$

У табл. Б.3 представлені результати розрахунків по цих формулах.

Таблиця Б.3. Термін окупності при використанні енергозберігаючого двигуна

Тр, ч	1500	3 000	4 500	6 000
$\Delta \mathcal{E}$, кВт-ч	1 809	3618	5 427	7236
Ток, г	20	4,7	3,6	2,6

За даними, термін окупності енергозберігаючих двигунів складає 2 — 3 року, при цьому для потужних двигунів він менший, оскільки ці двигуни мають велике річне напрацювання і вищий коефіцієнт завантаження.

Найпоширеніші марки перетворювачів частоти

Частотний перетворювач Siemens SINAMICS V20 6SL3210-5BE24-0UV0
4 кВт/3 фаз



ОВК КОМПЛЕКТ

(044) 364-72-59

Технічні характеристики SINAMICS V20

Тормозные резисторы			Сетевые дроссели				Выходные дроссели				Модуль торможения				ЭМС-фильтр						
Р _{ном} кВт	FS	Ш	В	Г	Вес	Ш	В	Г	Вес	Ш	В	Г	Вес	Ш	В	Г	Вес				
1AC 220B	A	72	230	43,5	1	75,5	200	50	1,4	75	200	50	1,3	90	150	80	0,71	73	200	43,5	0,5
	B	149	239		1,6	150	213		2,2	150	213	80	4,1					149	213	50,5	1
	C																				
3AC 400 B		185	285	150	3,8	185	245		5,1	185	245		6,6								
	A	72	230	43,5	1	75,5	200	50	0,8	75,5	200	110	2	90	150	80	0,71	73	202	65	1,75
	B	149	239	43,5	1,6	150	213	50	1,3	150	213	70	3,4					100	297	85	4
	C	185	285	150	3,8	185	280	50	2,3	150	213	80	5,6	встроен				140	359	95	7,3
	D																				
			270	515	175	7,4															
15																					Активация Window



Перетворювач частотний ABB ACS580 55 кВт 3-фазний

Характеристики

Потужність, кВт	55
Панель управління	В комплекті
Захист, клас	IP21
Тип управління	вектор
Фазність	3 фаз - 380 В
Висота x Ширина x Глибина, мм	726x252x369
Вхідна фазність	3-ф/380
Вихідна фазність	3-ф/380
Вихідна частота, Гц	500
Робоча температура, °C	0 +50
Серія	ACS580
Гарантія, міс	12



Частотний перетворювач ATV212HU75N4 Schneider Electric Altivar 212 7,5 кВт 3-фаз.

Характеристики

Струм, А	16
Потужність, кВт	7.5
Панель управління	В комплекті
Захист, клас	IP20
Тип управління	вектор
Фазність	3 фаз - 380 В
Вхідна фазність	3-ф/380
Вихідна фазність	3-ф/380
Вихідна частота, Гц	500
Робоча температура, °C	0 +50
Серія	ATV212
Гарантія, міс	12