

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри КСУ  
\_\_\_\_\_ Петро ЛЕОНТЬЄВ  
\_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
освітньо-професійної програми

«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»

на тему: «Частотне керування електроприводом компресорної станції  
DANFOSS VSH170»

Здобувача групи СУ.мдн-21п Вінчури Олександра Вікторовича  
Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання  
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ Вінчура Олександр Вікторович  
(підпис)

Керівник: доцент каф. КСУ, доцент, к.ф.-м.н. В'ячеслав ЖУРБА  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

\_\_\_\_\_ Петро ЛЕОНТЬЄВ  
\_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу магістра здобувачу вищої освіти

Вінчурі Олександр Вікторовичу  
(Прізвище, ім'я, по-батькові повністю)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Частотне керування електроприводом компресорної станції DANFOSS VSH170

затверджена наказом ректора СумДУ № 1227-VI від " 06 " 11 2023 р.

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 15 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Завдання кафедри, технічний опис електроприводу компресорної станції DANFOSS VSH170, вимоги до системи автоматизації компресорної станції DANFOSS VSH170, звіт з переддипломної практики, джерела інформації відкритого доступу

4. Зміст кваліфікаційної роботи (питання, що підлягають розробленню):

Загальні відомості про частотне регулювання електроприводу. Система управління компресорної станції DANFOSS VSH170 з частотним регулюванням. Дослідження базових законів частотного регулювання. Комбінований закон частотного регулювання.

5. Перелік графічних матеріалів: 1. Система керування компресорною станцією Danfoss з ПЧ CDS312. Схема структурна

2. Перетворювач частоти CDS312.

Схема принципова. 3. Система керування компресорною станцією Danfoss з ПЧ

CDS312. Схема підключення зовнішніх проводок. 4. Перетворювач частоти

CDS312. Таблиця з'єднань і підключень.

## 6. Календарний план виконання роботи

Номер етапу	Зміст етапу виконання роботи	Термін виконання
1	Аналіз завдання кафедри. Підбір та аналіз джерел інформації	19.10.23- 29.10.23
2	Аналіз загальних відомостей про частотне регулювання електроприводу	30.10.23- 05.11.23
3	Побудова системи управління компресорної станції DANFOSS VSH170 з частотним регулюванням	06.11.23- 18.11.23
4	Дослідження базових законів частотного регулювання	19.11.23- 22.11.23
5	Виведення та дослідження комбінованого закону частотного регулювання	23.11.23- 25.11.23
6	Розробка графічної частини	26.11.23- 30.11.23
7	Оформлення та здача роботи керівнику	01.12.23- 14.12.23

7. Дата видачі завдання " 18" 10. 2023 р.

Керівник проекту:

доцент каф. КСУ , доцент, к.ф.-м.н.  
(науковий ступінь, вчене звання, посада)

\_\_\_\_\_ (підпис)

В'ячеслав Журба  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач:

студент гр. СУ.мдн-21п  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Олександр ВІНЧУРА  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## АНОТАЦІЯ

Вінчура Олександр Вікторович. Частотне керування електроприводом компресорної станції DANFOSS VSH170. Кваліфікаційна робота магістра. Сумський державний університет. Суми, 2023 р.

Робота містить 77 сторінок, 19 рисунків, 15 таблиць, 5 додатків; конструкторську документацію, яка містить 4 креслення. При виконанні магістерської роботи було використано 26 літературних джерел.

Проведено моделювання електродвигуна з короткозамкненим ротором із застосуванням перетворювача частоти, а також компресорної станції на базі спірального компресора Danfoss VSH170 із частотним регулюванням. Запропонований закон частотного регулювання, який є лінійною комбінацією трьох відомих базових законів із змінними параметрами. Гнучкість закону, а також його здатність приймати властивості базових законів із одночасним покращенням співвідношення прямих показників якості перехідних процесів, підтвержені моделюванням у програмному середовищі Matlab. Основним результатом роботи є створення комбінованого закону частотного регулювання, який робить перспективною побудову адаптивних систем із частотним регулюванням.

Ключові слова: спіральний компресор, асинхронний електродвигун, перетворювач частоти, частотне регулювання, базові закони, комбінований закон, структурна модель, динамічні характеристики, перехідний процес, кутова швидкість обертання.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	4
ВСТУП .....	5
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЧАСТОТНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ .....	7
1.1. Актуальність частотного регулювання електроприводу .....	7
1.2. Загальний опис частотних перетворювачів і області їх застосування .....	15
1.3. Основні закони частотного регулювання .....	24
Висновки до розділу 1 .....	24
2 СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ DANFOSS VSH170 З ЧАСТОТНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ .....	27
2.1. Основні характеристики станції .....	27
2.2. Структурна схема системи з частотним регулюванням .....	31
2.3. Прилади й елементна база системи .....	32
Висновки по розділу 2 .....	36
3 ДОСЛІДЖЕННЯ БАЗОВИХ ЗАКОНІВ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....	37
3.1. Узагальнена модель асинхронної машини .....	37
3.2. Структурна модель асинхронного двигуна в обертовій системі координат.....	39
3.3. Структурна модель перетворювача частоти .....	42
3.4. Розрахунок параметрів структурної моделі асинхронного двигуна .....	46
3.5. Моделювання системи АД-ПЧ з базовими законами частотного регулювання.....	51
Висновки по розділу 3 .....	54
4 КОМБІНОВАНИЙ ЗАКОН ЧАСТОТНОГО РЕГУЛЮВАННЯ .....	56
4.1. Загальне обґрунтування математичної структури комбінованого закону частотного регулювання .....	56
4.2. Комбінований закон частотного регулювання на структурній моделі ПЧ .....	57

4.3. Моделювання системи АД-ПЧ з комбінованим законом частотного регулювання .....	60
4.4. Частотне регулювання компресорної станції на прикладі каналу тиску .....	65
Висновки по розділу 4 .....	70
ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ .....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75
Додаток А. Конструкторська документація	
Додаток Б. Основні особливості компресора і схема установки ПЧ	
Додаток В. Схеми і результати дослідження базових законів частотного регулювання	
Додаток Г. Результати дослідження комбінованого закону частотного регулювання	
Додаток Д. Схема і результати дослідження компресорної станції з частотним регулюванням	

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

САУ - система автоматичного управління

АСУ - автоматизована система управління

ПЛК - програмований логічний контролер

КС - компресорна станція

ЕМС - електромеханічна сумісність

ПЧ - перетворювач частоти

ДПЧ - дволанковий перетворювач частоти

БПЧ - безпосередній перетворювач частоти

АІН - автономний інвертор напруги

АІС - автономний інвертор струму

ЕМ - електрична машина

КВ - керований випрямляч

СУВ - система управління випрямлячем

СУІ - система управління інвертором

БЖ - блок живлення

## ВСТУП

Головною частиною будь-якого холодильного обладнання та морозильного обладнання, яке використовується в промисловості і в багатьох галузях народного господарства і відповідає за створення середовища, температура якої нижче навколишньої, є холодильний компресор. Разом з двигуном, який приводить холодильний компресор в робочий стан, вони забезпечують стиснення і перерозподіл пара, одержуваного з холодоагенту.

Серед електричних двигунів, використовуваних для холодильних компресорів, найбільшого поширення набули асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, які відрізняються простотою конструкції, низькою вартістю і високою надійністю, а також простотою в обслуговуванні і експлуатації. Однак вони мають ряд недоліків: малий пусковий і великий спусковий струм, чутливість до змін параметрів в мережі, а найголовніше - незмінність частоти обертання двигуна при зміні навантаження, що призводить до великого споживання енергії і швидкого зношування двигуна і виконавчих механізмів системи. Щоб усунути ці недоліки, застосовуються різні методи, а найефективнішим і оптимальним є метод частотного регулювання, в основі якого лежить частотний перетворювач. Він змінює напругу живлення і частоту, що подаються на двигун, за заздалегідь визначеним законом, який підбирається для конкретного об'єкта управління. У базових законів частотного регулювання, зокрема, у квадратичного, який застосовується для компресорних станцій, є ряд недоліків, тому є перспективним використання комбінованого закону з метою посилення переваг і ослаблення недоліків базових законів.

Об'єктом магістерської роботи є компресорна станція з частотним регулюванням на базі спірального компресора.

Предметом магістерської роботи є дослідження та моделювання електродвигуна компресорної станції з частотним регулюванням.

Мета магістерської роботи:



1. Провести дослідження трьох базових законів частотного регулювання - лінійного, квадратичного та кореневого - на моделі електродвигуна компресорної станції з частотним перетворювачем.
2. Вивести комбінований закон, результати дослідження якого порівняти з результатами дослідження базових законів. Зробити висновки про доцільність використання комбінованого закону регулювання.

Для досягнення мети були виконані наступні завдання:

- 1) Побудовано структурну модель електродвигуна з перетворювачем частоти на основі відомих математичних законів.
- 2) Побудовано та проаналізовано динамічні характеристики електродвигуна, а також природні та штучні характеристики при застосуванні базових законів частотного регулювання і при різних режимах зміни частоти.
- 3) Обґрунтована і складена математична структура комбінованого закону частотного регулювання і досліджена його робота при різних параметрах. Проведено порівняння результатів з тими, що отримані при застосуванні базових законів, і зроблені висновки про вплив комбінованого закону на зміну швидкості і критичного моменту, а також на співвідношення прямих показників якості з часом перехідного процесу.
- 4) Проведено моделювання компресорної станції з частотним регулюванням, а також досліджено роботу базових законів і комбінованого на прикладі каналу тиску.

# 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЧАСТОТНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

## 1.1 Актуальність частотного регулювання електроприводом

Електродвигуни є вбудованими елементами робочих вузлів техніки, і саме вони забезпечують їм правильну роботу. Неважливо, чи це складське обладнання чи пральна машина - ці пристрої ніяк не зможуть обійтися без використання електромотора і найчастіше в даний час для цього застосовуються саме асинхронні електродвигуни.

Електродвигуни цього типу на сьогоднішній день мають досить велику область застосування, чим вони зобов'язані, перш за все, своїм робочим характеристикам. Справа в тому, що їх особливістю є практично повна незалежність частоти обертання валу від навантаження на нього.

Асинхронні електродвигуни складаються з двох частин: ротора і статора. Внутрішня його частина називається ротор, ця частина обертається і несе на собі обмотку. Зовнішня частина являє собою корпус двигуна і називається статор, вона нерухома, всередині неї є спеціальні пази (магнітопровід), куди пофазно покладені витки (секції) обмоток (статорна обмотка). Фази статорних обмоток можуть бути з'єднані «зіркою» або «трикутником».

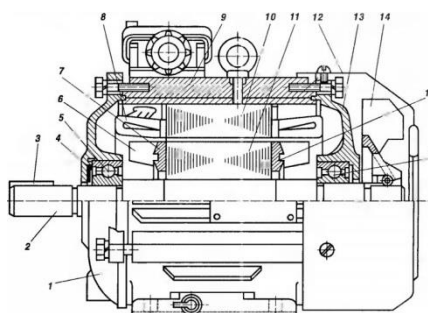


Рисунок 1.1 - Асинхронний електродвигун єдиної серії 4А: 1, 13 - передній і задній щити; 2 - вал; 3 - шпонка; 4 - установча пружина; 5 - підшипник; 6 - крильчатка; 7 - 11 - сердечники статора і ротора; 12 - кожух вентилятора; 14 - вентилятор; 15 – вантаж балансування

Збираються обидві ці частини з ізольованих листів штампованої сталі товщиною близько 0,35-0,5 мм. Для надпотужних машин зазор між ротором і статором робиться якомога менше, близько 1-1,5 мм, в малопотужних двигунах ще менше. Вал обертається в підшипниках, розташованих в підшипникових щитах.

Розглянемо види асинхронних двигунів і їх будову. Залежно від конструкції ротора, асинхронні двигуни можна розділити на два види: з короткозамкненим та фазним ротором. Головна відмінність цих видів електродвигунів складається тільки з будови ротора.

Принцип дії асинхронних електродвигунів наступний: напруга живлення подається на статорну обмотку, утворюючи обертове магнітне поле, що, в свою чергу, впливаючи на обмотку ротора (стрижнів), наводить в ній ЕРС, що створює електричний струм.

В результаті взаємодії магнітного поля стрижнів, що викликається цим електричним струмом, з магнітним полем статора і утворюється сила, що створює обертовий електромагнітний момент, тобто обертання ротора.

Частота обертання валу асинхронних електродвигунів залежить, перш за все, від кількості пар полюсів, що визначаються кількістю котушок на кожен фазу. Так, три котушки обмотки створюють двополюсне магнітне поле (одну пару полюсів). При стандартній частоті 50 Гц швидкість обертання ротора буде близько 3000 об/хв. При збільшенні магнітного поля по полюсах знижується швидкість обертання ротора, наприклад, магнітне поле при шести полюсах має швидкість в три рази менше, ніж у двополюсного.

*1.1.1 Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором.* Складається (рис. 1.2 і 1.3) з наступних основних частин: статор з трифазною обмоткою, ротор з короткозамкненою обмоткою і остов. Обмотка ротора виконана безконтактною (вона не з'єднана з жодним зовнішнім колом), що визначає високу надійність такого двигуна.

Асинхронна машина на відміну від машини постійного струму не має явно виражених полюсів. Таку магнітну систему називають неявнополюсною.

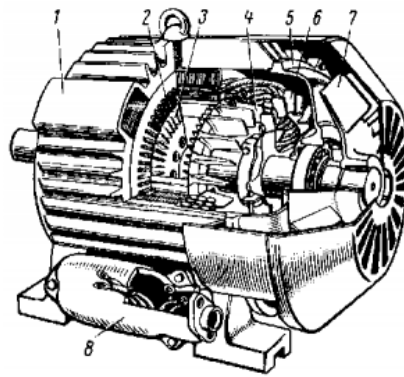


Рисунок 1.2 - Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором: 1 - остов; 2 - статор; 3 - ротор; 4 - стрижні обмотки ротора; 5 - підшипниковий щит; 6 - вентиляційні лопатки ротора; 7 - вентилятор; 8 - коробка виводів

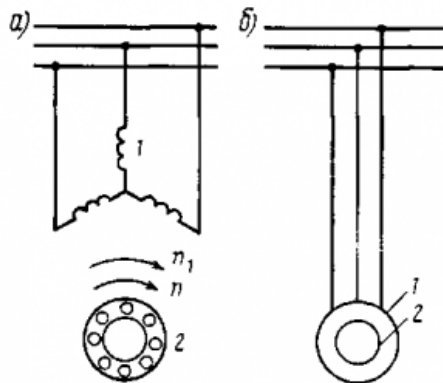


Рисунок 1.3 - Електрична схема асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (а) і його умовне графічне зображення (б): 1 - статор; 2 – ротор

Число полюсів в машині визначається числом котушок в обмотці статора і схемою їх з'єднання. У чотирьополісній машині магнітна система складається з чотирьох однакових гілок, по кожній з яких проходить половина магнітного потоку  $\Phi_{\text{п}}$  одного полюса, в двополісній машині таких гілок дві, в шестиполісній - шість і т. д. Так як через всі елементи магнітної системи проходить змінний магнітний потік, то не тільки ротор 1, але і статор 2 виконують з листів електротехнічної сталі, ізолюваних один від іншого ізоляційною лаковою плівкою, окалиною та ін.

В результаті цього зменшується шкідливий вплив вихрових струмів, що виникають в сталі статора і ротора при обертанні магнітного поля. Листи статора і

ротора мають пази відкритої, напівзакритої або закритої форми, в яких розташовуються провідники відповідних обмоток. У статорі найчастіше застосовують напівзакриті пази прямокутної або овальної форми, в машинах великої потужності - відкриті пази прямокутної форми.

Сердечник статора запресовують в литий остов і зміцнюють стопорними гвинтами. Сердечник ротора напресовують на вал ротора, який обертається в кулькових підшипниках, встановлених в двох підшипникових щитах. Повітряний зазор між статором і ротором має мінімальний розмір, що допускається з точки зору точності складання і механічної жорсткості конструкції. У двигунах малої та середньої потужності повітряний зазор зазвичай становить кілька десятків міліметра. Такий зазор забезпечує зменшення магнітного опору магнітного кола машини, а, отже, і зменшення струму намагнічення, необхідного для створення в двигуні магнітного потоку. Зниження струму намагнічення дозволяє підвищити коефіцієнт потужності двигуна.

Обмотка статора виконана у вигляді ряду котушок з дроту круглого або прямокутного перерізу. Провідники, що знаходяться в пазах, з'єднуються, утворюючи ряд котушок. Котушки розбивають на однакові групи по числу фаз, які розташовують симетрично вздовж окружності статора (рис. 1.4, а) або ротора. У кожній такій групі всі котушки електрично з'єднуються, утворюючи одну фазу обмотки, тобто окреме електричне коло. При великих значеннях фазного струму або при необхідності перемикання окремих котушок фази можуть мати кілька паралельних гілок. Найпростішим елементом обмотки є виток (рис. 1.4, б), що складається з двох провідників 1 і 2, розміщених в пазах, що знаходяться один від одного на деякій відстані. Ця відстань приблизно дорівнює одному полюсного поділу, під яким розуміють довжину дуги, що відповідає одному полюсу.

Зазвичай витки, утворені провідниками, що лежать в одних і тих же пазах, об'єднують в одну або дві котушки. Іноді їх називають секціями. Їх укладають таким чином, що в кожному пазу розміщується одна сторона котушки або дві сторони - одна над іншою. Відповідно до цього розрізняють одно- і двошарові

обмотки. Основним параметром, що визначає розподіл обмотки по пазах, є число пазів  $q$  на полюс і фазу.

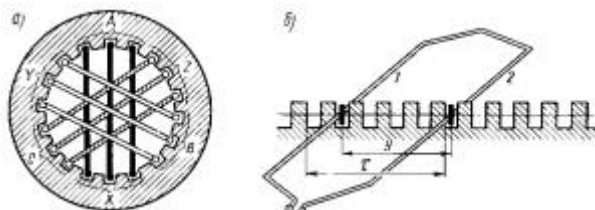


Рисунок 1.4 - Розташування котушок трифазної обмотки на статорі асинхронного двигуна (а) і виток з двох провідників (б)

В обмотці статора двополюсного двигуна (див. рис. 1.4, а) кожна фаза (А-Х; В-У; С-З) складається з трьох котушок, сторони яких розташовані в трьох суміжних пазах, тобто  $q = 3$ . Зазвичай  $q > 1$ , така обмотка називається розподіленою.

Короткозамкнені асинхронні двигуни з підвищеним пусковим моментом мають спеціальну конструкцію ротора (позначаються АП). До них відносяться двигуни з подвійною білячою кліткою і двигуни з глибокими пазами.

Ротор двигуна з подвійною білячою кліткою має дві короткозамкнені обмотки. Зовнішня клітина є пусковою. Вона володіє великим активним і малим реактивним опором. Внутрішня клітка є основною обмоткою ротора; вона, навпаки, має незначний активний і великий реактивний опір. У початковий момент пуску струм проходить, головним чином, по зовнішній клітці, яка створює значний крутний момент. У міру збільшення частоти обертання струм переходить у внутрішню клітку, і після закінчення процесу пуску машина працює як звичайний короткозамкнений двигун з однієї (внутрішньої) кліткою. Витіснення струму в зовнішню клітку в початковий момент пуску пояснюється дією ЕРС самоіндукції, індукованій в провідниках ротора. Чим нижче розташований в пазу провідник, тим більшим магнітним потоком розсіювання він охоплюється і тим більша ЕРС самоіндукції в ньому індукується, отже, тим більше він буде мати індуктивний опір.

Витіснення струму в верхні провідники ротора сильно позначається при нерухомому роторі, коли частота струму, індукованого в обох клітинах ротора, велика. При цьому індуктивні опори обох клітин значно більше активних і струм розподіляється між ними обернено пропорційно їх індуктивним опорам, тобто проходить в основному по зовнішній клітці з великим активним опором. У міру зростання частоти обертання ротора частота струму в ньому буде зменшуватися (обертове магнітне поле перетинатимуть провідники ротора з меншою частотою), і струм почне проходити по обидвом клітинам відповідно до їх активних опорів, тобто, головним чином, через внутрішню клітку.

Таким чином, процес пуску двигуна з подвійною білячою кліткою має схожість з процесом пуску асинхронного двигуна з фазним ротором, коли на початку пуску в коло обмотки ротора вводиться додатковий активний опір (пусковий реостат), а в міру розгону цей опір виводиться. Точно так само і в розглянутому двигуні струм на початку пуску проходить по зовнішній клітці з великим активним опором, а потім у міру розгону поступово переходить у внутрішню клітку з малим активним опором.

Для підвищення активного опору пускової клітини стрижні її виготовляють з маргацовистої латуні або бронзи. Стрижні робочої клітини виконують з міді, що володіє малим питомим опором, причому площа поперечного перерізу їх більше, ніж у пускової клітини. В результаті цього активний опір пускової клітки збільшується в 4-5 разів в порівнянні з робочою. Між стрижнями обох клітин є вузька щілина, розміри якої визначають індуктивність робочої клітини. Двоклітинний двигун на 20-30% дорожче короткозамкненого двигуна звичайної конструкції. Для спрощення технології виготовлення ротора двоклітинні двигуни невеликої та середньої потужності виконують з литою алюмінієвою кліткою.

Дія двигунів з глибокими пазами також заснована на використанні явища витіснення струму. У цих двигунах стрижні білячої клітини виконані у вигляді вузьких мідних шин, закладених в глибокі пази ротора (висота паза в 10- 12 разів більше його ширини). Нижні шари стрижнів, розташовані далі від поверхні ротора, охоплюються значно більшим числом магнітних ліній потоку

розсіювання, ніж верхні, тому вони мають у багато разів більшу індуктивність. На початку пуску в результаті збільшеного індуктивного опору нижніх частин стрижнів струм проходить, головним чином, по їхніх верхніх частин. При цьому використовується тільки невелика частина поперечного перерізу кожного стрижня, що призводить до збільшення його активного опору, а, отже, і до зростання активного опору всієї обмотки ротора.

При збільшенні частоти обертання ротора витіснення струму в верхні частини стрижнів зменшується (з тієї ж причини, що і в двигуні з подвійною білячою кліткою), і після закінчення пуску струм рівномірно розподіляється по площі їх поперечного перерізу.

*1.1.2 Асинхронний двигун з фазним ротором.* Застосовується (рис. 1.5 і 1.6) для приводу таких машин і механізмів, які пускаються в хід під навантаженням (крани, ліфти та ін.). У подібних приводах двигун повинен розвивати при пуску максимальний момент, що досягається за допомогою пускового реостата

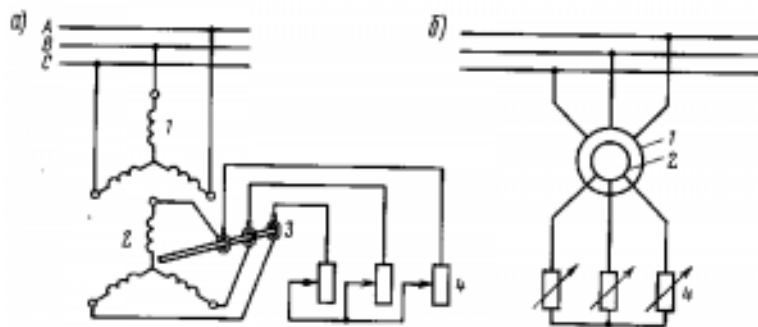


Рисунок 1.5 - Електрична схема асинхронного двигуна з фазним ротором (а) і його умовне графічне зображення (б): 1 - статор; 2 - ротор; 3 - контактні кільця зі щітками; 4 - пусковий реостат

У двигуні з фазним ротором статор виконаний так само, як і в двигуні з короткозамкненим ротором. На роторі ж розташована трифазна обмотка, що складається з трьох, шести, дев'яти і т. д. котушок (в залежності від числа полюсів машини), зсунутих одна відносно іншої на  $120^\circ$  (в двополюсній машині),  $60^\circ$  (в чотиріполюсній) і т. д. Числа полюсів обмоток статора і ротора беруться однаковими.



Обмотку фазного ротора зазвичай з'єднують «зіркою». Кінці її приєднують до трьох контактних кілець, до яких за допомогою щіток підключають трифазний пусковий реостат, тобто в кожен фазу ротора в момент пуску вводять додатковий активний опір.

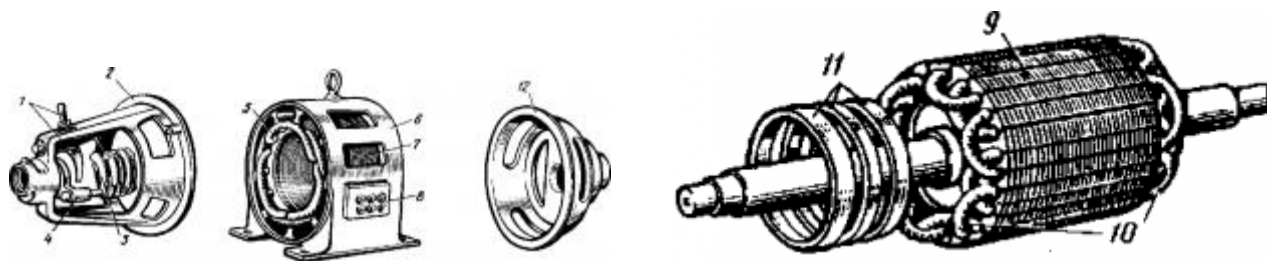


Рисунок 1.6 - Основні конструктивні вузли асинхронного двигуна з фазним ротором: 1 - пристосування для підйому щіток; 2, 12 - підшипникові щити; 3 - щіткотримачі; 4 - траверса; 5 - обмотка статора; 6 - остов; 7 - сердечник статора; 8 - коробка з виводами; 9 - сердечник ротора; 10 - обмотка ротора; 11 - контактні кільця

Для зменшення зносу контактних кілець і щіток двигуни з фазним ротором іноді постачають пристроями 1 (див. рис. 1.6) для підйому щіток і замикання кілець накоротко після виключення реостата.

Більшість використовуваних електричних двигунів є асинхронними, що мають короткозамкнений ротор. Їх широке застосування в першу чергу обумовлюється простотою в обслуговуванні, експлуатації, простотою конструкції, низькою вартістю і високою надійністю. Що стосується недоліків, то такі моделі мають малий пусковий і великий спусковий струм, чутливі до змін параметрів в мережі. Крім цього, асинхронні двигуни з мережі споживають реактивну потужність. Межа їх застосування визначається потужністю системи електропостачання певного підприємства. Більшість пускових струмів при малій потужності системи можуть створювати значні зниження напруги.

Основний недолік асинхронних електродвигунів - складність регулювання їх швидкості традиційними методами (змінюючи напругу живлення, введенням

додаткових опорів в коло обмоток). При використанні двигунів з фазним ротором можна знизити пусковий струм, тим самим збільшити пусковий момент, завдяки введенню пускових реостатів в коло ротора. Правда, через ускладнені конструкції і збільшення вартості застосування даних електродвигунів обмежене. В основному їх застосовують як приводи механізмів з важкими пусковими умовами.

Регулювання частоти обертання виконавчих механізмів можна здійснювати за допомогою різних пристроїв: механічних варіаторів, гідравлічних муфт, резисторами, що додатково вводяться в статор або ротор, електромеханічними перетворювачами частоти, статичними перетворювачами частоти. Застосування перших чотирьох пристроїв не забезпечує високої якості регулювання швидкості, неекономічне, вимагає великих витрат при монтажі та експлуатації. Перетворювачі частоти є найбільш досконалими пристроями управління асинхронним приводом в даний час, таким чином, їх застосування при роботі з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором є актуальним. Завдяки йому знижується значення пускових струмів, збільшується плавність пуску, розгін двигуна проводиться без механічних ударів. Отже, в системі з асинхронним електроприводом знижується навантаження на двигун і пов'язані з ним передавальні механізми, збільшується термін їх експлуатації, підвищується надійність системи і знижуються експлуатаційні витрати. При використанні перетворювачів частоти відпадає необхідність в пусковій апаратурі, обладнанні захисту електродвигуна і компенсації реактивної потужності, не потрібні зовнішні електровимірні прилади (амперметри, вольтметри, лічильники електроенергії), зменшується число застосовуваних польових датчиків і точок вводу-виводу, які вимагають монтажу та наладки.

## 1.2 Загальний опис частотних перетворювачів і області їх застосування

Управління асинхронним електродвигуном в частотному режимі до недавнього часу було великою проблемою, хоча теорія частотного регулювання

була розроблена ще в тридцятих роках. Розвиток частотно-регульованого електроприводу стримувався високою вартістю перетворювачів частоти. Поява силових схем з IGBT-транзисторами, розробка високопродуктивних мікропроцесорних систем управління дозволило різним фірмам Європи, США і Японії створити сучасні перетворювачі частоти доступною вартістю.

Напівпровідникові перетворювачі частоти для електропривода поділяються на два основні класи, що розрізняються за способом зв'язку двигуна з мережею живлення: а) безпосередні перетворювачі частоти (БПЧ); б) дволанкові перетворювачі частоти (ДПЧ) з проміжною ланкою постійного або змінного струму.

*1.2.1 Безпосередні перетворювачі частоти.* У класі безперервних перетворювачів частоти найбільше практичне застосування отримали перетворювачі з природною комутацією. У них використовуються силові напівпровідникові прилади з неповним керуванням (тиристри), комутація яких проводиться за рахунок напруги мережі. БПЧ для управління багатофазними двигунами змінного струму являє собою комплекс швидкодіючих реверсивних керованих випрямно-інверторних перетворювачів, кожен з яких живить одну фазу двигуна. Формування необхідної частоти і амплітуди змінної напруги на затискачах двигуна забезпечується безперервною циклічною зміною вузлів управління комплектами перетворювачів. Для побудови БПЧ застосовуються різні варіанти схем реверсивних керованих випрямлячів: нульові і мостові, мало- і багатопульсні, зустрічно паралельні і перехресні, зі спільним і роздільним керуванням і т.д. Приклад виконання принципової електричної схеми тиристорного БПЧ наведено на рисунку 1.7.

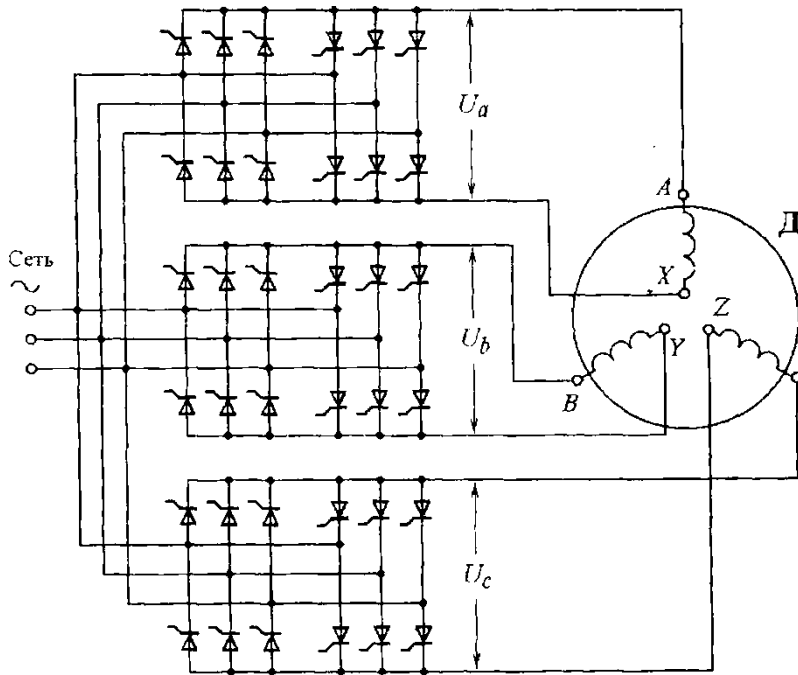


Рисунок 1.7 - Трифазний мостовий БПЧ з роздільним керуванням

БПЧ з примусовою комутацією (матричні) реалізуються на повністю керованих ключах - транзисторах або тиристорах, що замикаються. Основні переваги БПЧ:

- 1) відносно високий ККД, що досягається завдяки однократному перетворенню електричної енергії;
- 2) можливість двостороннього обміну між живильною мережею і двигуном, що забезпечує як рухові, так і гальмівні режими ЕП з рекуперацією енергії в мережу;
- 3) використання пристроїв з природною комутацією (тиристорів), більш надійних, економічних і таких, що володіють більшою перевантажувальною здатністю в порівнянні з пристроями примусової комутації;
- 4) можливість отримання як завгодно низьких частот вихідної напруги перетворювача і забезпечення рівномірного обертання двигуна на малих швидкостях;
- 5) практично необмежена потужність БПЧ.

Основні недоліки даних БПЧ:

- 1) обмеження максимальних значень вихідної частоти на рівні близько  $1/3 \dots 2/3$  від частоти мережі живлення;

- 2) наявність субгармонік і постійних складових вихідної напруги і струму при несприятливих співвідношеннях частот на вході і виході ПЧ;
- 3) низький коефіцієнт потужності, несинусоїдальність і модуляція вхідних струмів ПЧ. Невисокі показники електромагнітної сумісності з мережею живлення;
- 4) складність (багатоелементність) силових кіл і кіл управління, що виправдовується лише на великих потужностях.

*1.2.2 Дволанкові перетворювачі частоти (ДПЧ) з проміжною ланкою постійного струму.* Перетворювач частоти, що працює на статорну обмотку АД, показаний на рисунку 1.8. Він включає в себе автономний інвертор напруги (АІН) з системою управління інвертора (СУІ) і керований випрямляч (КВ). На виході випрямляча передбачений LC- фільтр, призначений для згладжування випрямленої напруги  $U_d$ . У гальмівному резисторі  $R_T$ , який вмикається гальмівним переривачем  $K_T$  при переході двигуна в гальмівний режим, розсіюється енергія гальмування. У промислових установках керований випрямляч живиться від мережі змінного струму промислової частоти 50 Гц. Керуючим впливом для нього є сигнал завдання напруги на вході системи управління випрямлячем (СУВ).

Найбільш поширеною схемою силової частини інвертора є трифазна мостова схема, зображена на рисунку 1.8, що складається з шести керованих ключів, позначених на рисунку цифрами 1 ... 6. Ці ключі повинні володіти двосторонньою провідністю. В даний час вони зазвичай виконуються на транзисторах, що забезпечують протікання струму в прямому напрямку від плюса напруги  $U_d$  до мінуса. Зворотня провідність забезпечується включеними паралельно транзисторам діодами зворотного струму. З їх допомогою створюється коло для протікання зворотного струму в процесі комутації транзисторів і в гальмівному режимі двигуна.

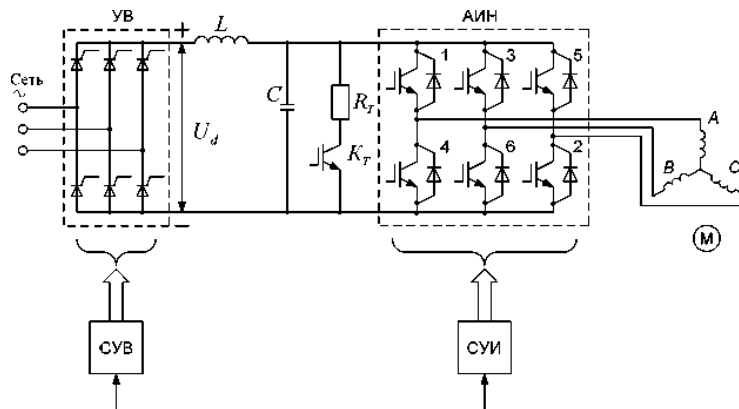


Рисунок 1.8 - Структура перетворювача частоти з ланкою постійного струму і автономним інвертором напруги

Управління частотою  $\omega_{0\text{эл}}$  на виході перетворювача здійснюється шляхом впливу на систему управління інвертора, в якій сигнал завдання частоти перетвориться в тривалість сигналів управління, що подаються на транзистори інвертора відповідно до встановленого алгоритму. Значення амплітуди напруги змінного струму на виході інвертора визначається значенням випрямної напруги  $U_d$ , з якої формується вихідна напруга перетворювача. Вона задається сигналом на вході системи управління випрямлячем.

На рисунку 1.9 зображена структура дволанкового перетворювача частоти з керованим випрямлячем і автономним інвертором струму (АІС). Принципова відмінність його від ПЧ з АІН полягає в тому, що інвертор отримує живлення від джерела струму, а не від джерела напруги. В якості такого джерела використовується керований випрямляч (КВ) з системою управління випрямлячем (СУВ), котрому надаються властивості джерела струму шляхом створення контуру регулювання випрямленого струму  $I_d$  з допомогою регулятора струму РС. Вихідний струм АІС формується з  $I_d$  шляхом перемикування ключів інвертора. Частота вихідного струму АІС задається на вході його системи управління (СУІ). Дросель  $L$  згладжує пульсації випрямленого струму.

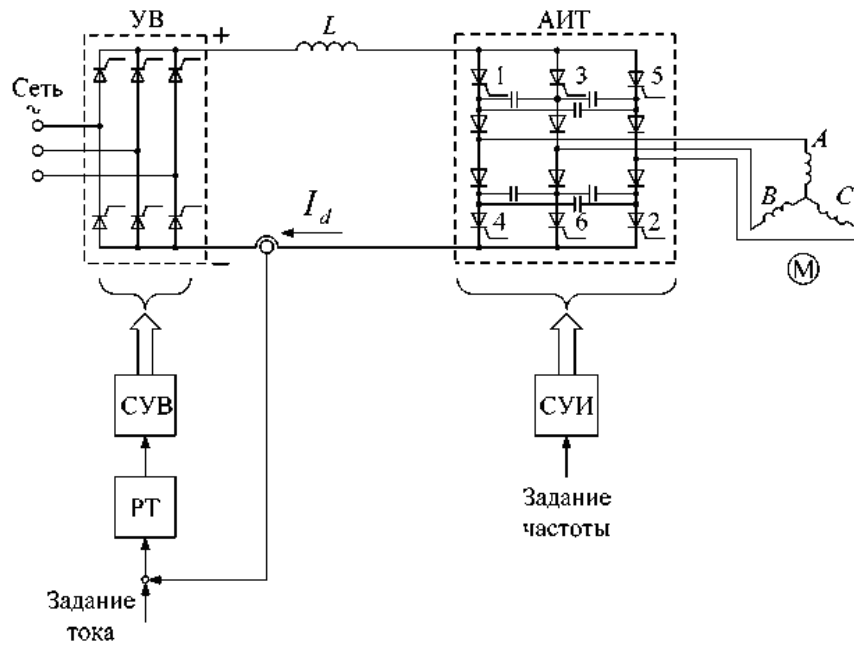


Рисунок 1.9 - Структура перетворювача частоти з ланкою постійного струму і автономним інвертором струму

На рисунку 1.10 зображений дволанковий ПЧ з некерованим випрямлячем і автономним інвертором напруги. На інвертор покладено функцію регулювання не тільки частоти, але і амплітуди основної гармоніки вихідної напруги ПЧ при сталості напруги в ланці постійного струму [1].

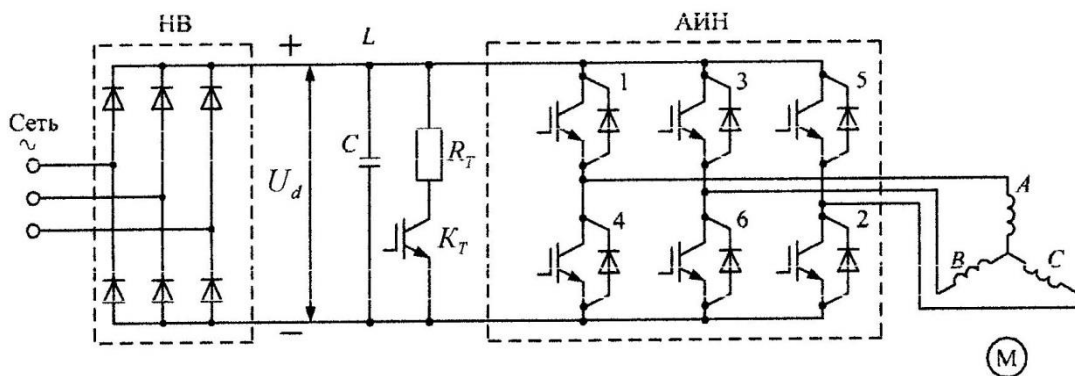


Рисунок 1.10 - Структура силової частини перетворювача частоти з ШІМ

1.2.3 Області застосування частотних перетворювачів. Розглянемо найпоширеніші застосування частотних перетворювачів:

1) Насоси. Споживана насосом потужність пропорційна кубу швидкості обертання, тому використання частотного перетворювача дає економію електроенергії до 30% і навіть більше в порівнянні зі способом регулювання потужності заслінками на трубі. Ця економія дозволяє окупити частотний перетворювач приблизно за рік. Попутно вирішується проблема гідравлічних ударів: при роботі перетворювача частоти пуск і зупинка насоса відбуваються плавно. Сучасні перетворювачі провідних фірм мають систему управління, що дозволяє управляти групою насосів, тобто практично побудувати насосну станцію без залучення додаткового контролера.

2) Вентилятори. Все, що було сказано для насосів, відноситься і до вентиляторів. Економія електроенергії тут зазвичай ще більше, оскільки для забезпечення прямого пуску важких вентиляторів часто застосовуються двигуни підвищеної потужності. При проектуванні нових установок можна використовувати з перетворювачем двигун меншої потужності, а при модернізації існуючих установок додаткова економія виходить за рахунок зниження втрат холостого ходу.

3) Транспортери. Тут регулювання дозволяє адаптувати швидкість переміщення до швидкості всього технологічного процесу, яка в загальному випадку не є постійною. Плавний пуск різко збільшує ресурс механізмів за рахунок відсутності ударних навантажень в процесі вибору люфтів в момент пуску.

Значна економія електроенергії досягається за однієї умови - приводний механізм підтримує будь-якої технологічний параметр:

1) якщо використовується насос, то необхідно регулювати витрату води, тиск в мережі або температуру охолоджуваної або тої, що нагрівається, речовини;

2) якщо використовується вентилятор або димосос, то регулювати потрібно температуру або тиск повітря, розрідження газів;

3) якщо використовується конвеєр, то часто буває потрібно регулювати його продуктивність;

4) якщо використовується верстат, то потрібно регулювати швидкості подачі або головного руху.



Основною функцією перетворювача частоти є оптимізація роботи двигуна в залежності від режиму експлуатації. Зазвичай перетворювачі оснащуються вбудованим ПІД-регулятором. Його наявність дозволяє змінювати швидкість обертання ротора таким чином, щоб підтримувати на заданому рівні певний параметр системи (витрата, тиск, температура і т.д.). Сигнал від відповідного датчика надходить безпосередньо до перетворювача. Все разом дає можливість управляти процесами без використання зовнішніх регуляторів. Як правило, мова йде про регулювання одного з робочих параметрів. Здатність перетворювача працювати з великим числом сигналів зворотного зв'язку відкриває додаткові можливості. Наприклад, двопараметричний ПІД-регулятор може одночасно контролювати тиск повітря за припливним вентилятором і в витяжному повітровооді, забезпечуючи необхідний напір повітря і попереджаючи можливе пошкодження повітровоода.

Крім того, що застосування перетворювачів частоти саме по собі дозволяє уникати невиправданих витрат енергії, ці прилади додатково оснащуються функцією енергозбереження. Електроніка автоматично відстежує споживання струму і коригує напругу на виході перетворювача таким чином, щоб втрати в обмотках двигуна були мінімальними, а ККД - максимальним.

Найважливішою функцією частотних перетворювачів є забезпечення плавної роботи обладнання в режимах пуску (плавний пуск) і зупинки. Там, де мова йде про насоси, це, перш за все, виключає небезпеку гідравлічних ударів, що призводять до аварій і скорочують термін служби обладнання. Крім того, слід пам'ятати, що при прямому пуску будь-якого асинхронного двигуна струм в 5-7 разів перевищує номінальний. Такі стрибки скорочують термін служби самого двигуна, комутаційної апаратури, створюють додаткове навантаження на живильну лінію, супроводжуються просадками напруги в електричній мережі і т.д.

При управлінні приводами насосів і вентиляторів велике значення надається своєчасному виявленню різних нештатних ситуацій типу обриву привідного ременя. У перетворювачах це забезпечується за рахунок постійного моніторингу

навантаження. При цьому в якості датчика використовується сам двигун. Коли навантаження виходить за межі заданого робочого діапазону, перетворювач подає відповідний сигнал. Таким чином, можна відстежити також кавітацію, сухий хід насоса, роботу на закриту заслінку або засмічений фільтр.

В якості основної або додаткової функцій перетворювачі частоти для інженерних систем оснащуються можливістю каскадного управління групою насосів або вентиляторів. Зокрема, стандартний перетворювач може без будь-якої додаткової комплектації управляти установкою, що включає до трьох насосів. Їх число можна збільшити до семи, встановивши пропоновану в якості опції плату реле. В залежності від витрати, тиску або температури (параметр контролюється ПІД-регулятором) перетворювач частоти подає сигнал на включення або відключення додаткових насосів, підтримуючи параметр на заданій величині. Вбудована електроніка виконує при цьому цілий ряд функцій, в тому числі: підрахунок часу роботи кожного насоса; автоматичну зміну працюючих насосів через задані проміжки часу; попередження частих перемикань насосів; дотримання черговості включення насосів в залежності від часу напрацювання (насос з мінімальним часом напрацювання вмикається першим) і ін.

Наведемо деякі інші функції, якими оснащуються перетворювачі частоти, пропоновані для використання в інженерних системах. Перетворювач обмежує мінімальну швидкість обертання вентилятора, забезпечуючи змащування в редукторі приводу. Аналогічні обмеження важливі для довгострокової роботи ущільнень відцентрових насосів, де змащування здійснюється рідиною, що перекачується. Стосовно до вентилятора дана функція гарантує також підтримку в приміщенні мінімального повітрообміну, необхідного для забезпечення необхідної якості повітря (з ростом навантаження обороти підвищуються).

У випадках пуску перетворювача частоти при роторі, що обертається, застосовується функція підхоплення працюючого двигуна. При її використанні прилад визначає при пуску швидкість обертання ротора і починає регулювання з урахуванням цієї величини.

Перетворювачі часто оснащені функцією подолання просадок напруги в мережі живлення. При виникненні такої ситуації перетворювач частоти не відключається, а плавно знижує оберти двигуна пропорційно величині просідання. При відновленні напруги система повертається до заданих параметрів.

### 1.3 Основні закони частотного регулювання

Принцип частотного методу регулювання швидкості асинхронного двигуна полягає в тому, що, змінюючи частоту  $f_1$  напруги живлення, можна відповідно до виразу

$$\omega_0 = \frac{2\pi \times f_1}{p} \quad (1.1)$$

при незмінному числі пар полюсів  $p$  змінювати кутову швидкість магнітного поля статора. Цей спосіб забезпечує плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні, а механічні характеристики мають високу жорсткість.

Регулювання швидкості при цьому не супроводжується збільшенням ковзання асинхронного двигуна, тому втрати потужності при регулюванні невеликі.

Для отримання високих енергетичних показників асинхронного двигуна – коефіцієнтів потужності, корисної дії, перевантажувальної здатності - необхідно одночасно з частотою змінювати і напругу, що підводиться.

Закон зміни частоти залежить від характеру моменту навантаження  $M_c$ . При постійному моменті навантаження  $M_c = \text{const}$  напруга на статорі повинно регулюватися пропорційно частоті:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \quad (1.2)$$

Для вентиляторного характеру моменту навантаження цей стан має вигляд:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const} \quad (1.3)$$

При моменті навантаження, зворотно пропорційному швидкості:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const} \quad (1.4)$$

Таким чином, для плавного безступінчатого регулювання частоти обертання валу асинхронного електродвигуна перетворювач частоти повинен забезпечувати одночасне регулювання частоти і напруги на статорі асинхронного двигуна.

## Висновки по розділу 1

1. В даний час будь-якій виробничий механізм управляється автоматизованою системою. Одним з її основних елементів, який перетворює електричну енергію в механічну, є електродвигун. Асинхронні електродвигуни, які найчастіше застосовуються в різних механізмах, підрозділяються на двигуни з фазним ротором і короткозамкненим ротором, останні куди більш поширені завдяки своїй простоті, низькій вартості і високій надійності.

2. Основний недолік асинхронних електродвигунів - складність регулювання їх швидкості традиційними методами. Швидкість асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором не змінюється при зміні навантаження, тому актуальним є використання найдосконалішого в даний час способу управління електродвигуном - частотного регулювання, в основі якого лежить перетворювач частоти. Завдяки такому регулюванню знижується значення пускових струмів, збільшується плавність пуску, розгін двигуна проводиться без механічних ударів.

3. Перетворювач частоти повинен забезпечувати одночасне регулювання частоти і напруги на статорі асинхронного двигуна. Поділяється за способом підключення електродвигуна до мережі живлення на безпосередні і дволанкові з

проміжною ланкою постійного або змінного струму. Основні великі області застосування перетворювачів частоти - насоси, вентилятори і транспортери. Існує три базових закони перетворення частоти, які застосовуються для різного типу систем і механізмів: при постійному моменті навантаження застосовується пропорційний закон, для вентиляторного характеру - квадратичний, а при моменті навантаження, який обернено пропорційний швидкості - кореневий.

## 2 СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЄЮ DANFOSS VSH170 З ЧАСТОТНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ

### 2.1 Основні характеристики станції

Головною частиною будь-якого холодильного обладнання та морозильного обладнання, яка вдихає в нього життя і, власне, відповідає за виробництво холоду, є холодильний компресор. Разом з двигуном, який приводить холодильний компресор в робочий стан, вони забезпечують стиснення і перерозподіл парм, одержуваної з холодоагенту.

Спочатку відбувається стиснення холодоагенту в газоподібному стані за допомогою компресора, внаслідок чого підвищується його температура і тиск. Далі, стислий газоподібний холодоагент надходить за допомогою розпилювача в випарник, де за рахунок розширення значно охолоджується і, як наслідок, відбирає тепло в оточуючого його металу (металевих трубок, по яких він рухається). Метал, в свою чергу, відбирає тепло вже з оточуючого його повітря і створює тим самим охолоджуваний повітряний об'єм, де і зберігаються продукти. Далі холодоагент, що розширився, надходить в конденсатор, де охолоджується і звідти знову надходить в компресор для стиснення і цикл замикається.

Виходячи з того, який спосіб стиснення холодоагенту покладено в основу роботи холодильного компресора, розрізняють ротаційні, поршневі, гвинтові, відцентрові і спіральні компресори.

У побутовому і промисловому холодильному обладнанні, що випускається для зберігання і заморозки харчових продуктів, в основному використовуються поршневі або гвинтові компресори. Гвинтові компресори володіють більш значною холодопродуктивністю, порівняно з поршневими компресорами. Інші типи компресорів найчастіше використовуються в системах кондиціонування. Хоча спіральні компресори також іноді використовуються в холодильних установках, що випускаються для харчової промисловості.

Якщо порівнювати спіральний холодильний компресор з іншими видами компресорів, наприклад, з поширеним поршневым компресором, то помітний ряд переваг. Спіральний компресор компактніше, легше, не такий гучний, менше схильний до вібрацій, володіє більш високим ККД.

Принцип дії спірального компресора: камери (порожнини) для стиснення і розрядження в спіральному компресорі створюються за допомогою спіралей - нерухомої і рухомої. При русі рухомої спіралі відносно нерухомої відбувається зміна об'єму камер компресора, і відповідно, стиснення і розрядження газів.

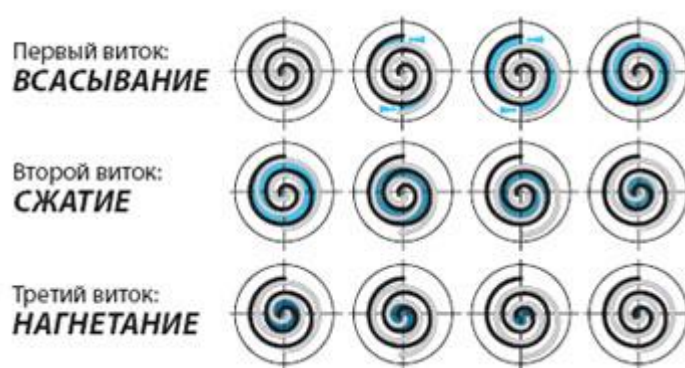


Рисунок 2.1 - Принцип дії спірального компресора

За конструкцією, спіральний компресор - це об'ємна одновальна машина. Будова спірального компресора відрізняється простотою і меншою кількістю деталей, що підвищує надійність і здешевлює вартість виробництва компресорів. Відсутні усмоктувальні і навіть нагнітальні клапани. В якості холодильного агента можна застосовувати практично будь-який з використовуваних холодоагентів.

Область застосування спірального компресора досить широка, наприклад, в харчовій промисловості для холодильної техніки, або як компресори для теплових насосів, або для інших малих і середніх холодильних установок.

Але основна область застосування спірального холодильного компресора - це системи кондиціонування.

Спіральний компресор може працювати на будь-якому виді холодоагенту і може бути виготовлений з використанням будь-яких типів спіралей. Простота

конструкції спірального компресора збільшує стабільність роботи спірального компресора і його надійність, а також продовжує термін його служби. На сьогоднішній день спіральний компресор - це, мабуть, найефективніший в роботі тип компресора (найвищий ККД серед всіх типів компресорів), який максимально намагаються використовувати в своїй продукції провідні виробники холодильного обладнання.

Як об'єкт управління обрана компресорна станція для систем кондиціонування з частотним регулюванням на базі спірального компресора Danfoss VSH170.

Технологія регульованої швидкості обертання пропонує більшу гнучкість у виборі компресора, ніж в компресорах з фіксованою швидкістю роботи електродвигуна. Вибір компресора з регульованою швидкістю обертання потрібної продуктивності для системи управління вентиляцією може бути зроблений різними способами:

1. Максимальна холодопродуктивність: потрібно підбирати компресор таким чином, щоб його холодопродуктивність при максимальній швидкості обертання електродвигуна відповідала піковому навантаженню на систему охолодження.

2. Номінальна холодопродуктивність: потрібно підбирати компресор таким чином, щоб його холодопродуктивність при швидкості обертання електродвигуна 3600-4500 об/хв (при частоті 60-75 Гц) відповідала номінальному навантаженню на систему охолодження.

3. Кращий сезонний коефіцієнт ефективності: потрібно вибирати компресор, який за потужністю досягає мінімального споживання для охолодження системи при мінімальній швидкості обертання. Переконайтеся, що компресор в змозі покрити максимальне навантаження на систему охолодження. Цей вибір дозволяє компресору працювати максимум часу при частковому навантаженні, де ефективність системи є найвищою.

Основні особливості спірального компресора Danfoss VSH170 показані на рисунку Б1 додатка Б.



Таблиця 2.1 - Технічні характеристики компресора

Модель компресора	Описаний об'єм (см <sup>3</sup> /об)	Продуктивність				Заправка маслом (дм <sup>3</sup> )	Вага нетто (кг)	Робочий тиск (Па)
		Мін. швидкість (м <sup>3</sup> /год)	50 Гц (м <sup>3</sup> /год)	60 Гц (м <sup>3</sup> /год)	Макс. швидкість			
VSH170	170.2	17.8	29.6	35.7	53.3	6.7	107	3,02·10 <sup>5</sup>

Компресори VHS забезпечені системою впорскування масла, яка забезпечує змащування спірального блоку і управляє коефіцієнтом циркуляції масла при всіх швидкостях роботи. Перетворювач частоти через клапан упорскування масла керує цією системою. Для впорскування масла використовується клапан нормально-закритого типу. При низькій швидкості обертання електродвигуна клапан відкривається, і відбувається впорскування масла нижче рухомої спіралі.

Компресори оснащені котушками на 230 В. В комплект також входить котушка на 24 В. Параметри управління мають заводську настройку. Оптимальне змащування підшипників забезпечується за рахунок героторного масляного насоса при будь-якій швидкості роботи компресора.

Оскільки компресори серії VHS розраховані на електроживлення від перетворювача частоти, частота електромережі 50 або 60 Гц більше не є проблемою. Має враховуватися тільки напруга. З різні значення напруги, з яких вибрано значення 200-240 В, покривають найбільш поширені значення напруги і частоти електромережі. Не можна підключати компресор VHS безпосередньо до мережі електроживлення.

Таблиця 2.2 - Електричні характеристики компресора

	Модель компресора	RW	RLA	MMT	LRA
		Ом	А	А	А
200-240 В	VSH170-J	0.0280	120	150	699

RW: Опір обмотки електродвигуна (в переліку параметрів CDS302)

RLA: Номінальний струм навантаження

MMT: Максимально можливе значення струму. Максимальний струм, при перевищенні якого електроживлення компресора повинно бути відключено.

LRA: Струм з загальмованим ротором

Струм LRA - це найвище значення струму, виміряного на компресорі з механічно заблокованим ротором при номінальній напрузі електроживлення. Струм LRA вказується на таблиці компресора. У випадку з компресорами VHS даного значення досягти неможливо, оскільки перетворювач частоти відключить електроживлення до настання цього моменту відповідно до значення MMT.

Струм RLA - це поточне значення струму при експлуатації компресора й при максимальному навантаженні в межах області швидкості обертання електродвигуна.

MMT визначається для компресорів без власного захисту електродвигуна. Струм MMT - це максимальний струм, при якому компресор може працювати в перехідних режимах за межами області експлуатації. Струм відключення зовнішнього захисту від перевантаження не повинен перевищувати значення MMT. Для компресорів серії VHS, відповідно до вимог UL, значення MMT становить 125% від струму RLA. Дане значення вказано на таблиці.

## 2.2 Структурна схема системи з частотним регулюванням

Структурна схема системи керування компресорною станцією з частотним регулюванням представлена на кресленні СУ.мдн-21п.151.02 С1 конструкторської документації (додаток А).

Залежно від показів датчиків температури і тиску, що надходять на перетворювач частоти, він змінює частоту і таким чином регулює напругу живлення, яку слід подати на обмотки двигуна компресора. В системі застосований асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, а напруга

надходить на перетворювач частоти з джерела трифазного живлення. Перед надходженнями на перетворювач частоти сигнал з датчика температури проходить через нормуючий перетворювач, тоді як в датчик тиску перетворювач вбудований.

### 2.3 Прилади та елементна база системи

Як видно з структурної схеми системи управління, система складається з спірального компресора Danfoss VSH170, джерела трифазного живлення, вбудованих в компресорну станцію датчиків температури і тиску, перетворювача для датчика температури, що нормує, і перетворювача частоти CDS302. В якості перетворювача температури, що нормує, вибираємо ОВЕН НВТ-1, технічні характеристики якого представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики перетворювача температури, що нормує НВТ-1

<b>Найменування</b>	<b>Значення</b>
Номінальне значення напруги живлення (постійного струму)	24 В
Діапазон допустимих напруг живлення (постійного струму)	12 - 36 В
Струм споживання, не більше: - для робочого режиму - для режиму конфігурації (живлення здійснюється від USB-Host)	35 мА 50 мА
Номінальний діапазон вихідного струму перетворювача	0 - 20 мА, 4 - 20 мА
Функція перетворення вхідних сигналів	монотонно зростаюча або спадна

Продовження таблиці 2.3

Нелінійність перетворення, не гірше	±0,1%
Розрядність аналого-цифрового перетворювача, не менше: - При роботі з термометрами опору - При роботі з термопарами	15 біт 14 біт
Розрядність ЦАП не менше	11 біт
Опір кожного з'єднувального проводу, що з'єднує перетворювач з датчиками, не більше	100 Ом
Допустиме відхилення опорів проводів при трьохпроводній схемі підключення ТС, не більше	0,01% от R <sub>0</sub>
Номінальне значення опору навантаження (при напрузі живлення 24 В)	250 Ом ±5 %
Максимально допустимий опір навантаження (при напрузі живлення 36 В) *	1200 Ом
Пульсації вихідного сигналу	0,6%
Час встановлення робочого режиму (попереднє прогрівання), не більше	15 хв
Час встановлення вихідного сигналу після стрибкоподібної зміни вхідного, не більше	3 с
Час безперервної роботи	цілодобово
Інтерфейс зв'язку з ПК	USB2.0 Full Speed
Габаритні розміри	110 x 76 x 27 мм
Маса, не більше	500 г
Середнє напрацювання на відмову, не менше	500 000 год
Середній термін служби, не менше	12 років
<p><b>Примітка</b> * Розрахунок опору навантаження здійснюється за формулою:  <math display="block">R_H (\text{Ом}) = (11_{\text{жив}} - 12) \text{ В} / 0,020 \text{ А}</math></p>	

Перетворювачі частоти для спірального компресора вибираються у відповідності з наступними пунктами:

1. Напруга живлення електродвигуна
2. Ступінь захисту корпусу 1P (пристрій CDS302 виконано в корпусі зі ступенем захисту 1P20 або 1P55).
3. Клас RFI (радіочастотних перешкод) H2 або H3.
4. Локальна панель управління LCP (дисплей) присутній чи ні.
5. Друкована плата (PCB) із захисним покриттям або без покриття.

Коли продуктивність компресора і напруга живлення визначені по вищевказаним критеріям відбору, в таблицях кодових номерів можна знайти відповідну потужність перетворювача частоти і до 16 кодових номерів для кожної моделі компресора.

Принципова схема ПЧ представлена на кресленні СУ.мдн-21п.151.02 СБ, а таблиця з'єднань і підключень - в СУ.мдн-21п.151.02 С6 конструкторської документації. У таблиці 2.4 наведені технічні характеристики перетворювача частоти.

На рисунку Б2 додатка Б зображена схема належної установки ПЧ зі ступенем захисту Ф20 відповідно до ЕМС.

Монтаж електроживлення двигуна компресора від перетворювача частоти CDS302 до компресора серії VHS повинен виконуватися за допомогою плетеного екранованого або армованого кабелю. Цей кабель повинен мати екранований або захисний кабельний канал, з'єднаний з землею на обох кінцях. Потрібно уникати підключення кабелю зі скрученими кінцями, оскільки це може привести до ефекту антени і зниження ефективності кабелю.

Для контрольних кабелів перетворювача частоти CDS302 повинні використовуватися ті ж принципи монтажу, що і для кабелю живлення.

Кабель електродвигуна компресора повинен монтуватися в кабельному каналі окремо від контрольних і мережевих кабелів.

Таблиця 2.4 - Технічні характеристики перетворювача частоти

Напруга живлення	T2: 200-240 В +/-10% (3-фазна)
Частота	50 / 60 Гц
Вихідна напруга	0-100 % напруги електроживлення
Вихідні сигнали	6 цифрових (0-24 В), 2 аналогових (-10/+10 В або 0/4 В - 20 мА, масштабовані)
Програмовані вихідні сигнали	2 цифрових (0-24 В), 1 аналоговий (0-24 В), 2 реле
Функції захисту	Захист від перевантаження по струму, управління перемодуляцією, управління низькою/ високою силою струму
Функції для компресора	Захист від високої температури нагнітання, функція пресостат / термостат, захист від роботи короткими циклами, управління поверненням масла

Фізична установка перетворювача частоти на монтажній плиті повинна забезпечувати хороший електричний контакт між монтажною плитою і металевим корпусом конвертера. Потрібно використовувати шайби-зірки і монтажні плити, що гальванічно проводять, для забезпечення гарного електричного з'єднання. Інформація, що стосується моментів затягування і розмірів гвинтів, викладена в інструкції по експлуатації MG.34.M1.02.

Перетворювач частоти CDS302 повинен бути встановлений на рівній стіні з метою забезпечення гарного повітряного потоку через радіатор приводу.

Схема підключення зовнішніх проводок перетворювача частоти до компресорної станції холодильної установки представлена в кресленні СУ.мдн-21п.151.02 С5 конструкторської документації. За замовчуванням перетворювач

частоти CDS302 має заводські настройки параметрів за принципом відкритого контуру управління. Принцип управління контуру по ПІД-логіці (закритий контур) можна вибрати шляхом зміни параметрів настройки в «Швидке меню».

Відкритий контур: попередня установка на 53-й вхід Управління 0-10 В; Перетворювач частоти працює в режимі зовнішнього управління.

Закритий контур: попередня установка на 54-й вхід Управління 4-20 мА; Перетворювач частоти працює в режимі самостійного управління з вбудованим ПІД-регулятором.

## Висновки по розділу 2

1. Головною частиною будь-якого холодильного і морозильного обладнання є холодильний компресор. Разом з двигуном, який приводить холодильний компресор в робочий стан, вони забезпечують стиснення і перерозподіл пари, одержуваної з холодоагенту.

2. За способом стиснення холодоагенту, покладеним в основу роботи холодильного компресора, розрізняють ротаційні, поршневі, гвинтові, відцентрові і спіральні компресори. Останні мають ряд переваг, що робить їх найефективнішими у використанні в системах кондиціонування і установках для харчової промисловості: компактність, легкість, знижений рівень шуму і схильність вібрацій, більш високий ККД. Камери для стиснення і розрядження парів холодоагенту в спіральному компресорі створюються за допомогою нерухомої і рухомої спіралей.

3. В якості об'єкта управління компресорна станція з частотним регулюванням для систем кондиціонування на базі спірального компресора. Структурна схема системи складається з спірального компресора Danfoss VSH170 з робочим тиском  $3,02 \cdot 10^5$  Па, здатним працювати від двигуна потужністю 55 кВт, джерела трифазного живлення, вбудованих в компресорну станцію датчиків температури і тиску, перетворювача для датчика температури, що нормує, і перетворювача частоти CDS302.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ БАЗОВИХ ЗАКОНІВ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

#### 3.1 Узагальнена модель асинхронної машини

Узагальнена асинхронна машина (АМ) містить трифазну обмотку на роторі і статорі. Обмотки підключені до симетричних джерело напруги. Математичний опис такої машини базується на відомих законах. Рівняння рівноваги ЕРС на обмотках статора і ротора базуються на другому законі Кирхгофа.

Для статора:

$$\left. \begin{aligned} u_A &= R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt}, \\ u_B &= R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt}, \\ u_C &= R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

Для ротора:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt}, \\ u_b &= R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt}, \\ u_c &= R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

У рівняннях (3.1) і (3.2) фігурують миттєві напруги, струми і потокозчеплення статора і ротора, а також активні опори обмоток. Зазвичай обмотки виконуються симетричними, тому  $R_A = R_B = R_C = R_s$  - активний опір обмотки статора,  $R_a = R_b = R_c = R_r$  - активний опір роторної обмотки.

Другим використовуваним законом є закон Ампера, який пов'язує потокозчеплення обмоток з струмами, що протікають по обмотках.

Для статора:

$$\left. \begin{aligned} \psi_A &= L_{AA} i_A + L_{AB} i_B + L_{AC} i_C + L_{Aa} i_a + L_{Ab} i_b + L_{Ac} i_c, \\ \psi_B &= L_{BA} i_A + L_{BB} i_B + L_{BC} i_C + L_{Ba} i_a + L_{Bb} i_b + L_{Bc} i_c, \\ \psi_C &= L_{CA} i_A + L_{CB} i_B + L_{CC} i_C + L_{Ca} i_a + L_{Cb} i_b + L_{Cc} i_c. \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Для ротора:



$$\left. \begin{aligned} \psi_a &= L_{aA}i_A + L_{aB}i_B + L_{aC}i_C + L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c, \\ \psi_b &= L_{bA}i_A + L_{bB}i_B + L_{bC}i_C + L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c, \\ \psi_c &= L_{cA}i_A + L_{cB}i_B + L_{cC}i_C + L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c. \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

Тоді симетричні рівняння для визначення потокозчеплення показують, що потокозчеплення кожної обмотки залежить від струмів у всіх обмотках; ці залежності проявляються через взаємоіндукції. У рівняннях (3.3) і (3.4)  $L_{AA}$ ,  $L_{BB}$ ,  $L_{CC}$ ,  $L_{aa}$ ,  $L_{bb}$ ,  $L_{cc}$  є власними індуктивностями відповідних обмоток, всі інші - взаємоіндуктивностями між відповідними обмотками.

Третім законом, що лежить в основі аналізу, є другий закон Ньютона - закон рівноваги моментів на валу машини:

$$J \frac{d\vec{\omega}_m}{dt} = \vec{M} - \vec{M}_c, \quad (3.5)$$

де  $J$  ( $\text{кг} \times \text{м}^2$ ) момент інерції на валу машини, що враховує інерційність як самої машини, так і наведеної до валу інерційності робочого механізму і редуктора,  $\omega_m$  ( $\text{рад} / \text{с}$ ) - кутова швидкість вала машини,  $\vec{M}_c$  ( $\text{Н} \times \text{м}$ ) - момент робочого механізму, приведений до валу двигуна.

Нарешті, четвертим і останнім законом, що лежить в основі аналізу машини, є закон, сформульований Ленцем, як правило лівої руки. Цей закон пов'язує векторні величини моменту, потокозчеплення і струму:

$$\vec{M} = k(\vec{\psi} \times \dot{i}). \quad (3.6)$$

В кінцевому вигляді рівняння узагальненої асинхронної машини мають вигляд [10]:

$$\left. \begin{aligned}
\vec{u}_S &= R_S \dot{i}_S + \frac{d\vec{\psi}_S}{dt} + j\omega_k \vec{\psi}_S, \\
\vec{u}_R &= R_R \dot{i}_R + \frac{d\vec{\psi}_R}{dt} + j(\omega_k - p\omega_m) \vec{\psi}_R, \\
\vec{\psi}_S &= L_S \dot{i}_S + L_m \dot{i}_R, \\
\vec{\psi}_R &= L_m \dot{i}_S + L_R \dot{i}_R, \\
M &= \frac{3}{2} p \cdot k \cdot \text{Mod}(\vec{\psi}_i \times \dot{i}_k), \\
J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_C.
\end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

де  $p$  - число пар полюсів двигуна.

### 3.2 Структурна модель асинхронного двигуна в обертовій системі координат

В обертовій з відносною кутовою швидкістю  $\omega_k$  системі координат з речовою віссю "x" і уявною віссю "y", рівняння (3.7) в операторній формі запишуться у вигляді:

$$\left. \begin{aligned}
u_{Sx} &= r(1 + T'_S s) i_{Sx} - \omega_k L'_S i_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx} - k_R p \omega_m \psi_{Ry}, \\
u_{Sy} &= r(1 + T'_S s) i_{Sy} + \omega_k L'_S i_{Sx} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Ry} + k_R p \omega_m \psi_{Rx}, \\
0 &= -k_R R_R i_{Sx} + \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + s \psi_{Rx} - (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Ry}, \\
0 &= -k_R R_R i_{Sy} + \frac{1}{T_R} \psi_{Ry} + s \psi_{Ry} + (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Rx}, \\
M &= 1.5 p k_R (\psi_{Rx} i_{Sy} - \psi_{Ry} i_{Sx}), \\
J s \omega_m &= M - M_H.
\end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

де  $s$  - оператор Лапласа.

Структурна схема АКЗ і її модель залежить від вибору базового вектора  $[U]$ , який визначає швидкість обертання координат. За базовий вектор приймається той, який при аналізі поєднується з однією з осей системи координат.

Так якщо за базовий вектор прийняти вектор  $\bar{u}_s$ , то система координат буде обертатися зі швидкістю  $\omega_1$  рівною кутовий частоті напруги живлення. Крім того, якщо поєднати вектор з віссю x обертової системи координат, то в рівняннях (3.8) слід прийняти  $u_{sx} = U_1$ ,  $u_{sy} = 0$ .

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= r(1 + T'_S s) i_{Sx} - \omega_1 L'_S i_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx} - k_R p \omega_m \psi_{Ry}, \\ 0 &= r(1 + T'_S s) i_{Sy} + \omega_1 L'_S i_{Sx} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Ry} + k_R p \omega_m \psi_{Rx}, \\ 0 &= -k_R R_R i_{Sx} + \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + s \psi_{Rx} - (\omega_1 - p \omega_m) \psi_{Ry}, \\ 0 &= -k_R R_R i_{Sy} + \frac{1}{T_R} \psi_{Ry} + s \psi_{Ry} + (\omega_1 - p \omega_m) \psi_{Rx}, \\ M &= 1.5 p k_R (\psi_{Rx} i_{Sy} - \psi_{Ry} i_{Sx}), \\ J s \omega_m &= M - M_H. \end{aligned} \right\}$$

(3.9)

Перед тим, як будувати структурну модель в компоненті Simulink програмного середовища Matlab, перетворимо останнє і перші чотири рівняння системи рівнянь (3.9) таким чином, щоб невідомі кожного рівняння виявилися в лівій частині. Тоді система рівнянь прийме вигляд:

$$\left. \begin{aligned} U_1 + \omega_1 L'_S i_{Sy} + \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx} + k_R p \omega_m \psi_{Ry} &= r(1 + T'_S s) i_{Sx} \\ -\omega_1 L'_S i_{Sx} + \frac{k_R}{T_R} \psi_{Ry} - k_R p \omega_m \psi_{Rx} &= r(1 + T'_S s) i_{Sy}, \\ k_R R_R i_{Sx} + (\omega_1 - p \omega_m) \psi_{Ry} &= \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + s \psi_{Rx}, \\ k_R R_R i_{Sy} + (\omega_1 - p \omega_m) \psi_{Rx} &= \frac{1}{T_R} \psi_{Ry} + s \psi_{Ry}, \\ M &= 1.5 p k_R (\psi_{Rx} i_{Sy} - \psi_{Ry} i_{Sx}), \\ \omega_m &= (M - M_H)(J s)^{-1}. \end{aligned} \right\}$$

(3.10)

На рисунку В1 додатка В зображена структурна схема електродвигуна в обертовій системі координат з перетворювачем частоти в блоці-підсистемі Control system, побудована за системою рівнянь (3.10).

Структурна модель складається з 10 основних блоків. У першому блоці представлена підсистема, в якій знаходиться перетворювач частоти, виходи цього блоку - значення напруги живлення і його частоти, які подаються на двигун.

Другим блоком є блок завдання параметрів, в яких задаються відомі змінні, присутні в системі рівнянь і необхідні для її вирішення. До змінних відносяться:

1) Коефіцієнти структурної моделі  $L'_S$ ,  $\bar{T}_R$  і  $k_R$ , які розраховані в підрозділі 3.4;

2) Число пар полюсів модельованого електродвигуна, яке знаходиться в паспортних даних відповідного електродвигуна;

3) Значення активного опору фази ротора, яке присутнє в рівняннях 3 і 4 системи рівнянь (3.10) і розраховується в підрозділі 3.4;

4) Момент інерції двигуна  $J^{-1}$ , значення якого береться з паспортних даних двигуна.

5) Навантаження на валу двигуна ( $M_c = M_n$ ), яке задається у вигляді ступеневого сигналу, що формується елементом Step.

У третьому блоці здійснюється переклад частоти напруги живлення в Гц в кутову  $\omega_1$ , яка також є швидкістю обертання системи координат. Це відбувається шляхом множення вихідного сигналу частоти з частотного перетворювача на  $2\pi$ .

У четвертому і п'ятому блоках здійснюється рішення першого і другого рівнянь системи рівнянь (3.10) і знаходження складових вектора струму, який протікає по обмотках двигуна, розкладеного по осях координат -  $i_{sx}$  і  $i_{sy}$ . У

блоках використовується елемент Transfer Fcn, який реалізує узагальнену ланку з

передавальної функцією  $W(s) = \frac{b_0s^n + b_1s^{n-1} + \dots + b_ns^0}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_ns^0}$ . З його допомогою

реалізується аперіодична ланка з функцією  $W(s) = \frac{1/r}{T'_s s + 1}$ .

У шостому і сьомому блоках здійснюється рішення третього і четвертого рівнянь системи рівнянь (3.10) і знаходження складових вектора потокозчеплення обмотки двигуна, розкладеного по осях координат -  $\psi_{Rx}$  і  $\psi_{Ry}$ . У блоках також використовується елемент Transfer Fcn, який реалізує аперіодичну ланку з передавальною функцією  $W(s) = \frac{T_R}{T_R s + 1}$ .

У восьмому блоці здійснюється рішення п'ятого рівняння системи рівнянь (3.10) і знаходження моменту двигуна.

У дев'ятому блоці здійснюється рішення шостого рівняння системи рівнянь (3.10) і знаходження кутової швидкості обертання двигуна.

У десятому блоці здійснюється вивід результатів - графіків перехідних процесів швидкості і моменту в часі, а елемент «Scope» (осцилограф) дозволяє спостерігати їх в ході моделювання.

### 3.3 Структурна модель перетворювача частоти

При необхідності регулювання частоти і напруги живильної мережі за певним законом має сенс використання універсальної моделі ПЧ. Універсальність її полягає в тому, що частота напруги, що подається на обмотку статора асинхронного двигуна, є незалежною координатою. ПЧ представлений блоком Control system, структурна схема якого представлена на рисунку 3.1. Управління здійснюється за частотою  $f_2$  і напругою  $U_2$ , які подаються на двигун. Для дослідження візьмемо три режими зміни частоти  $f_2$  - 25, 30 і 40 Гц. А щоб знайти напругу, потрібно скористатися методом пропорцій. Розрахуємо напругу для частоти 25 Гц:

Для  $U_1 / f_1 = const$  закону регулювання

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_2}{f_2} = \frac{220}{50} = \frac{U_2}{40} \quad (3.11)$$

З цієї пропорції знаходимо  $U_2 = 176$  В.

Для  $U_1 / f_1^2 = const$  закону регулювання

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \frac{U_2}{f_2^2} = \frac{220}{50^2} = \frac{U_2}{40^2} \quad (3.12)$$

З цієї пропорції знаходимо  $U_2 = 140.8$  В.

Для  $U_1 / \sqrt{f_1} = const$  закону регулювання

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U_2}{\sqrt{f_2}} = \frac{220}{\sqrt{50}} = \frac{U_2}{\sqrt{40}} \quad (3.13)$$

З цієї пропорції знаходимо  $U_2 = 196.8$  В.

Аналогічно знайдемо для частот 30 Гц, 25 Гц і зведемо в таблиці: таблиця 3.1 - Дані  $U$  та  $f$  при  $U_1 / f_1 = const$  законі регулювання; таблиця 3.2 - Дані  $U$  та  $f$  при  $U_1 / f_1^2 = const$  законі регулювання; таблиця 3.3 - Дані  $U$  та  $f$  при  $U_1 / \sqrt{f_1} = const$  законі регулювання.

Таблиця 3.1 - Дані  $U_2$  та  $f_2$  та при  $U_1 / f_1 = const$  законі регулювання

$U_1, B$	220	220	220
$f_1, Гц$	50	50	50
$U_2, B$	176	132	110
$f_2, Гц,$	40	30	25

Таблиця 3.2 - Дані  $U_2$  та  $f_2$  при  $U_1 / f_1^2 = const$  законі регулювання

$U_1, B$	220	220	220
$f_1, Гц$	50	50	50
$U_2, B$	140.8	79.2	55
$f_2, Гц$	40	30	25

Таблиця 3.3 - Дані  $U_2$  та  $f_2$  при  $U_1/\sqrt{f_1} = const$  законі регулювання

$U_1, B$	220	220	220
$f_1, Гц$	50	50	50
$U_2, B$	196.8	170.4	155.6
$f_2, Гц$	40	30	25

Структурна модель перетворювача частоти зображена на рис. 3.1. Час пуску двигуна дорівнює 2 с, а момент часу, в який відбувається зміна частоти - 5 с. Тривалість зміни частоти дорівнює 2 с. Таким чином, в елементі Signal Builder формується характеристика амплітуди частоти, а на виході виходить вторинна частота напруги живлення  $f_2$ , вид характеристики, виходячи з потрібного режиму зміни частоти, задається за допомогою перемикача: 1 - 25 Гц, 2 - 30 Гц, 3 - 40 Гц. Вміст елемента Signal Builder представлено на рисунку 3.2. За допомогою другого перемикача формується один з чотирьох законів частотного регулювання: 1 - лінійний закон  $U_1/f_1 = const$ , 2 - квадратичний  $U_1/f_1^2 = const$ , 3 - кореневий  $U_1/\sqrt{f_1} = const$ , 4 - комбінований, який буде детально досліджуватися в розділі 4.

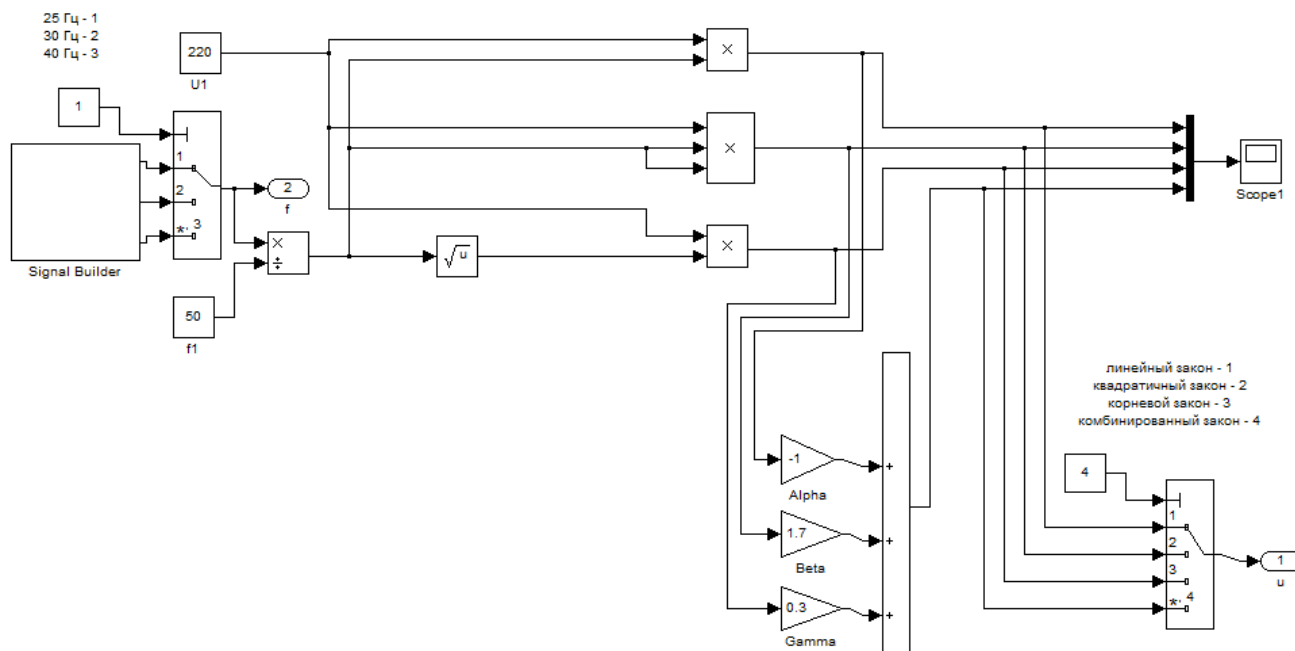


Рисунок 3.1 - Структурна модель перетворювача частоти

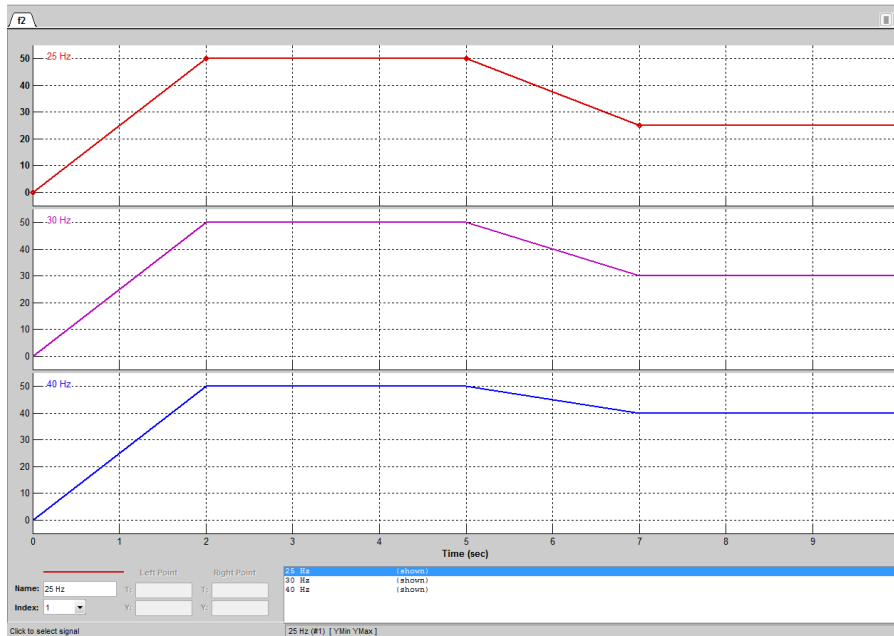


Рисунок 3.2 - Вміст елемента Signal Builder

Сумістимо часові характеристики зміни напруги в ПЧ для кожного з базових законів регулювання, підключивши виходи необхідних законів до мультиплексору, в якому задамо необхідну кількість каналів. Як вторинну частоту беремо 25 Гц шляхом завдання 1 в константі першого перемикача, і отримаємо часові характеристики в блоці Scope1:

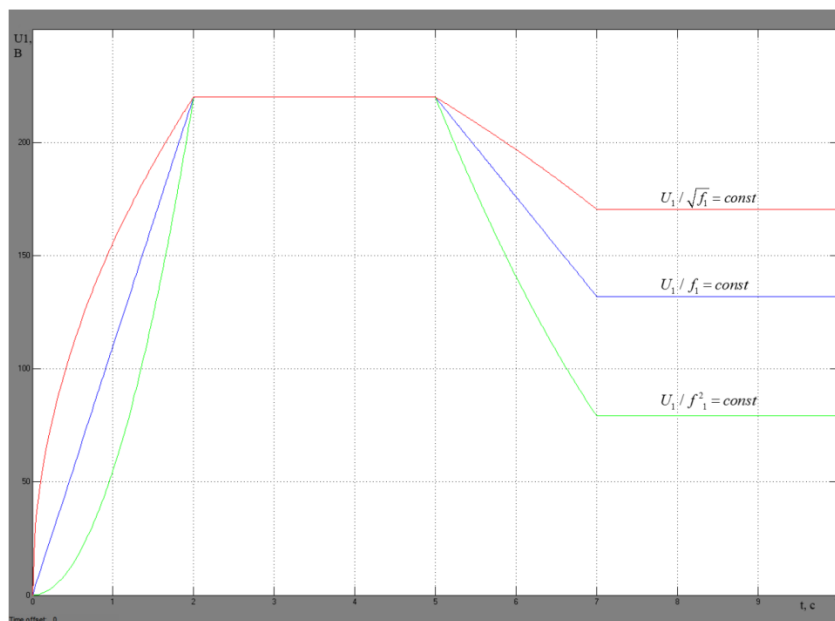


Рисунок 3.3 - Часові характеристики зміни амплітуди напруги для трьох базових законів регулювання



### 3.4 Розрахунок параметрів структурної моделі асинхронного двигуна

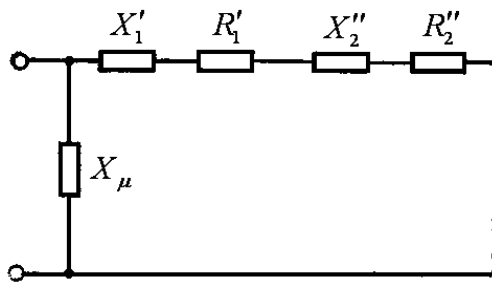
Основні технічні дані двигунів серії 4А представлені в таблиці 3.4 [9]. На рисунку 3.4 представлені Г- і Т-подібні схеми заміщення.

Таблиця 3.4 - Основні технічні дані двигунів 4А

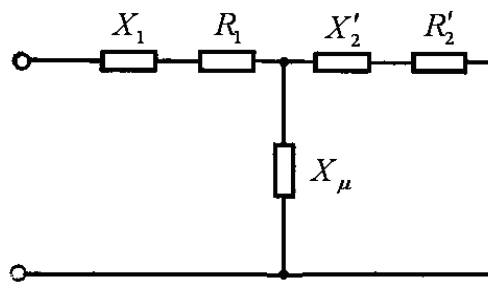
Типорозмір електродвигуна	$P_{2ном}$ , кВт	ККД, %	$p$	$\cos \varphi_f$	Відносні параметри				
					$X_{\mu*}$	$R'_{1*}$	$X'_{1*}$	$R''_{2*}$	$X''_{1*}$
4А225М2У3	55	91	1	0.92	6.6	0.026	0.092	0.019	0.12

Продовження таблиці 3.4

Типорозмір електродвигуна	$P_{2ном}$ , кВт	$U_{1ФН}$ , В	$s_H$ , %	$s_K$ , %	$J$ , кг × м <sup>2</sup>
4А225М2У3	55	220	1.8	11	0.25



а)



б)

Рисунок 3.4 - Схема заміщення: а) Г-подібна; б) Т-подібна

За відомим технічним даними АТ і параметрам Г-подібної схеми заміщення розраховуються параметри Т-подібної схеми заміщення в режимі короткого замикання (рисунок 3.4, б), коефіцієнти системи рівнянь (3.10) і параметри блоків структурної моделі асинхронного двигуна, яка представлена на рис. В1 додатка В.

Зробимо детальний розрахунок для двигуна 4A225M2У3, і зведемо розрахункові параметри в таблицю 3.5.

Номінальний фазний струм статора:

$$I_{1H} = \frac{P_{2H} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{1\Phi H} \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H} = \frac{55 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.91 \cdot 0.92} = 99.54 \text{ А.} \quad (3.14)$$

Базове значення опору:

$$Z_{\text{баз}} = \frac{U_{1\Phi H}}{I_{1H}} = \frac{220}{99.54} = 2.21 \text{ Ом.} \quad (3.15)$$

Кутова частота струму:

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}. \quad (3.16)$$

Реактивний опір розсіювання статора у відносних одиницях:

$$X_{1*} = \frac{2 \cdot X'_{1*} \cdot X_{\mu*}}{X_{\mu*} + \sqrt{X_{\mu*}^2 + 4 \cdot X'_{1*} \cdot X_{\mu*}}} = \frac{2 \cdot 0.092 \cdot 6.6}{6.6 + \sqrt{6.6^2 + 4 \cdot 0.092 \cdot 6.6}} = 0.091 \quad (3.17)$$

Коефіцієнт, що зв'язує параметри машини в Т- і Г-подібній схемах заміщення:

$$c_1 = \frac{X'_{1*}}{X_{1*}} = \frac{0.092}{0.091} = 1.0138. \quad (3.18)$$

Реактивний опір розсіювання фази статора:

$$X_1 = \frac{X'_{1*} \cdot Z_{\text{баз}}}{c_1} = \frac{0.092 \cdot 2.21}{1.0138} = 0.201 \text{ Ом.} \quad (3.19)$$

Активний опір фази статора:

$$R_1 = R_S = \frac{R'_{1*} \cdot Z_{\text{баз}}}{c_1} = \frac{0.026 \cdot 2.21}{1.0138} = 0.0567 \text{ Ом.} \quad (3.20)$$

Індуктивність розсіювання фази статора:

$$L_{1s} = \frac{X_1}{\omega_1} = \frac{0.201}{314} = 0.0006388 \text{ Гн.} \quad (3.21)$$

Реактивний опір розсіювання фази ротора:

$$X'_2 = \frac{X''_{2*} \cdot Z_{\bar{a}az}}{c_1^2} = \frac{0.12 \cdot 2.21}{1.0138^2} = 0.2581 \text{ Ом.} \quad (3.22)$$

Активний опір фази ротора:

$$R'_2 = R_r = \frac{R''_{2*} \cdot Z_{\bar{a}az}}{c_1^2} = \frac{0.041 \cdot 2.21}{1.0138^2} = 0.0409 \text{ Ом.} \quad (3.23)$$

Індуктивність розсіювання фази ротора:

$$L_{2s} = \frac{X'_2}{\omega_1} = \frac{0.2581}{314} = 0.000822 \text{ Гн.} \quad (3.24)$$

Реактивний опір взаємоіндукції:

$$X_\mu = X_{\mu*} \cdot Z_{\bar{a}az} = 6.6 \cdot 2.21 = 14.5874 \text{ Ом.} \quad (3.25)$$

Індуктивність взаємоіндукції:

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{1.5 \cdot \omega_1} = \frac{14.5874}{1.5 \cdot 314} = 0.031 \text{ Гн.} \quad (3.26)$$

Повна індуктивність фази статора:

$$L_s = L_\mu + L_{1s} = 0.031 + 0.0006388 = 0.0316 \text{ Гн.} \quad (3.27)$$

Повна індуктивність фази ротора:

$$L_R = L_\mu + L_{2s} = 0.031 + 0.000822 = 0.0318 \text{ Гн.} \quad (3.28)$$

Сумарні втрати потужності в двигуні:

$$\Delta P_\Sigma = \frac{P_{2H}}{\eta_H} - P_{2H} = \frac{55000}{0.91} - 55000 = 5440 \text{ Вт.} \quad (3.29)$$

Електричні втрати в обмотці статора:

$$\Delta P_{\Sigma 1} = m I_{1\mu}^2 R_S = 3 \cdot 99.538^2 \cdot 0.0567 = 1685 \text{ Вт.} \quad (3.30)$$

Струм намагнічення:

$$I_{\mu} = \frac{U_{1\Phi H}}{X_1 + X_m} = \frac{220}{0.2006 + 14.5874} = 14.88 \text{ А.} \quad (3.31)$$

Втрати в сталі статора:

$$\Delta P_{cm1} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_{\mu}^* \cdot Z_{\text{баз}} = 3 \cdot 14.88^2 \cdot 0.1 \cdot 2.21 = 147 \text{ Вт,} \quad (3.32)$$

де  $r_{\mu}^*$  вибирається з діапазону 0.08-0.2.

Номінальне ковзання задано  $s_H = 1.8\%$ , в відносних одиницях  $s_H = 0.018$ .

Основні втрати в обмотці ротора:

$$\Delta P_{\Sigma 2} = s_H \cdot \left( \frac{P_{2H}}{\eta_H} - \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{cm1} \right) = 0.018 \cdot \left( \frac{55000}{0.91} - 1685 - 147 \right) = 1055 \text{ Вт} \quad (3.33)$$

Сумарні втрати в сталі і механічні:

$$(\Delta P_{cm1} + \Delta P_{mx})_{ном} = \Delta P_{\Sigma} - \Delta P_{\Sigma 1} - \Delta P_{\Sigma 2} = 5440 - 1685 - 1055 = 2700 \text{ Вт.} \quad (3.34)$$

Механічні втрати:

$$\Delta P_{мехном} = (\Delta P_{cm1} + \Delta P_{mx})_{ном} - \Delta P_{cm1} = 2700 - 147 = 2553 \text{ Вт.} \quad (3.35)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{1} = 314 \text{ с}^{-1}. \quad (3.36)$$

Номінальна швидкість обертання двигуна:

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - s_n) = 314 \cdot (1 - 0.018) = 308.3 \text{ c}^{-1}. \quad (3.37)$$

Коефіцієнт в'язкого тертя:

$$Bm = \frac{\Delta P_{\text{мехном}}}{\omega_H^2} = \frac{2553}{308.3^2} = 0.025 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}. \quad (3.38)$$

Таблиця 3.5 - Основні розрахункові параметри двигуна

Типорозмір електродвигу на	$R'_2,$ <i>Ом</i>	$L_{2S},$ $10^{-3} \text{ Гн}$	$X_\mu,$ <i>Ом</i>	$L_\mu,$ <i>Гн</i>	$L_S,$ <i>Гн</i>	$L_R,$ <i>Гн</i>	$\omega_H,$ $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$Bm,$ <i>Н · м · с</i>
4A225M2Y3	0.040 9	0.822	14.587 4	0.031	0.031 6	0.031 8	308.3	0.025

Продовження таблиці 3.5

Типорозмір електродвигуна	$I_{1н},$ <i>А</i>	$Z_{\text{баз}},$ <i>Ом</i>	$\omega_0,$ $\text{c}^{-1}$	$X_{1*}$	$c_1$	$X_1,$ <i>Ом</i>	$R_1,$ <i>Ом</i>	$L_{1S},$ $10^{-3} \text{ Гн}$	$X'_2,$ <i>Ом</i>
4A225M2Y3	99.54	2.21	314	0.091	1.0138	0.201	0.0567	0.6388	0.2581

Проведемо розрахунок коефіцієнтів, що входять в модель.

$$r = R_1 + \frac{L_\mu^2}{L_R^2} \cdot R'_2 = 0.0567 + \frac{0.031^2}{0.0318^2} \cdot 0.0409 = 0.095463 \text{ Ом}. \quad (3.39)$$

$$L'_S = L_S - \frac{L_\mu^2}{L_R} = 0.0316 - \frac{0.031^2}{0.0318} = 0.0014 \text{ Гн}. \quad (3.40)$$

$$T'_S = \frac{L'_S}{r} = \frac{0.0014}{0.095463} = 0.015 \text{ с.} \quad (3.41)$$

$$T_R = \frac{L_R}{R'_2} = \frac{0.0318}{0.0409} = 0.778 \text{ с.} \quad (3.42)$$

$$k_R = \frac{L_\mu}{L_R} = \frac{0.031}{0.0318} = 0.97. \quad (3.43)$$

Коефіцієнти структурної моделі двигуна представлені в таблиці 3.6. Вони також є коефіцієнтами системи рівнянь (3.10).

Таблиця 3.6 - Параметри структурної моделі

Типорозмір електродвигуна	$r$	$L'_S$	$T'_S$	$T_R$	$k_R$
4A225M2У3	0.095463	0.0014	0.015	0.778	0.97

### 3.5 Моделювання системи АД-ПЧ з базовими законами частотного регулювання

На рисунку В1 додатка В зображена структурна модель АКЗ  $P_n = 55\text{кВт}$  в обертовій системі координат з ПЧ для зняття перехідних процесів швидкості і моменту в часі. У блоці 2 завдання параметрів вводимо необхідні змінні, як взяті з паспортних даних двигуна (табл. 3.4), так і розраховані в підрозділі 3.4. В елементах Transfer Fcn в блоках 4-5 і 6-7, що реалізують аперіодичні ланки з передавальними функціями  $W(s) = \frac{1/r}{T'_S s + 1}$  і  $W(s) = \frac{T_R}{T_R s + 1}$  відповідно, також вводимо необхідні параметри структурної моделі, потім виставляємо час 10 с. Також поставимо в блоці Step момент часу 4 с, при якому відбудеться накидання номінального навантаження (потужності) на вал двигуна.

*3.5.1 Отримання кривих швидкості і моменту в функції часу при базових законах частотного регулювання.* Для зняття кривих швидкості і моменту в функції часу відкриємо блок 1 перетворювача частоти і виберемо вторинну частоту 25 Гц, а також поставимо 1 на другому перемикачі, щоб сформувати лінійний закон зміни напруги. Далі вибираємо 30, а потім 40 Гц, а після отримання необхідних характеристик змінюємо значення на другому перемикачі на 2 і 3, і моделюємо кожен частоту послідовно з трьома базовими законами.

В результаті моделювання отримані динамічні характеристики (криві швидкості і моменту в функції часу) при пуску на холостому ході  $M_c = 0$ , накиданні навантаження  $M_c = M_n$  і зміні частоти з 50 Гц на а) 25 Гц; б) 30 Гц; в) 40 Гц для електродвигуна потужністю 55 кВт.

Перехідні характеристики зображені на рисунках В3 - В11 додатку В. На рисунках В3, В4, В5 зображені криві швидкості і моменту в функції часу при пуску на холостому ході  $M_c = 0$ , накиданні навантаження  $M_c = M_n$  і зміні частоти з 50 на 25 Гц для АКЗ  $P_n = 55$ кВт при кожному базовому законі частотного регулювання. На рисунках В6, В7, В8 зображені криві швидкості і моменту в функції часу при пуску на холостому ході  $M_c = 0$ , накиданні навантаження  $M_c = M_n$  і зміні частоти з 50 на 30 Гц для АКЗ  $P_n = 55$ кВт при кожному базовому законі частотного регулювання. На рисунках В9, В10, В11 зображені криві швидкості і моменту в функції часу при пуску на холостому ході  $M_c = 0$ , накиданні навантаження  $M_c = M_n$  і зміні частоти з 50 на 40 Гц для АКЗ  $P_n = 55$ кВт при кожному базовому законі частотного регулювання.

З результатів моделювання видно: а) за 2 с. двигун розганяється до швидкості холостого ходу  $\omega_0 = 314$ с<sup>-1</sup>; б) через 4 с. відбувається накидання номінального навантаження  $M_n$  на вал двигуна і швидкість падає до номінальної  $\omega_n = 308,3$ с<sup>-1</sup>; в) в інтервалі з 5 до 7 с. відбувається зміна частоти і швидкість падає до штучної  $\omega_u$ , яка залежить від режиму зміни частоти і обраного закону частотного регулювання.

В ході аналізу результатів моделювання також отримана інформація про співвідношення прямих показників якості, зокрема, перерегулювання з часом

перехідного процесу. Найменший рівень перерегулювання спостерігається при лінійному законі, а найбільший - при квадратичному. Найсильніші короточасні стрибки моменту при пуску двигуна спостерігаються при кореневому законі. При квадратичному законі частотного регулювання наявний значний стрибок моменту навантаження при процесі розгону двигуна до швидкості холостого ходу.

*3.5.2 Отримання природної та штучних характеристик АКЗ при базових законах частотного регулювання.* На рисунку В2 додатку В зображена структурна модель АКЗ  $P_n = 55$  кВт в обертовій системі координат з ПЧ для отримання природних і штучних характеристик при різних законах управління. Вона відрізняється від схеми для отримання динамічних характеристик тим, що блок 10, в якому виводяться результати моделювання, представлений системою елементів Clock, Ground, Switch, вона потрібна для того, щоб прибрати динамічну складову за час пуску двигуна. Природна і штучні характеристики електродвигуна будуються в елементі XY Graph.

Номінальний момент  $M_n$  і час, з якого сигнал почне наростати (2 с) виставляється в елементі Ramp, який присутній в блоці 2 завдання параметрів замість ступеневої сигналу Step, який використовувався для виставлення номінального навантаження в схемі на рис. В1 додатка В. Елемент Ramp формує лінійно змінюваний вплив.

Для побудови природних характеристик потрібно в блоці перетворювача частоти задавати закон регулювання, а первинна і вторинна частота задається однаково - 50 Гц. Для отримання штучних характеристик будемо задаватися необхідною частотою (25, 30, 40 Гц) і знаходити напругу в залежності від досліджуваного базового закону регулювання. На рисунках В12, В13, В14 представлені результати моделювання - механічні характеристики для АКЗ  $P_n = 55$  кВт при частотах 50, 40, 30, 25 Гц для кожного базового закону регулювання. Також отримані значення критичного моменту при частотах 50, 40, 30 і 25 Гц при базових законах регулювання, в сукупності вони представлені в табл. 3.7.



Таблиця 3.7 - Значення критичного моменту при зміні частот для базових законів регулювання

Частота, Гц	Критичний момент, Н·м		
	$U_1 / f_1 = const$	$U_1 / f_1^2 = const$	$U_1 / \sqrt{f_1} = const$
50	222	222	222
40	215	135	270
30	205	75	340
25	195	45	398

З рисунків і значень в таблиці 3.6 видно:

1. При  $U_1 / f_1 = const$  законі регулювання спостерігається незначне зниження критичного моменту зі зменшенням частоти;
2. При  $U_1 / f_1^2 = const$  законі регулювання спостерігається значне зниження критичного моменту зі зменшенням частоти;
3. При  $U_1 / \sqrt{f_1} = const$  законі регулювання спостерігається значне підвищення критичного моменту зі зменшенням частоти.
4. При всіх трьох законах швидкість холостого ходу знижується майже однаково зі зниженням частоти.

### Висновки по розділу 3

1. В результаті математичних перетворень на основі відомих законів була виведена система рівнянь, що описує асинхронний електродвигун підв обертовій системі координат.

2. На основі виведеної системи рівнянь в компоненті Simulink програмного середовища Matlab зібрані структурні моделі з 10 блоків для побудови динамічних, а також природних і штучних характеристик. Також зібрана структурна модель перетворювача частоти, яка представлена на структурних

моделях блоком-підсистемою Control system. Зроблено розрахунок параметрів структурної моделі, а в результаті моделювання отримані необхідні характеристики.

3. З динамічних характеристик виявлено, в який момент часу двигун розганяється до швидкості холостого ходу, скидає швидкість до номінальної, а також через який проміжок часу відбувається зміна частоти і швидкість падає до штучної. Також в ході аналізу результатів моделювання отримана інформація про співвідношення прямих показників якості, зокрема, перерегулювання, з часом перехідного процесу.

4. В ході аналізу отриманих природних і штучних характеристик виявлено, що при пропорційному законі частотного регулювання спостерігається незначне зниження критичного моменту зі зменшенням частоти; при квадратичному законі регулювання спостерігається значне зниження критичного моменту зі зменшенням частоти. При кореневому законі регулювання спостерігається значне підвищення критичного моменту зі зменшенням частоти. При всіх трьох законах швидкість холостого ходу знижується майже однаково зі зниженням частоти.

## 4 КОМБІНОВАНИЙ ЗАКОН ЧАСТОТНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

4.1 Загальне обґрунтування математичної структури комбінованого закону частотного регулювання

Комбінований закон частотного регулювання визначається як лінійна комбінація базових законів:

$$\alpha \frac{U_1}{f_1} + \beta \frac{U_1}{f_1^2} + \gamma \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const \quad (4.1)$$

де константи  $\alpha, \beta, \gamma$  - параметри комбінованого закону.

Винесемо  $U_1$  в виразі (4.1) за дужки і отримаємо:

$$U_1 \left( \frac{\alpha}{f_1} + \frac{\beta}{f_1^2} + \frac{\gamma}{\sqrt{f_1}} \right) = const$$

Зводимо отриманий вираз до спільного знаменника:

$$U_1 \cdot \frac{\alpha f_1^{3/2} + \beta f_1^{1/2} + \gamma f_1^2}{f_1^{5/2}} = const \quad (4.2)$$

Після математичних перетворень комбінований закон частотного регулювання можна записати у вигляді:

$$\frac{U_1}{f_1^*} = const \quad (4.3)$$

$$\text{де } f_1^* = \frac{f_1^{5/2}}{\alpha f_1^{3/2} + \beta f_1^{1/2} + \gamma f_1^2}$$

Таким чином, при виборі певних значень параметрів комбінованого закону можна посилити або послабити ту чи іншу базову складову.

#### 4.2 Комбінований закон частотного регулювання на структурній моделі ПЧ

Як і для базових законів регулювання, напруга живлення при комбінованому законі знаходиться з пропорції:

$$\frac{U_1}{f_1^*} = \frac{U_2}{f_2^*}; U_2 = \frac{U_1 \cdot f_2^*}{f_1^*}$$

Схема перетворювача частоти представлена на рисунку 3.1. В елементах Alpha, Beta, Gamma задаються параметри (коефіцієнти) комбінованого закону. Для того, щоб перейти до дослідження комбінованого закону і порівнянню його роботи з базовими законами в структурній моделі ПЧ, виводимо всі чотири сигнали на мультиплексор, якому задаємо необхідну кількість каналів. Як вторинну частоту використовуємо значення 25 Гц (поставимо 1 в першому перемикачі). Запускаємо схему на моделювання, результати знімаємо в блоці Scope1. На рисунках 4.1-4.3 представлені часові характеристики зміни амплітуди напруги для трьох базових законів і комбінованого закону при наборах значень параметрів, представлених в таблиці 4.1.

Також має виконуватися така умова:  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ . Вона необхідне для досягнення номінального значення напруги живлення і його частоти (220 В при 50 Гц), і, отже, необхідної швидкості двигуна при моделюванні.

Таблиця 4.1 - Набори значень параметрів комбінованого закону для дослідження

№ п/п	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1	0.4	0.55	0.05
2	0.4	0.1	0.5
3	0.3	0.5	0.2

Часові характеристики зміни амплітуди напруги при комбінованому законі з кожним набором параметрів з табл. 4.1 в сукупності в базовими законами частотного регулювання представлені на рис. 4.1-4.3.

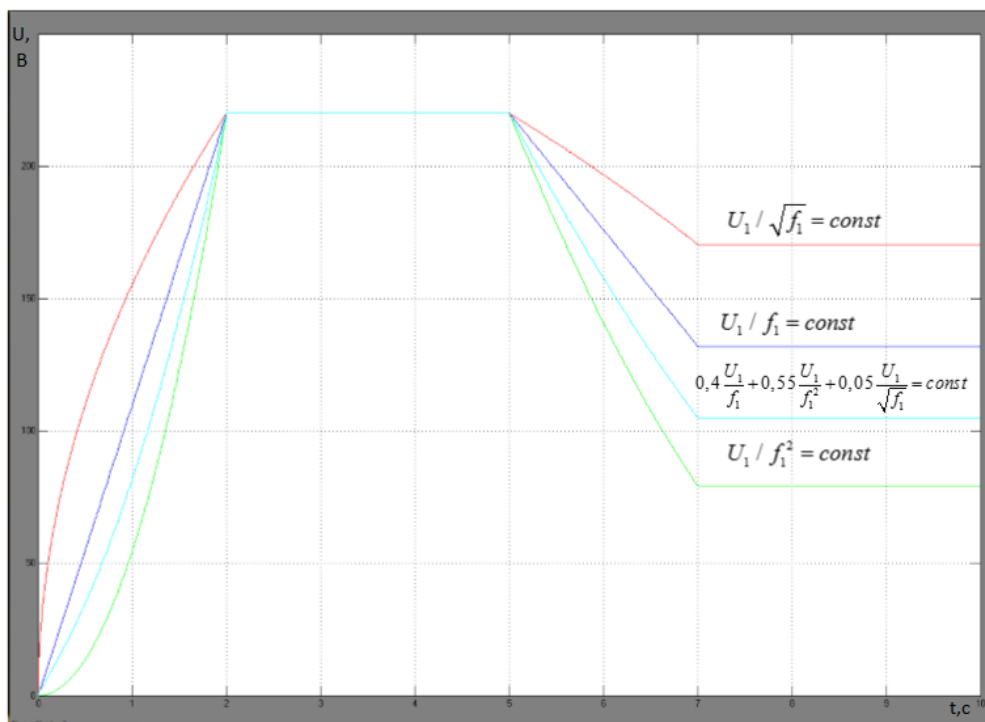


Рисунок 4.1 - Часові характеристики зміни амплітуди напруги для трьох базових законів регулювання і комбінованого закону з параметрами  $\alpha = 0.4, \beta = 0.55, \gamma = 0.05$

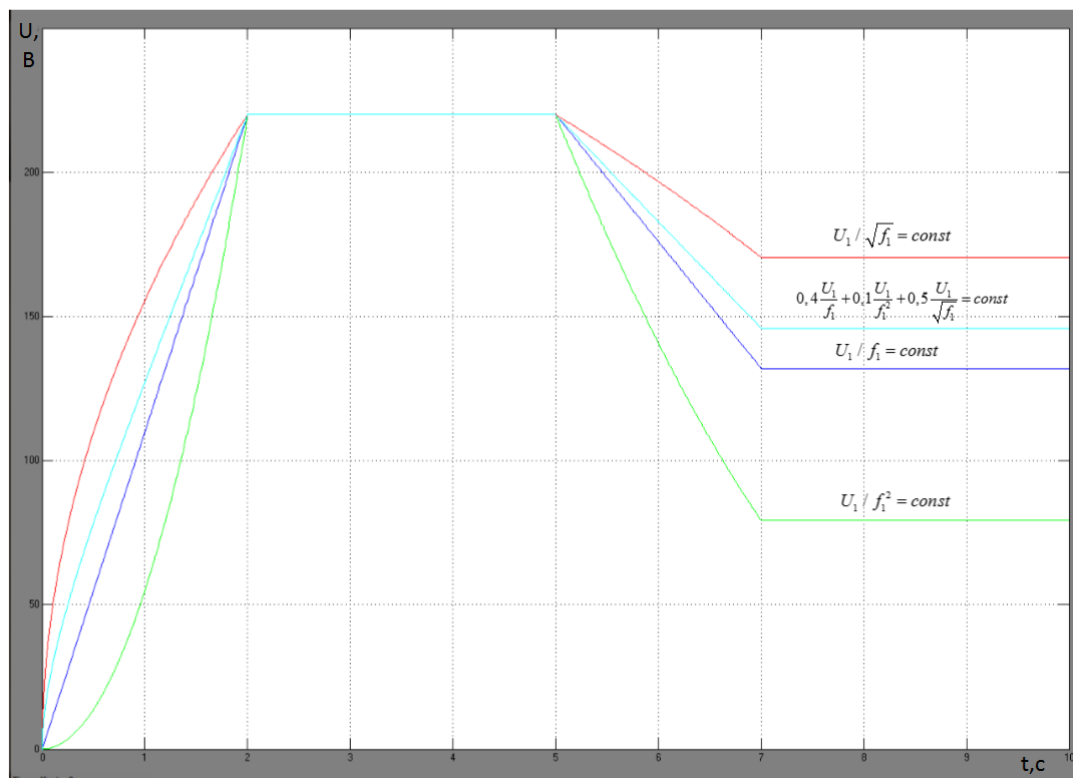


Рисунок 4.2 – Часові характеристики зміни амплітуди напруги для трьох базових законів регулювання і комбінованого закону з параметрами  $\alpha = 0.4, \beta = 0.1, \gamma = 0.5$

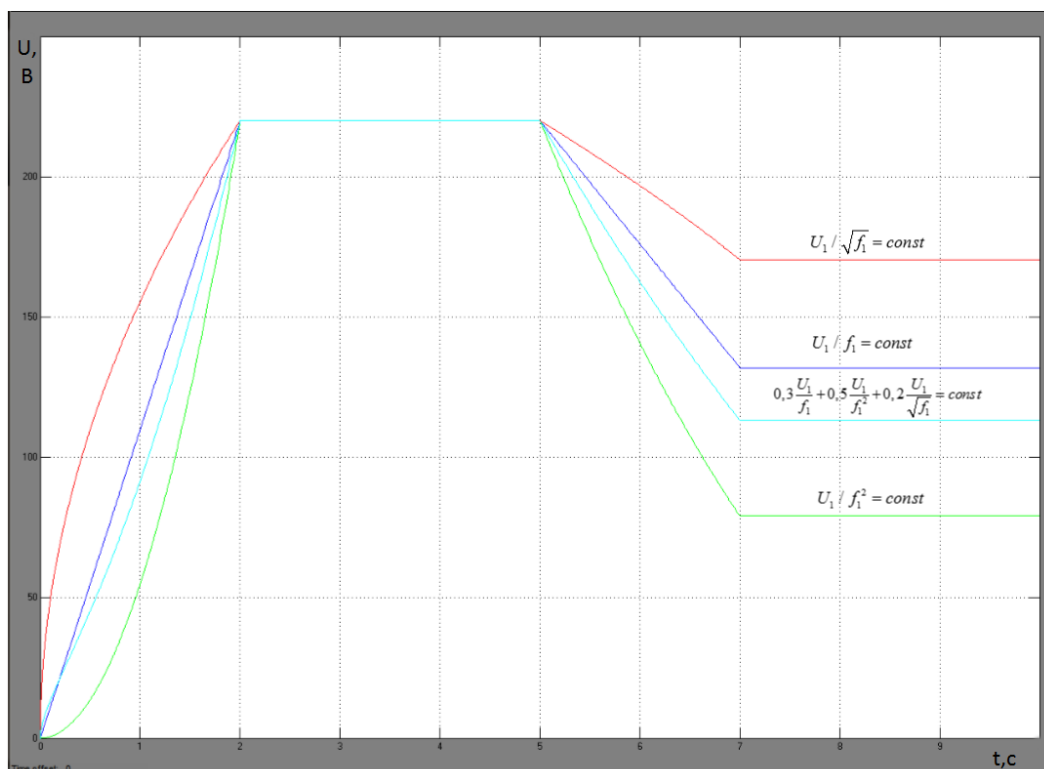


Рисунок 4.3 – Часові характеристики зміни амплітуди напруги для трьох базових законів регулювання і комбінованого закону з параметрами  $\alpha = 0.3, \beta = 0.5, \gamma = 0.2$

При аналізі отриманих часових характеристик бачимо, що при завданні першого набору параметрів з табл. 4.1 (див. Рисунок 4.1) значення амплітуди напруги після зміни частоти знаходиться між значеннями при квадратичному і лінійному законі частотного регулювання. Що і очікувалося, так як обраний варіант комбінованого закону повинен посилювати лінійну складову в квадратичному законі, а, отже, змінювати амплітуду напруги при зміні частоти так, що після зміни частоти вона наближається до амплітуди значення при лінійному законі. При завданні другого набору параметрів з табл. 4.1 (див. Рисунок 4.2) значення амплітуди напруги після зміни частоти знаходиться між значеннями при кореневому і лінійному законі частотного регулювання, але ближче до лінійного. Тобто обраний варіант комбінованого закону посилює лінійну складову в кореневому законі, а, отже, змінює амплітуду напруги так, що

після зміни частоти вона наближається до амплітуди значення при лінійному законі. При аналізі часових характеристик на рисунку 4.3 видно, що значення амплітуди напруги після зміни частоти знаходиться між значеннями при квадратичному і лінійному законі частотного регулювання, але ще ближче до лінійного, ніж це спостерігалось на рисунку 4.1. Тобто третій варіант вибору параметрів комбінованого закону (див. Табл. 4.1) посилює не тільки лінійну складову в комбінованому законі, але також і кореневу, і, отже, ще більше наближає значення амплітуди напруги при зміні частоти до значення амплітуди напруги при застосуванні лінійного закону.

Таким чином, при аналізі часових характеристик видно, що при зміні параметрів комбінованого закону характеристика амплітуди напруги може приймати будь-яке значення відносно характеристик амплітуди напруги при базових законах, може як наближатися, так і віддалятися від них. Також було встановлено, як саме кожен з параметрів впливає на форму характеристики, і яких приблизно меж значень параметрів комбінованого закону потрібно дотримуватися, щоб часова характеристика амплітуди напруги набула близьку до конкретного базового закону форму, або відмінну від них.

#### 4.3 Моделювання системи АД-ПЧ з комбінованим законом частотного регулювання

Структурна модель АКЗ  $P_n = 55\text{кВт}$  в обертовій системі координат з ПЧ для зняття перехідних процесів швидкості і моменту в часі зображена на рисунку В1 додатка В. Принцип її роботи описаний в підрозділі 3.2.

4.3.1 *Отримання кривих швидкості і моменту в функції часу при різних параметрах комбінованого закону регулювання.* Для зняття кривих швидкості і моменту в функції часу в блоці Signal Builder перетворювача частоти виберемо вторинну частоту 25 Гц, і виберемо в другому перемикачі 4, щоб перейти на комбінований закон зміни напруги. Далі вибираємо 30, а потім 40 Гц і моделюємо

кожну частоту послідовно при трьох значеннях параметрів комбінованого закону, представлених в табл. 4.1, вони задаються у відповідних блоках Alpha, Beta і Gamma. У блоці Step задамо момент часу 4 с, при якому відбудеться накидання номінального навантаження на вал двигуна, і запускаємо схему на моделювання.

Перехідні характеристики представлені на рисунках Г1 - Г9 додатки Г. На рисунках Г1, Г2, Г3 представлені криві швидкості і моменту в функції часу при пуску на холостому ході  $M_c = 0$ , накиданні навантаження  $M_c = M_n$  і зміні частоти з 50 на 25 Гц для АКЗ  $P_n = 55\text{кВт}$  при кожному з трьох наборів параметрів (див. таблицю 4.1) комбінованого закону управління. На рисунках Г4, Г5, Г6 представлені криві швидкості і моменту в функції часу при пуску на холостому ході  $M_c = 0$ , накиданні навантаження  $M_c = M_n$  і зміні частоти з 50 на 30 Гц для АКЗ  $P_n = 55\text{кВт}$  при кожному наборі параметрів комбінованого закону управління. На рисунках Г7, Г8, Г9 представлені криві швидкості і моменту в функції часу при пуску на холостому ході  $M_c = 0$ , накиданні навантаження  $M_c = M_n$  і зміні частоти з 50 на 40 Гц для АКЗ  $P_n = 55\text{кВт}$  при кожному наборі параметрів комбінованого закону управління.

Порівняємо криві швидкості, які відповідають комбінованому закону регулювання при параметрах  $\alpha = 0.4, \beta = 0.55, \gamma = 0.05$ , і які представлені на рисунках Г1, Г4 та Г7, з кривими швидкості, які відповідають квадратичним законом (рис. В4, В7, В10 додатку В). Спостерігається, що при певному режимі зміні частоти швидкість при застосуванні кожного з законів відповідно знижується до аналогічних значень, тоді як перехідні процеси, як видно з кривих моменту і швидкості, стають більш плавними, особливо під час пуску двигуна. Таким чином, прямі показники якості поліпшуються, і при цьому комбінований закон з коефіцієнтами  $\alpha = 0.4, \beta = 0.55, \gamma = 0.05$  працює аналогічно квадратичному в плані зміни кутової швидкості двигуна, а, отже, і необхідного параметра в системі.

Далі порівняємо криві швидкості, які відповідають комбінованому закону регулювання з параметрами  $\alpha = 0.4, \beta = 0.1, \gamma = 0.5$ , які зображені на рисунках Г2, Г5 і Г8, з кривими швидкості, які відповідають кореневому закону регулювання



(рис. В5, В8, В11 додатку В). Спостерігається, що при певному режимі зміни частоти швидкість при застосуванні кожного з законів відповідно знижується до аналогічних значень, і в той же час на кривих швидкості і моменту можна спостерігати, що перерегулювання при пуску двигуна стало менше. Таким чином, присутня закономірність, аналогічна попередньому випадку: прямі показники якості перехідних процесів поліпшуються, і при цьому комбінований закон з коефіцієнтами  $\alpha = 0.4, \beta = 0.1, \gamma = 0.5$  працює аналогічно квадратичному.

І нарешті, можна порівняти криві швидкості, відповідні комбінованому закону регулювання з параметрами  $\alpha = 0.3, \beta = 0.5, \gamma = 0.2$  (рис. Г3, Г6 і Г9) з кривими швидкості, які відповідають кореневому закону регулювання (рис. В5, В8, В11 додатку В). Бачимо, що відмінність в зниженні швидкості при зміні частот становить 10 рад/с для кожного режиму зміни частоти (25, 30, 40 Гц), тоді як коливальні процеси при пуску практично відсутні, і форма кривих моменту і швидкості при пуску двигуна (в період 0-2 с) стає майже лінійної.

Робимо висновок, що можна підібрати параметри комбінованого закону таким чином, щоб кутова швидкість двигуна при зміні частоти знижувалася до необхідної, і при цьому істотно поліпшувати прямі показники якості перехідних процесів в системі. Це робить комбінований закон більш гнучким у порівнянні з базовими законами частотного регулювання, його застосування може підвищити енергоефективність системи, а також надійність і довговічність роботи виконавчих механізмів.

*4.3.2 Отримання природної і штучних характеристик АКЗ при різних параметрах комбінованого закону управління.* На рисунку В2 додатку В зображена структурна модель АКЗ  $P_n = 55$  кВт в обертовій системі координат з ПЧ для отримання природних і штучних характеристик при різних законах частотного регулювання. У блоці Ramp виставляємо номінальний момент і час, з якого сигнал почне наростати - 2 с. Для побудови природної характеристики потрібно в блоці ПЧ задавати напругу і частоту, при цьому первинна і вторинна частота задається однаково - 50 Гц. Для отримання штучних характеристик потрібно задаватися частотою (25, 30, 40 Гц) і знаходити напругу в залежності від

параметрів комбінованого закону регулювання. Для наочності крім параметрів комбінованого закону, представлених в табл. 4.1, використовуємо ще два набори, щоб подивитися, як може змінюватися критичний момент при різних значеннях параметрів комбінованого закону, і чи можна отримати закономірності зміни критичного моменту, які не властиві базовим законам частотного регулювання, зокрема, незначне підвищення критичного моменту.

Таблиця 4.2 - Набори значень параметрів комбінованого закону для побудови природної та штучних характеристик

№ п/п	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1.	0.4	0.55	0.05
2.	0.4	0.1	0.5
3.	0.3	0.5	0.2
4.	0.6	-0.3	0.7
5.	0.75	0.15	0.1

На рисунках Г10-Г14 представлені результати моделювання - механічні характеристики  $\omega = f(M)$  для АКЗ Рн = 55 кВт при частотах 50, 40, 30, 25 Гц для кожного з п'яти наборів параметрів комбінованого закону регулювання.

З характеристик визначимо значення критичного моменту при частотах 50, 40, 30 і 25 Гц при різних параметрах комбінованого закону регулювання. В сукупності вони представлені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Значення критичного моменту при зміні частот для комбінованого закону регулювання

Частота, Гц	Критичний момент, Н·м				
	$\alpha = 0.4,$ $\beta = 0.55,$ $\gamma = 0.05$	$\alpha = 0.4,$ $\beta = 0.1,$ $\gamma = 0.5$	$\alpha = 0.3,$ $\beta = 0.5,$ $\gamma = 0.2$	$\alpha = 0.6,$ $\beta = -0.3,$ $\gamma = 0.7$	$\alpha = 0.75,$ $\beta = 0.15,$ $\gamma = 0.1$
50	222	222	222	222	222
40	170	235	180	287	208

30	130	250	151	360	190
25	105	265	140	414	179

З рисунків і значень в таблиці 4.2 спостерігаємо наступне:

1. При  $0.4U_1 / f_1 + 0.55U_1 / f_1^2 + 0.05U_1 / \sqrt{f_1} = const$  і  $0.3U_1 / f_1 + 0.5U_1 / f_1^2 + 0.2U_1 / \sqrt{f_1} = const$  законах регулювання (перший і третій набір параметрів комбінованого закону в табл. 4.2) спостерігається значне зниження критичного моменту зі зменшенням частоти, аналогічно квадратичному закону;
2. При  $0.4U_1 / f_1 + 0.1U_1 / f_1^2 + 0.5U_1 / \sqrt{f_1} = const$  законі регулювання (другий набір параметрів в табл. 4.2) спостерігається незначне підвищення критичного моменту зі зменшенням частоти. Така закономірність невластива базовим законам частотного регулювання;
3. При  $0.6U_1 / f_1 - 0.3U_1 / f_1^2 + 0.7U_1 / \sqrt{f_1} = const$  законі регулювання (четвертий набір параметрів в табл. 4.2) спостерігається значне підвищення критичного моменту зі зменшенням частоти, аналогічно кореневому закону;
4. При  $0.75U_1 / f_1 + 0.15U_1 / f_1^2 + 0.1U_1 / \sqrt{f_1} = const$  законі регулювання (п'ятий набір параметрів в табл. 4.2) спостерігається незначне зниження критичного моменту зі зменшенням частоти, аналогічно лінійному закону;
5. При всіх п'яти варіантах комбінованого закону швидкість холостого ходу знижується майже однаково зі зниженням частоти, аналогічно базовим законам частотного регулювання.

Щоб порівняти динаміку зміни критичного моменту двигуна з пониженням частоти при базових законах частотного регулювання і комбінованому законі з різними параметрами, побудуємо графік залежності критичного моменту від частоти, який представлений на рис. 4.4, тут  $\alpha, \beta, \gamma$ - параметри комбінованого закону.

Робимо висновок, що при правильному завданні параметрів для посилення однієї або декількох базових складових комбінованого закону регулювання динаміка зміни критичного моменту двигуна з пониженням частоти може бути керованою, тоді як при застосуванні базових законів вона була незмінною.

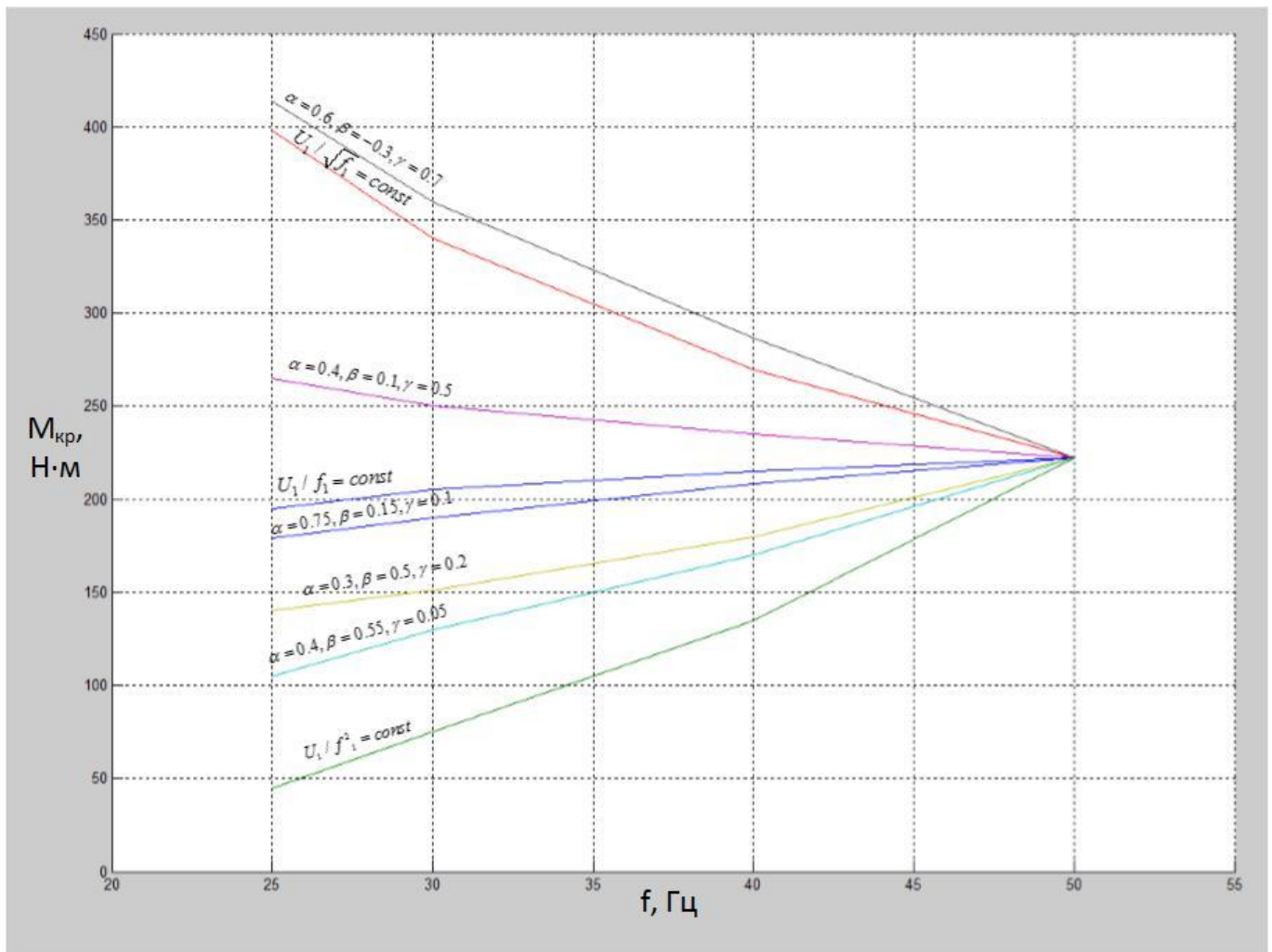


Рисунок 4.4 - Залежність критичного моменту від частоти при базових законах частотного регулювання і комбінованому законі з різними параметрами

#### 4.4 Частотне регулювання компресорної станції на прикладі каналу тиску

Контрольованими параметрами в системі є тиск і температура холодоагенту, вони пов'язані зі зміною кутової швидкості обертання двигуна компресорної станції, яка, в свою чергу, регулюється перетворювачем частоти.

Проілюструємо роботу базових законів частотного регулювання та запропонованого комбінованого на прикладі каналу тиску в системі. Фактичний тиск в системі отримується за допомогою нагнітання в робочий об'єм відповідного холодоагенту шляхом циклічного впливу обертового виконавчого

механізму компресора, причому тиск буде тим вище, чим більше повне число обертів відповідного виконуючого механізму виконано на поточний момент.

Шляхом моделювання досліджуємо динаміку зміни тиску в системі при базових законах частотного регулювання електроприводу, а також комбінованому законі при різних наборах параметрів. Для цього побудуємо структурну модель компресорної станції з частотним регулюванням і електродвигуном АКЗ Рн = 55 кВт, вона представлена на рис. Д1 додатка Д. Модель складається з 11 блоків, блоки 1-9 дублюють за своїм призначенням блоки структурної моделі електродвигуна в обертовій системі координат, описаної в підрозділі 3.2. У блоці 2, в якому задаються параметри, крім коефіцієнтів структурної моделі і необхідних технічних характеристик двигуна є ще одна змінна Pz - робоче значення тиску в системі, яке за технічними характеристиками компресора Danfoss VSH170 (табл. 2.1), дорівнює  $3,02 \cdot 10^5$  Па. Навантаження на валу двигуна вважаємо статичним (елемент Constant в блоці 2 завдання параметрів).

У блоці 10 знімаються дані про тиск у системі, при цьому значення кутової швидкості обертання вала двигуна, що приводить станцію в дію, підсумовується з кутовою частотою напруги живлення, яка також є швидкістю обертання системи координат. Очевидно, що повне число обертів пов'язано з кутовою швидкістю обертання, тобто число обертів може бути розраховане як інтеграл кутової швидкості обертання вала двигуна, поділене на  $2\pi$ . Послідовно до цього інтегралу розташоване підсилювальне коло, що унормовує циклічну продуктивність компресора до одиниці часу. Далі значення тиску в кожен момент часу надходять на вхід перетворювача частоти, де порівнюються з необхідним тиском. Залежно від результату порівняння перетворювач розраховує частоту, і, отже, напругу, які потрібно подати на двигун, щоб виробити необхідну швидкість обертання.

У блоці 11 виводяться результати моделювання - криві зміни поточного рівня тиску холодоагенту в системі з часом  $f(P_t) = t$ . Змінну часу задаємо за допомогою елемента Clock, яку зв'яжемо з часом моделювання - 25 с. В ході моделювання отримані криві зміни тиску з часом при базових законах частотного регулювання, і при комбінованому з різними коефіцієнтами. До того ж з'ясовано,

що в такому випадку не потрібно дотримуватися умови рівності суми коефіцієнтів комбінованого закону одиниці, так як вторинна частота,  $i$ , отже, напруга, які подаються на обмотки двигуна, не задаються, а розраховуються перетворювачем частоти, виходячи з порівняння поточного значення тиску в системі з необхідним. Параметри комбінованого закону, які застосовуються для дослідження, представлені в табл. 4.4, а результати моделювання представлені на рисунках Д2-Д8 додатку Д.

Таблиця 4.4 - Параметри комбінованого закону для дослідження динаміки зміни тиску

№ п/п	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1.	0,1	0,0001	0,1
2.	5	1	-2
3.	0,06	0,0005	0,06
4.	-0,008	-0,3	1,2

Проаналізуємо результати моделювання.

1. Криві зміни поточного рівня тиску холодоагенту в системі при застосуванні до моделі компресорної станції лінійного і кореневого законів частотного регулювання (рис. Д2 і Д4 додатка Д відповідно) мають майже однакову форму, нагнітання газу і досягнення робочого тиску в системі відбувається приблизно за 20 с . На характеристиках також можна спостерігати певну нелінійну динаміку зміни відповідного параметра на етапі пуску двигуна, що може призводити до небажаної динаміки вторинних параметрів, яка може позначатися на довговічності роботи відповідного обладнання.

2. Крива зміни поточного рівня тиску в системі при застосуванні до моделі компресорної станції квадратичного закону частотного регулювання зображена на рис. Д3 додатку Д. На етапі пуску двигуна вона має схожу форму з кривими при лінійному і кореневому законах, також можна спостерігати нелінійну динаміку. При застосуванні квадратичного закону також присутній надлишковий тиск в

системі, більше необхідного значення, і це робить квадратичний закон частотного регулювання недостатньо точним.

3. Крива зміни поточного рівня тиску в системі при застосуванні до компресорної станції комбінованого закону частотного регулювання з параметрами  $\alpha = 0.1, \beta = 0.0001, \gamma = 0.1$  представлена на рис. Д5 додатку Д. Видно, що рівень необхідного тиску в системі досягається повільніше, ніж при застосуванні лінійного і кореневого законів - приблизно за 22 с. Крива зміни відповідного параметра також істотно відрізняється за формою, особливо на етапі пуску двигуна. Вона стає лінійною, без певної кривизни, характерної для базових законів. Збільшення тиску в системі відбувається більш плавно, тому можна зробити висновок, що такий варіант закону частотного регулювання робить систему більш надійною, ніж при застосуванні до неї лінійного і кореневого.

4. Крива зміни поточного рівня тиску в системі при застосуванні до компресорної станції комбінованого закону частотного регулювання з параметрами  $\alpha = 5, \beta = 1, \gamma = -2$  представлена на рис. Д6 додатку Д. Рівень необхідного тиску в системі досягається приблизно за той же час, що при застосуванні лінійного і кореневого законів - 20 с. Крива зміни тиску майже не відрізняється за формою від кривих при застосуванні лінійного і кореневого законів, проте можна спостерігати відсутність нелінійної динаміки на етапі пуску двигуна.

5. Крива зміни поточного рівня тиску в системі при застосуванні до компресорної станції комбінованого закону частотного регулювання з параметрами  $\alpha = 0,06, \beta = 0,0005, \gamma = 0,06$  представлена на рис. Д7 додатку Д. Рівень необхідного тиску в системі досягається повільніше, ніж при застосуванні лінійного і кореневого законів - приблизно за 23 с. Відсутня нелінійна динаміка на етапі пуску двигуна, крива зміни тиску ще більш лінійна спочатку, ніж крива, зображена на рис. Д5 додатку Д і проаналізована в пункті 3, відповідно, збільшення тиску в системі відбувається з ще більшою плавністю і система стає ще надійніше.

6. Крива зміни поточного рівня тиску в системі при застосуванні до компресорної станції комбінованого закону частотного регулювання з параметрами  $\alpha = -0,008$ ,  $\beta = -0,03$ ,  $\gamma = 1,2$  представлена на рис. Д8 додатку Д. Рівень необхідного тиску в системі досягається приблизно за той же час, що при застосуванні лінійного і кореневого законів - 20 с. Крива зміни тиску істотно відрізняється за формою від кривих при застосуванні базових законів частотного регулювання і кривих при застосуванні варіантів комбінованого закону, описаних в попередніх пунктах. До 3 с характеристика має лінійну форму і збільшення тиску в системі відбувається дуже плавно, а після 3 секунд відповідний параметр починає збільшуватися швидше.

7. При аналізі кривих зміни тиску в системі при застосуванні до компресорної станції комбінованих законів з коефіцієнтами, представленими в табл. 4.4, бачимо, що надлишкового рівня тиску не спостерігається ні при одному варіанті комбінованого закону, на відміну від квадратичного закону, і це дозволяє зробити висновок про достатню точність комбінованого закону при правильному виборі параметрів. Після досягнення рівня робочого тиску в системі відповідний параметр більше не змінюється.

Проаналізувавши результати дослідження, робимо висновок, що динаміка зміни тиску в системі і швидкість досягнення необхідного значення можуть формуватися в залежності від вимог конкретної системи, якщо правильно вибрати параметри комбінованого закону регулювання. Порівнявши криві зміни відповідного параметра в системі з часом при застосуванні базових законів і комбінованого, робимо висновок, що при різному підборі параметрів комбінований закон може як приймати властивості базових законів, особливо на етапі пуску двигуна, так і істотно відрізнятися від базових. Таким чином, комбінований закон задає додаткові ступені свободи в плані зміни форми вихідного сигналу, на відміну від незмінних базових законів. Крім цього, внаслідок наявності відповідних коефіцієнтів комбінованого закону можна формувати адаптивне управління, підбираючи динамічно їх співвідношення.



## Висновки по розділу 4

1. Математична структура комбінованого закону частотного регулювання складена у вигляді аналітичного виразу - лінійної комбінації трьох базових законів. Комбінований закон є сумою базових законів, помножених на постійні коефіцієнти - параметри комбінованого закону. Загальний вигляд комбінованого

закону записаний як  $\alpha \frac{U_1}{f_1} + \beta \frac{U_1}{f_1^2} + \gamma \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const$ , його також можна записати в

вигляді  $\frac{U_1}{f_1^*} = const$ , де  $f_1^* = \frac{f_1^{5/2}}{\alpha f_1^{3/2} + \beta f_1^{1/2} + \gamma f_1^2}$ .

2. Проаналізовано часові характеристики зміни амплітуди напруги при застосуванні комбінованого закону з трьома варіантами параметрів, і проведено їх порівняння з характеристиками при застосуванні базових законів. З'ясовано, що при зміні параметрів комбінованого закону характеристика амплітуди напруги при різних режимах зміни частоти може приймати будь-яку форму відносно характеристик амплітуди напруги при застосуванні базових законів, може як наближатися, так і віддалятися від них.

3. Побудовано динамічні характеристики електродвигуна АКЗ Рн = 55 кВт із застосуванням частотного перетворювача, що працює за комбінованим законом регулювання, досліджені три варіанти параметрів закону. З'ясовано, що комбінований закон при певному наборі параметрів може приймати властивості квадратичного і кореневого законів, але при цьому спостерігається поліпшення співвідношення прямих показників якості перехідних процесів на етапі пуску двигуна.

4. Побудовано природні і штучні характеристики АКЗ Рн = 55 кВт із застосуванням комбінованого закону регулювання, досліджені п'ять варіантів закону. З'ясовано, що при певному виборі параметрів комбінованого закону критичний момент може змінюватися з динамікою, аналогічною до будь-якого з базових законів частотного регулювання. Також при певному наборі параметрів спостерігається динаміка, невласлива базовим законам. Отже, динаміка зміни

критичного моменту при застосуванні до системи з електродвигуном комбінованого закону з певним набором параметрів може бути керованою, на відміну від базових законів. Тоді як швидкість холостого ходу з пониженням частоти знижується майже однаково.

5. Проаналізовано процес частотного регулювання компресорної станції із застосуванням базових законів частотного регулювання та комбінованого закону при різних параметрах на прикладі управління по каналу тиску. Побудовано криві зміни тиску в системі при застосуванні різних законів частотного регулювання. Після аналізу та порівняння отриманих кривих визначено, що при певному підборі параметрів комбінований закон може задавати як схожу з базовими законами динаміку зміни відповідного параметра, так і істотно відрізняється від них за швидкістю і плавністю зміни відповідного параметра. Це робить комбінований закон більш гнучким і здатним задавати додаткові ступені свободи, і перспективним є побудова адаптивної системи управління, де співвідношення коефіцієнтів комбінованого закону може підбиратися динамічно безпосередньо в процесі роботи.

## ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Використання частотного перетворювача в системах з асинхронним електродвигуном дозволяє усунути один з істотних недоліків електродвигунів з короткозамкненим ротором - постійну частоту обертання ротора електродвигуна, не залежну від навантаження. Частотне регулювання створює можливість управління швидкістю електродвигуна відповідно до характеру навантаження за певним, заздалегідь заданим законом частотного регулювання. Це в свою чергу дозволяє уникати складних перехідних процесів в електричних мережах, забезпечуючи роботу обладнання в найбільш економічному режимі. Частотний пуск керованого двигуна забезпечує його плавний, без підвищених пускових струмів і механічних ударів, розгін. Це знижує навантаження на двигун і пов'язані з ним передавальні механізми, збільшує термін їх експлуатації. При цьому з'являється можливість зниження потужності приводних двигунів навантажених механізмів за умовами пуску.

Метою магістерської роботи було:

1. Провести дослідження трьох базових законів частотного регулювання - лінійного, квадратичного та кореневого, - на моделі електродвигуна компресорної станції з частотним перетворювачем.

2. Вивести комбінований закон, результати дослідження якого порівняти з результатами дослідження базових законів. Зробити висновки про доцільність використання комбінованого закону регулювання.

Основні результати роботи:

1. Проведено аналітичний огляд літературних джерел з метою більш детального розуміння відомих базових законів частотного регулювання та областей їх застосування. Побудовано структурну модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором з пуском від частотного перетворювача в компоненті Simulink програмного середовища Matlab. В процесі моделювання побудовані динамічні характеристики (криві моменту і швидкості в функції часу), а також

природна і штучні характеристики електродвигуна при базових законах частотного регулювання і при різних режимах зміни частоти - з 50 Гц відповідно на 25, 30 і 40 Гц.

2. В ході аналізу результатів моделювання отримана інформація про співвідношення прямих показників якості, зокрема, перерегулювання з часом перехідного процесу для базових законів регулювання.

3. Проведено оцінку, яким чином кожен з базових законів впливає на динаміку зміни критичного моменту двигуна. При лінійному законі спостерігається незначне зниження критичного моменту з пониженням частоти, при квадратичному - значне зниження. При кореневому законі, навпаки, спостерігається значне підвищення критичного моменту з пониженням частоти.

4. Складена математична структура комбінованого закону частотного регулювання у вигляді аналітичного виразу, яке є лінійною комбінацією трьох базових законів із змінними параметрами (коефіцієнтами), що по суті є можливістю акцентуації вкладів базових складових в залежності від конкретного додатка за допомогою вибору значень відповідних коефіцієнтів.

5. Отриманий комбінований закон досліджений на структурній моделі асинхронного двигуна, а відповідні результати порівняні з характеристиками при застосуванні базових законів. Зроблено висновок, що при певному виборі параметрів комбінованого закону він здатний приймати властивості базових, з одночасним поліпшенням співвідношення прямих показників якості перехідних процесів, і отже, робити процес більш енергоефективним, а також підвищувати надійність і довговічність відповідного обладнання. Також зроблено висновок про вплив комбінованого закону з відповідними параметрами на динаміку зміни критичного моменту з пониженням частоти, вона може бути керованою і відмінною від динаміки при базових законах.

6. Побудовано структурну модель компресорної станції з частотним регулюванням і проведено дослідження роботи комбінованого закону частотного регулювання на прикладі управління по каналу тиску. Проведено порівняльний аналіз з випадком регулювання на основі базових законів. В результаті аналізу

отриманих кривих зміни тиску в процесі регулювання зроблено висновок про вплив базових законів і комбінованого з різними параметрами на характер загального перехідного процесу. При базових законах форма характеристики незмінна і має певну кривизну на етапі пуску двигуна, що може спричинити небажану динаміку зміни вторинних параметрів руху системи, а, отже, може привести до зниження надійності та довговічності обладнання. При певному підборі коефіцієнтів комбінованого закону можна задавати швидкість зміни сукупності параметрів руху системи.

7. Зроблено висновок, що завдяки можливості вибору коефіцієнтів, посилення або ослаблення тієї чи іншої базової складової, комбінований закон є більш гнучкий і здатний задавати додаткові ступені свободи системі, що робить перспективним побудову адаптивної системи управління, де співвідношення коефіцієнтів комбінованого закону може здаватися динамічно безпосередньо в процесі роботи.

8. Комбінований закон також при необхідності здатний забезпечувати технічну лінеаризацію внутрішніх параметрів перехідних процесів, що може бути використано як засіб боротьби з помпажем, тобто засобом антипомпажного регулювання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інструктивні вказівки до виконання курсових і дипломних проектів / укладачі: В. Д. Черв'яков, О. Ю. Журавльов, І. В. Щокотова - Суми : Сумський державний університет, 2013. — 69 с.
2. Буряк І.А., Павлов А.В. Частотне регулювання електроприводом компресорної станції: тез. доп. наук.-техн. конференції ІМА-2015 (квітень 2015 р.) /відп. ред. Т. В. Лютий – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 161 с.
3. Павлов А. В. Багатовимірні системи автоматичного управління: конспект лекцій для студ. за спец. 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" денної, заочної та дистанційної форм навчання / А. В. Павлов, О. Ю. Журавльов, Г. А. Олексієнко. — Суми : СумДУ, 2018. — 67 с.
4. Бондаренко Г. А. Компресорні станції : підручник / Г. А. Бондаренко, Г. В. Кирик. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – 385 с.
5. Возняк, О.М., Штуць. А.А., Колісник М.А. Сучасні системи електроприводів. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ТВОРИ, 2021. – 280 с.
6. Розводюк М. П. Розрахунок і конструювання трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Курсове проектування : навчальний посібник / М. П. Розводюк, С. М.Левицький, В. С. Бомбик. - Вінниця : ВНТУ, 2018. - 135 с.
7. Analysis of torsional torques in starting of large squirrel-cage induction motors / Shaltout Adel A. // IEEE Trans. Energy Convers. – 1994. – 9, № 1. – p. 135—141.
8. A novel approach to circuit-field-torque coupled time stepping finite element modeling of electric machines: Pap 12th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG'99), Sapporo, Oct. 25-28, 1999. Pt 1. Ho S. L., Li H. L., Fu W. N., Wong H. IEEE Trans. Magn. 2000. 36, № 4, Pt. 1, p. 1886-1889.
9. Електродвигуни трифазні серії 4 А і 4АМ.  
URL: <https://elektrologistik.com.ua/ua/p1348300771-elektrodivigateli-trehfaznye-serii.html> (дата звернення: 21.11.2023).

10. VSH, Спіральний компресор, перетворювач. <https://ugov.ua/catalog/detail/vsh-spiralniy-kompresor-peretvoriuvach/> (дата звернення: 22.11.2023).
11. ПРОМИСЛОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД.  
[https://www.svaltera.ua/upload/iblock/818/6b1519vu6jy0hjvduv02vf48pwkoofev/sva\\_cat\\_2023\\_08\\_ukr.pdf](https://www.svaltera.ua/upload/iblock/818/6b1519vu6jy0hjvduv02vf48pwkoofev/sva_cat_2023_08_ukr.pdf) (дата звернення: 23.11.2023).
12. Проектування електричних машин : навч. посіб. / Д.В. Ципленков, О.Б Іванов, О.В. Бобров, В.В. Кузнецов, В.В. Артемчук, М.О. Баб'як ; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2020. – 408 с.
13. A time-stepped 2D-3D finite element method for induction motors with skewed slots modeling: 1. Dziwniel P., Piriou F., Ducreux J.-P., Thomas P. IEEE Trans. Magn. 1999. 35, № 3, p. 1262-1265.
14. Victoria Romanova, Sergey Khromov. Operational reliability of low-voltage asynchronous motors at asymmetrical supply voltage. E3S Web of Conferences, Volume 139, 2019.  
[https://www.researchgate.net/publication/337964516\\_Operational\\_reliability\\_of\\_low-voltage\\_asynchronous\\_motors\\_at\\_asymmetrical\\_supply\\_voltage](https://www.researchgate.net/publication/337964516_Operational_reliability_of_low-voltage_asynchronous_motors_at_asymmetrical_supply_voltage) (дата звернення: 22.11.2023).
15. Victoria Romanova, Sergey Khromov. Effect of asymmetry of supply voltages on asynchronous motor operation modes. E3S Web of Conferences 58, 03013, 2018.
16. Nikulcha M.V., Chaikovskiy T.O., Dmytro Motorniy. FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE FOR FAN LOAD. I Всеукраїнська Інтернет-конференція студентів та молодих вчених «Science and innovations in the 21st century», 2021. – p. 96-97
17. Kvitka S., Zharikova A. APPLICATION OF FREQUENCY CONVERTER IN THE ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM METAL-WORKING MACHINE. III Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція пам'яті В.В.Овчарова «Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем», 2021. P. 35-3
18. Kvitka S., Postnikova M., Rechina O. Fundamentals of the electric drive: Laboratoryworkshop, p. 1. Melitopol: Lux, 2020. 165 p.

19. Postnikova M., Kvitka S., Nesterchuk D. Fundamentals of electric drive: workshop, p.1. Melitopol: Lux, 2020. 259 p.
20. Kutsyk A., Semeniuk M., Podskarbi G. DUAL-MOTOR INDUCTION FREQUENCY-REGULATED ELECTRIC DRIVE WITH IMPROVED ELECTROMAGNETIC AND ELECTROMECHANICAL COMPATIBILITY. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ, № 1 (5), 2022. P. 24-35
21. Olivera V. de, E. Monmasson and Louis J. P. “Analysis of an electrical differential realized by two connected induction motors”, Proc. ICEM, pp. 1862–1865, Aug. 2000.
22. Ruan J. and Song Q. “A Novel Dual-Motor Two-Speed Direct Drive Battery Electric Vehicle Drivetrain”, in IEEE Access, Vol. 7, pp. 54330–54342, 2019.
23. Jakub Kellner, Michal Praženica, Two five-phase induction motors used as an electronic differential, Transportation Research Procedia, Vol. 55, 2021, pp. 896–903.
24. Plakhtyna O., Kutsyk A., Semeniuk M. Real-Time Models of Electromechanical Power Systems, Based on the Method of Average Voltages in Integration Step and Their Computer Application. Energies, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13092263> (дата звернення: 24.11.2023).
25. Victor N. Meshcheryakov, Dmitry S. Sibirtsev, Elena Gracheva. Frequency Control System for a Synchronized Asynchronous Electric Drive. E3S Web of Conferences 220(1), 2020.
26. Авдєєва О.А. Особливості структурного синтезу електромагнітних систем електричних машин і апаратів загальнопромислового та спеціального призначень / О.А. Авдєєва, О.О. Пальчиков, Р.А. Ставинський // Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. ПТТ – 2015. – Миколаїв: НУК. – 2015. – С. 74 – 79.