

НУБІП України

НУБІП України

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

02.08 –МКР. 175 “С” 2021.02.21. 024 ПЗ

ЧОРНОБАЯ СЕРГІЯ ВІКТОРОВИЧА

2021 р.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет (ННІ) ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ
УДК

ПОГОДЖЕНО **ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**
Декан факультету (Директор ННІ) ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ
Завідувач кафедри ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

(назва факультету (ННІ)) Капун В.В. (ПІБ) (підпис) “ ” 20 р.
(назва кафедри) Жильцов А.В. (ПІБ) (підпис) “ ” 20 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему Автоматизація частотно-керованого асинхронного електроприводу
Спеціальність 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(назва)
Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми
Професор, доктор технічних наук ЖИЛЬЦОВ А.В.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи
Професор, доктор технічних наук ЖИЛЬЦОВ А.В.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав Чорнобай С.В.
(підпис) (ПІБ студента)

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (ННІ) ННІ Енергетики, автоматики і енергозбереження

НУБІП України

З А Т В Е Р Д Ж У Ю
Завідувач кафедри: Жильцов А.В.
Професор, доктор технічних наук
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис)

_____ 20____ року

З А В Д А Н Н Я

НУБІП України

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТУ

Чорнобай Сергій Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

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

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

Тема магістерської кваліфікаційної роботи:
Автоматизація частотно-керованого асинхронного електроприводу

затверджена наказом ректора НУБіП України від “ 01 ” лютого 2021 р. №175.С

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи:

Перетворювач частоти Siemens Micromaster 440; Асинхронний двигун 5A80M44

Триггенератор ТМГ-30П; Інкrementальний енкодер

Електромагнітне гальмо; Фазовий регулятор

Датчик швидкості; Гальмівний резистор

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

- 1) Оцінити та провести вибір способів керування асинхронним двигуном;
- 2) Виконати пуско-налагоджувальні роботи пов'язані з налаштуванням обладнання;
- 3) Отримати механічні, електромеханічні та регульовальні характеристики електричного приводу;
- 4) Обґрунтувати вибір програмного середовища для комп'ютерної реалізації моделі асинхронного приводу;
- 5) Виконати комп'ютерну реалізацію моделі в вибраному програмному забезпеченні;
- 6) Порівняти результати моделювання і експериментальних даних.

Дата видачі завдання “ _____ ” _____ 20____ р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ Жильцов А.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ Чорнобай С.В.
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

НУБІП України

РЕФЕРАТ

Дана магістерська кваліфікаційна робота націлена на рішення питань, що пов'язані з теоретичним аналізом та дослідженням експериментальним шляхом електроприводів, що керуються за рахунок зміни параметру частоти.

Загалом робота складається з трьох розділів та містить значну кількість ілюстративних матеріалів 61 шт., та табличних матеріалів 19 шт.

Питання вибору конкретного перетворювача частоти залежить від попередньо визначеного електроприводного механізму, для врахування цього параметрів і призначення, щоб притримуватись критерію ефективності.

Проведення оцінення було виконано на підставі порівняльної характеристики результатів отриманих двома методами і за різних режимів роботи: за рахунок моделювання в програмному середовищі Matlab/Simulink, а експериментальні дані отриманні при виконанні робіт на дослідницькому стенді.

За виконаними завданнями вдалось досягнути високої точності по різним типам характеристик співпадіння параметрів імітаційної моделі в порівняння з експериментальним виконанням дослідження.

Ключові слова: АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ЧАСТОТНИЙ ПЕРТВОРЮВАЧ, СКЛАДЯРНЕ КЕРУВАННЯ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, SIMULINK

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 Принцип дії та методи регулювання швидкості частотно-регульованого електроприводу.....	11
1.1. Електропривод із частотним регулюванням.....	11
1.2. Способи регулювання частоти обертання АД.....	14
1.2.1. Скалярне керування.....	14
1.2.2. Векторне керування.....	17
1.3. Використання регульованого електроприводу у технологічних процесах.....	21
РОЗДІЛ 2 Склад, технічні характеристики та принцип роботи обладнання, що входить до експериментального стенду.....	22
2.1. Перетворювач частоти MICROMASTER 440.....	22
2.1.1. Характеристики перетворювача частоти.....	23
2.1.2. Специфіка захисту.....	24
2.1.3. Функціональні особливості.....	24
2.1.4. Функціональна схема стенду та призначення термінальних клем.....	26
2.1.5. Описання терміналів управління ПЧ.....	27
2.1.5.1. Графічний термінал.....	27
2.1.5.2. Обслуговування із панелью індикації статусу (SDP).....	28
2.1.5.3. Обслуговування базової (BOP) та розширеною панеллю приводу (AOP).....	30
2.2. Гальмівний резистор.....	32
2.3. Основні теоретичні положення.....	32
2.4. Асинхронний електродвигун 5A80MA4.....	38
2.5. Енкодер інкрементальний.....	39
2.5.1. Принцип дії Енкодера.....	40
2.5.2. Модуль енкодера.....	42
2.5.3. Приєднання модуля.....	42
2.6. Тахогенератор постійного струму ТМГ-30П.....	43
2.6.1. Принцип дії тахогенератора.....	45
2.7. Електромагнітне гальмо.....	48
2.7.1. Пристрій та принцип дії електромагнітного гальма.....	48

2.8. Фазовий регулятор потужності на основі мікросхеми К1182ПМ1Р48	
2.8.1 Принцип дії фазового регулятора	50
2.9. Склад експериментального стенду та принципова схема	52
2.10. Програмне забезпечення для експлуатації перетворювача частоти Micromaster 440 – Siemens «STERTER»	54

РОЗДІЛ 3 Дослідження асинхронного електроприводу з частотним керуванням	55
--	----

3.1. Скалярне $U/f = \text{const}$ керування асинхронним електроприводом на основі експериментального стенду.	55
---	----

3.2. Моделювання частотно-керованого електроприводу у пакеті Simulink. Порівняння модульних та експериментальних даних.	58
---	----

3.2.1. Пакет імітаційного моделювання SIMULINK	58
--	----

3.2.2. Моделювання частотно-керованого електроприводу	59
---	----

3.2.2 Порівняльні експериментальні дослідження з результатами комп'ютерного моделювання	64
---	----

3.3. Векторне керування асинхронним електродвигуном із зворотним зв'язком за швидкістю на основі експериментального стенду	65
--	----

3.4. Моделювання електроприводу з векторним керуванням, з зворотнім зв'язком за швидкістю в пакеті Simulink. Порівняння векторного і скалярного керування.	69
--	----

3.4.1. Моделювання електроприводу з векторним керуванням	69
--	----

3.4.2. Порівняння результатів скалярного та векторного керування	74
--	----

ВИСНОВОК	76
-----------------	----

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	77
---------------------------------------	----

						02.08 –МКР. 175 “С” 2021.02.21. 024 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			6

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АД – Асинхронний двигун

АІС – Автономний інсертор струму

АІН – Автономний інвертор напруги

ДПС – Двигун постійного струму

ПЧ – Перетворювач частоти

ШІП – Широтно-імпульсний перетворювач

ЕМГ – Електромагнітне гальмо

ЗЗ – Зворотній зв'язок

AOP - Advanced Operator Panel

BOP - Basic Operator Panel

COM - Communications Port

IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor

FCC - Flux Current Control

FCL - Fast Current Limitation

IP - Ingress Protection Rating

LED - Liquid Crystal Display

PTC - Positive Temperature Coefficient

PID - Proportional Integral Derivative

RAM - Random Access Memory

ROM - Read Only Memory

SDP - Standard Display Panel

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ВСТУП

Актуальність. Для виконання будь яких завдань щодо транспортування, приводу, та обробки в процесі яких необхідно прикладати значні фізичні зусилля уже давно використовують електроприводи, через їхню енергоефективність у порівнянні з іншими машинами. В промисловості використання електроприводів пов'язане з великою енергосмістю цих пристроїв і відносно значними затратами на живлення електричною енергією, також потрібно зазначити, що більшість електроприводів припадає на асинхронні машини, що живляться змінним струмом. Для ефективного використання асинхронних електроприводів використовують різноманітні методи керування швидкістю обертання. В даній роботі розглядається спосіб оптимального використання підведеної потужності завдяки використанню пристроїв для перетворення частоти.

Мета роботи. Демонстрація ефективності методів за допомогою виконання експериментальних випробувань та моделювання з оцінкою роботоздатності в контексті регулювання швидкості асинхронного електроприводу на основі перетворювача частоти Micromaster 440.

Проведення порівняльних характеристик за експериментальним та модельним методами випробувань.

Для виконання вказаної мети формуємо наступні завдання дослідження:

- 1) Оцінити та провести вибір способів керування асинхронним двигуном;
- 2) Виконати пуско-налагоджувальні роботи пов'язані з налаштуванням обладнання;
- 3) Отримати механічні, електромеханічні та регульовальні характеристики електричного приводу;
- 4) Обґрунтувати вибір програмного середовища для комп'ютерної реалізації моделі асинхронного приводу;

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

5) Виконати комп'ютерну реалізацію моделі в вибраному програмному забезпеченні;

6) Порівняти результати моделювання і експериментальних даних.

Об'єкт дослідження це асинхронний двигун.

Предмет дослідження це процес зміни швидкості асинхронного електродвигуна.

Наукові результати:

1) Підтвердження за допомогою математичної моделі електромеханічних та механічних характеристик частотно-керованого асинхронного електроприводу зняття даних характеристик з експериментального стенду.

2) Результати порівняння способів регулювання, отримані за допомогою експериментального стенду частотно-керованого асинхронного електроприводу і його математичної моделі.

Методи дослідження. Експериментальні методи з використанням експериментального стенду на основі перетворювача частоти.

Методи вимірювання з використанням вимірювальної техніки і пакету Simulink в середовищі Matlab.

Практична значність роботи

1) Виконано моделювання скалярного і векторного способу керування АД в пакеті Matlab/Simulink;

2) Налаштування в деталях експериментальних стендів для проведення досліджень;

3) Можливість переукладання методик розглянутих в роботі для виконання лабораторних робіт

4)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Структура кваліфікаційної магістерської роботи:

В першому розділі оцінити і обґрунтувати обрані способи регулювання швидкості двигуна, методи зняття характеристик асинхронного двигуна.

В другому розділі розглянути обладнання, що входить в склад для створення експериментального стенду, його технічні характеристики і принципи роботи.

В третьому розділі навести результати моделювання установки (механічні, електромеханічні і регульовальні характеристики) і результати математичного моделювання в середовищі Simulink. Провести оцінку знятих характеристик, за допомогою цих даних дати оцінку енергоефективності електропривода і якості вибраних способів регулювання.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

РОЗДІЛ 1 Принцип дії та методи регулювання швидкості частотно-регульованого електроприводу

1.1. Електропривод із частотним регулюванням

Системи керування швидкістю двигуна постійного струму (ДПС) досить прості, але слабким місцем електроприводу є електродвигун. Це цінно та ненадійно. Під час роботи відбувається іскріння щіток, під впливом електроерозії колектор зношується; такий електродвигун має обмеження щодо використання в заповнених та вибухонебезпечних середовищах.

Перетворювач частоти у комплекті з асинхронним електродвигуном дозволяє замінити електропривод постійного струму.

Асинхронні електродвигуни (АД) краще електродвигунів постійного струму (ДПС) у багатьох відношеннях: вони прості в установці та надійні, тому що не мають рухомих контактів; мають менші в порівнянні з ДПС розміри, вага та вартість при тій же величині потужності; АД прості у виготовленні та експлуатації.

Основним недоліком асинхронних електродвигунів є складність регулювання частоти їх обертання традиційними методами (зміна напруги живлення, введення додаткових опорів у ланцюг живлення обмоток).

Донедавна управління асинхронним двигуном у частотному режимі було серйозною проблемою, хоча теорія управління частотою розробили в тридцятих роках ХХ століття. Розвиток частотно-регульованого електроприводу стримувався дорожнечено перетворювачів частоти. Поява силових ланцюгів з ЮВТ-транзисторами, розробка високопродуктивних мікропроцесорних систем управління дозволили різним компаніям із Європи, США та Японії створити сучасні перетворювачі частоти за доступною ціною.

Відомо, що регулювання швидкості виконавчих механізмів може здійснюватися за допомогою різних пристроїв: механічних варіаторів, гідравлічних муфт, резисторів, що додатково вставляються в статор або ротор, електромеханічних частот перетворювачів, статичних перетворювачів

частоти.

Використання перших чотирьох пристроїв не забезпечує якісного регулювання швидкості, неекономічно, вимагає великих витрат при встановленні та експлуатації.

Статичні перетворювачі частоти є найбільш досконалими пристроями керування асинхронним приводом при сучасному стані речей. Принцип частотного методу керування швидкістю асинхронного двигуна (АД) заключається в виконанні наступного закону зміна частоти f та напруги живлення, можна встановити відповідність до виразу (1.1) зберігаючи незмінність числа пар полюсів p змінюванням кутової швидкості поля статора:

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f / p, \quad (1.1)$$

Де ω_0 – кутова швидкість магнітного поля статора;

π - 3,14;

f - частота напруги живлення, Гц;

p - кількість полюсів попарно.

Даний спосіб являється запорукою підтримання плавного регулювання розширюючи широту регулювання, а механічні характеристики мають високу механічну жорсткість.

Зміни швидкості в даному випадку не призводять до збільшення ковзання АД, тому втрати потужності при регулюванні невеликі.

Для створення високих енергетичних і енергоефективних показників АД - коефіцієнта потужності, корисної дії, здатності до перевантаження - необхідно одночасно змінювати частоту і напругу що потрапляє на контакти призначені для приєднання.

Принцип зміни такої фізичної характеристики як напруга (Рис. 1) залежить від характеру зміни моменту завантаження M_c . Сталій момент навантаження вимагає регулювання $M_c = \text{const}$ напруги на статорі з пропорційністю до частоти.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

НУБІП України

$$\frac{U_1}{f_1} = const, \tag{1.2}$$

Де U_1 – напруга на статорі, В.

У випадку вентиляторного характеру моменту навантаження цей стан має вигляд:

НУБІП України

$$\frac{U_1}{f_1^2} = const, \tag{1.3}$$

а при моменті навантаження, обернено пропорційно швидкості:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f}} = const, \tag{1.4}$$

Таким чином, для плавного безступінчастого регулювання частоти обертання валу асинхронного електродвигуна, перетворювач частоти повинен забезпечувати одночасне регулювання за частотою так і за напругою на статорі АД.

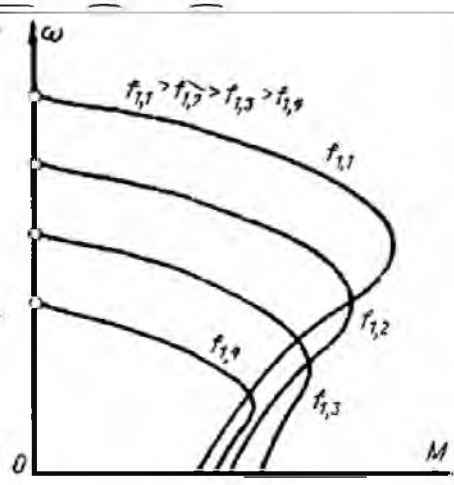


Рисунок 1.1 - Механічні характеристики АД у випадку частотного управління у відповідності до закону

$$\frac{U_1}{f_1} = const$$

На відносно високих частотах максимальний момент двигуна, що обетається, у випадку зміни частоти зберігається постійним, за умови зміни напруги відносно частоти відповідно, тобто $U_1/f_1 = const$.

Подальше зниження частоти призводить до зниження максимуму моменту двигуна. Це пов'язано зі зменшення потужку двигуна через збільшення

частки падіння напруги на R1 від загальної прикладеної напруги, так і зменшення абсолютного критичного ковзання, що призводить за обставини незмінного потоку до зменшення моменту за рахунок зменшення струму ротора.

Для підтримки необхідної здатності до перевантажування у всьому діапазоні регулювання потрібно звертати увагу на відносність зміни напруги по відношенню до частоти, напруга повинна зменшуватись в менших значеннях.

1.2. Способи регулювання частоти обертання АД

1.2.1. Скалярне керування

Швидкість поля статора, тобто синхронна визначається за формулою (1.5):

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (1.5)$$

де n_0 - швидкість поля статора, тобто синхронна, об/хв.

Загальне залізнення швидкості поля ротора від поля статора називають – ковзанням. Його визначають з використанням наступного виразу (1.6)

$$s = \frac{n_0 - n}{n}, \quad (1.6)$$

де n - швидкість обертання ротора, об/хв;

s – ковзання

Суміщення даних формул, призводить до виведення швидкості обертання ротора:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s), \quad (1.7)$$

Згідно попереднього, керування частотою обертання ротора виконують наступними способами:

- Керування за ковзанням;
- Керування з перемиканням кількості пар полюсів;
- Керування частотою живлячого поля

Формула визначення потужності двигуна:

НУБІП України

$$P \cong M \cdot \omega, \quad (1.8)$$

M – момент сили, Нм;

ω – момент сили, рад.

НУБІП України

Момент на валу:

$$M = \frac{P}{\omega}, \quad (1.9)$$

Швидкість обертання, рад.

НУБІП України

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (1.10)$$

З вище вказаного слідує:

НУБІП України

$$M = \frac{9550 \cdot P}{n}, \quad (1.11)$$

Розрахунок потужності для практичного використання корисніше використовувати в наступній формі:

НУБІП України

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta, \quad (1.12)$$

M – момент сили, Н·м;

Відомо, що

НУБІП України

$$M_{\text{тек}} = \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \cdot M_{\text{ном}} \quad (1.13)$$

Зробимо вивід, що момент пропорційний квадрату напруги. Для виконання розрахунків по потужності та струму виконуємо:

НУБІП України

Номинальна механічна потужність двигуна:

$$P = \frac{M \cdot n}{9550}, \quad (1.14)$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Номинальна електрична потужність двигуна:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta, \quad (1.15)$$

де P – номінальна потужність двигуна;

I – струм двигуна, А;

$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності;

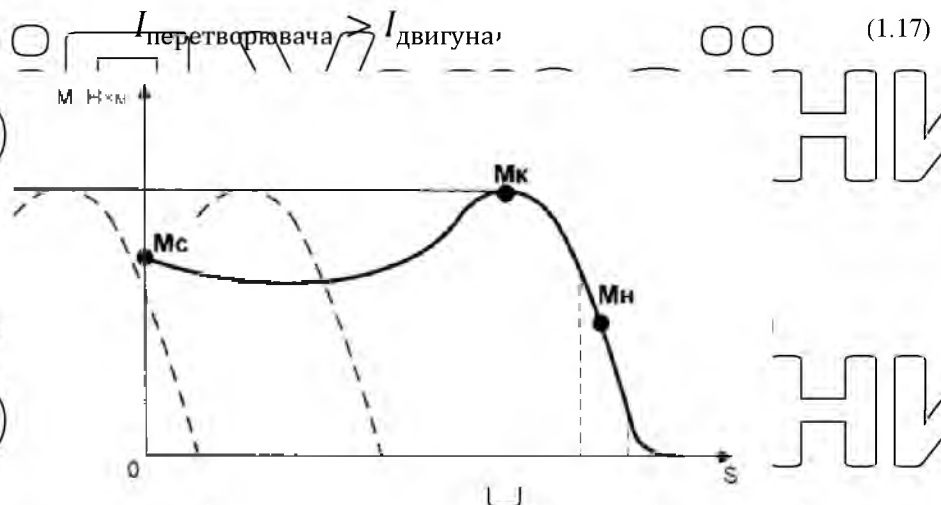
η – коефіцієнт корисної дії (ККД), %.

Звідси отримуємо формулу для розрахунку номінального струму двигуна:

$$I_n = \frac{M \cdot \eta}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta \cdot 9,550'} \quad (1.16)$$

I_n – номінальний струм двигуна, А

Вибір частотного перетворювача проводять по значенню струму, не враховуючи значення потужності, та використовують наступну нерівність:



M_s – момент при старті, M_n – момент при виході на номінальний рівень,

M_k – момент при критичному рівні

Рисунок 1.2 – Механічні характеристики при частотному керуванні

Момент при старті M_s в межах низьких частот прямує до зниження.

Врахування цього може покращити системи приводу при виконанні приводу вантажопідійомних механізмів.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

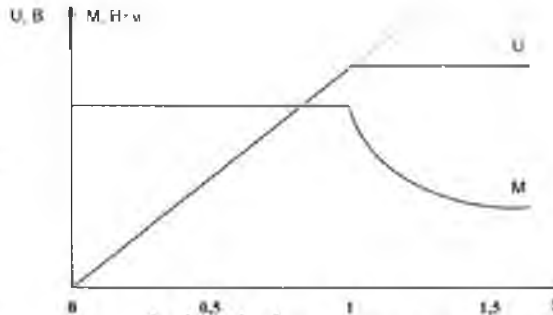


Рисунок 1.3 – Значення моменту по відношенню до частоти

Спроби перевищення значення частоти понад номінальне значення та слідування за підтримання рівності $U/f = \text{const}$ призводить до зниження моменту. Проблемою є те, що значення мережевої напруги обмежене певними рамками, і перевищення встановленого значення ніяк неможливе.

1.2.2 Векторне керування

Системи векторного керування здатні забезпечувати роботу при сталих значеннях потоку зчеплення ротора, статора так і суми потужностей машини в цілому. Самі ця постійність потозчеплення основною характеристикою векторного керування.

Для проектування електричних машин потрібно притримуватись наступного принципу, а саме контроль витрат для намагнічування до витрат, що несуться при погашенні активних складових, в саторних обмотках, які можна не враховувати. Для цього найзручнішим інструментом як модель виявляється Т-подібна схема заміщення, що ілюструє процеси, які відбуваються в двигуні (рис. 1.4).

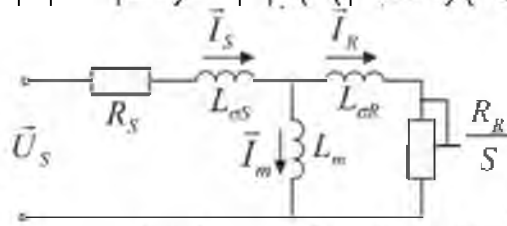


Рисунок 1.4 – Т-подібна схема АД

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

T-подібна схема складається:

\vec{U}_s - Вектор загальний для вхідної напруги.

\vec{I}_s - Вектор загальний для відображення струму статора.

Струм статора в векторному вираженні поділяється на дві складові:

\vec{I}_m - Вектор струму намагнічування, що являється спільним різних складових.

\vec{I}_R - Вектор струму ротора, складений з різних частин, що його утворюють.

Для визначення значень та відношень струму за заданої вхідної напруги потрібно звертатися до параметрів, які складуть схему заміщення.

Фізичні складові схеми заміщення:

R_s – величина опору статора, що описує як активні статорні витрати в обмотках, так прирівнюється до фазового опору статорної обмотки.

$L_{\sigma s}$ - індуктивність, що розсіюється, тобто та що не задіяна при зчепленні магнітного потоку статора і ротора.

L_m - основна індуктивність, що наводиться саме при потокозчепленні ротора та статора. Насичення магнітопроводу двигуна призводить до падіння значення основної індуктивності.

$L_{\sigma R}$ – роторна індуктивність, що розсіюється, і є складовою частиною потоку, що не задіяний для створення моменту із статором.

L_R/S – значення яке описує активні роторні втрати, де:

R_R – роторний опір за режиму короткого замикання (загальмований двигунний вал).

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \text{ - ковзання,}$$

де:

n_1 – швидкість з якою обертається магнітне поле статора;

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

n_2 – швидкість з якою доганяє поле ротора.

Складові векторної діаграми двигуна асинхронного

Векторні стани, що характеризують асинхронний двигун:

\vec{U}_s - Вектор статорної напруги;

\vec{I}_s - Вектор статорного струму;

\vec{I}_r - Вектор роторного струму;

\vec{I}_m - Вектор намагнічувального струму;

$\vec{\Psi}_s$ - вектор статорного потоку;

$\vec{\Psi}_r$ - вектор роторного потоку;

$\vec{\Psi}_m$ - вектор потокозчеплення, що виникає в повітряному зазорі (потік намагнічування).

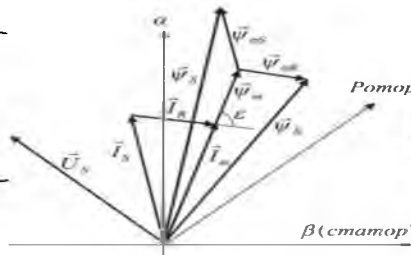


Рисунок 1.5 – Діаграма векторних величин

На рис. 1.5 зображено діаграму векторну, для демонстрації співвідношення та зв'язків векторних станів для АД.

Робота АД супроводжується обертання осі ротора відносно якої обертаються всі вектори в поперечному перерізі цієї осі.

Режим незмінності швидкості та моменту навантаження, призводить до встановлення постійних фазових відхилень, швидкостей поперечно зазначених векторів станів та амплітуд.

Під час динамічного процесу та в моменти перехідних процесів, амплітуда вектору стану і взаємні відхилення за фазою не відбуваються.

Для відображення схеми векторного керування швидкості АД

наводиться спрощена схема структури системи векторного регулювання на рис.1.6.

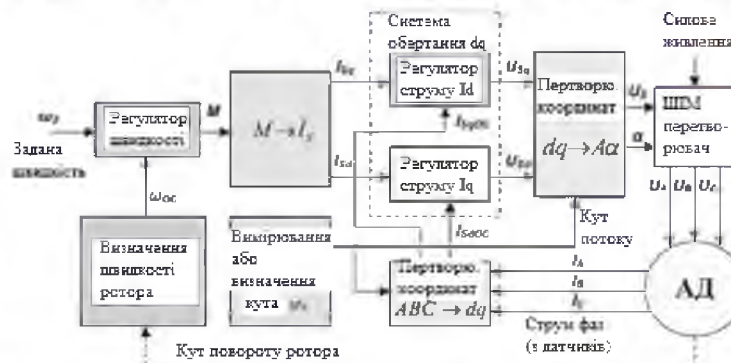


Рисунок 1.6 – Структурна схема спрощеного типу для відображення векторного регулювання

Структурна система керування двигуном повинна складатись з регулятора швидкості, який використовується для задання моменту.

Для створення даної структури підходящим інструментом буде пристрій, який здатний зв'язати момент двигуна з струмом статора, що дасть змогу керування ним.

Вектор $\vec{\psi}_R$ – потоку ротора застосовують для зв'язання з ним системи координат d і q , що є елементами двофазної системи, і такими що обертаються в системі координат синхронно по відношенню до векторів стану АД. Вісь d орієнтується саме по потоку ротора.

Проекції d і q , що зчитуються скалярними регуляторами, являються частиною векторного регулятора в системі координат dq , та для створення зворотнього зв'язку використовується спеціально виміряний та перетворений для сприйняття в даній системі координат вектор струму статора, що відповідає реальному значенню. Регулятор струму формує в системі dq вектор напруги статора, що характеризується двома складові вектору напруги U_{sd} та U_{sq} , що на статорі формуються регулятором струму для системи dq . При перетворенні в координати dq вектор статорної напруги трансформується в неухому координатну систему, взаємозв'язану на статор.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Широтно імпульсна модуляція (ШІМ) основний спосіб для створення вектору статорної напруги.

Синтез системи керування визначається як зв'язок моменту з проекціями вектору струму статора по свої системи координат dq , при її синхронному обертанні з потоком ротора.

Знання поточного кута (кут повороту $\vec{\Psi}_R$) повороту ротора дає змогу виконання змін координат системи dq , але дізнання цього кута потребує обчислювання, або вимірювання.

Порівняні переваги векторного керування перед скалярним $U/f=\text{const}$ керуванням:

Постійність при необхідності, або наявності зміни навантаження і також заданої величини;

- Час спрацювання при змінах заданої величини значно швидший;
- Час регулювання за зміни навантаження призводить до наявності кращої перехідної характеристики за збуренням;
- Встановлений момент моменту навіть при максимальних значення не є перешкодою для гальмування або розгону;
- Запит на регулювання по рушійному і гальмівному моменту не зв'язаний з швидкістю;

Нульова швидкість дозволяє підтримувати утримуючий момент.

1.3. Використання регульованого електроприводу у технологічних процесах

Електропривід над яким можна здійснювати керування це складова частина більшості технологічних процесів сучасності, а показники енергоефективності дозволяють йому продовжувати лідируючі позиції.

Не потрібно забувати про нові якості систем і об'єктів побудованих на регульованому електроприводі. Прикладні застосування знаходять місце у великій кількості установок обробної промисловості, але надзвичайно ефективним себе показало їх використання в переміщенні рідин.

В порівнянні з найбільш популярним способом регулювання подачі

					02.08 –МКР. 175 “С” 2021.02.21. 024 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

рідин, а зараз це використання клапанів і засувок, виконання частотного керування дає змогу використовувати значно підвищену ефективність дослідження потоку рідини

Оскільки використання клапанів або засувок в закритому стані не дає змоги виконувати корисну роботу, то використання частотного керування дозволяє чітко налаштувати параметри витрат і тиску, що підвищує енергоефективність на значні позиції, даний ефект відображено на рис. 4

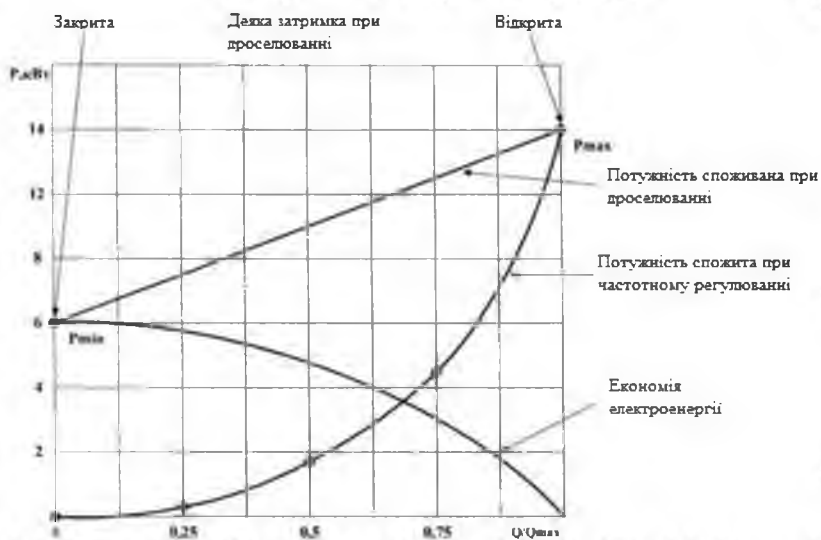


Рисунок 1.7 - Споживання електроенергії з виконанням за різноманітними способами керування швидкістю обертання робочих органів насосів

РОЗДІЛ 2 Склад, технічні характеристики та принцип роботи обладнання, що входить до експериментального стенду.

2.1. Перетворювач частоти MICROMASTER 440

Перетворювачі MICROMASTER 440 це модель що зарекомендувала себе на рівні серійного виробництва і уже виготовляється за широким номіналом потужностей по відношенню до електричних машин трьохфазного виконання. Діапазон складає від 120 Вт при однофазній схемі живлення до 75 кВт по трьохфазній схемі живлення.

Ключовими елементами будь якого інвертора у перетворювачі частоти є силові ключі, які у випадку даного пристрою виконані на основі IGBT модулів - транзисторів Insulated Gate Bipolar Transistor - біполярний

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

транзистор з ізольованим затвором), а мікропроцесорне поєднання з надійною силовою системою дає змогу урізноманітнити параметри налаштування.

Спосіб широтно-імпульсної модуляції дає змогу контролювати частоту комутацій силових ключів, що в свою чергу зменшує шумово-вібраційне середовище наколо робочої машини. Оскільки даний пристрій захищений від багатьох аварійних ситуацій це дає змогу розцінювати його як гарантовану інвестицію з віддачею.

MICROMASTER 440 базові налаштування з якими ви отримуєте пристрій дає змогу відразу приступити до налаштування з широкими можливостями варіативності по способах керування.

MICROMASTER 440 наявність значного інтеграційного потенціалу дає змогу розраховувати на пристрій як на безвідмовну частину більш складної системи, але і індивідуальне використання буде корисним в роботі.

2.1.1. Характеристики перетворювача частоти

Задатності перетворювача за основними характеристиками:

- Просте влаштування на робоче місце, з наступною параметризацією та запуску в роботу;
- Швидке спрацювання на сигнали керування;
- Відповідність нормам визаним у всьому світі за критеріями електромагнітної сумісності;
- Робота з рівними значення потужності до власної номінальної;
- Розширений список конфірацій, за рахунок налаштування параметрів;
- Зручне присднання на рівні контактного підключення;
- Наявність релейних виходів;
- Аналогові виходи 0-20мА;
- 6 ізольованих здатних до перемикання pnp/npn цифрових входів;
- 2 аналогових входи:
 - а. AIN 1 – 0-10В, 0-20мА або -10 до +10В;

										Арк.
										23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

б. АІN 2 – 0-10В, 0-20мА.

- Аналогові входи також можуть застосовуватись як 7-й та 8-й цифрові входи;

- Здатність конфігурувати за рахунок зміни модульних елементів;

- Здатність роботи силових ключів на високій частоті комутацій для зменшення шумового супроводження роботи пристрою;

- Можливість ознайомлення з усім функціоналом пристрою та фактичним станом на момент роботи з ним;

- Здатність обміну з ком'ютерною технікою, наявність базової панелі обслуговування (ВОР), за необхідності доступ до розширеної панелі (АОР), також є модулі для передачі по шині Profibus

2.1.2 Специфіка захисту

- Захист від зміни значення напруги за допустимо можливі рамки;

Захист пристрою по параметру перегріву;

- Захист при будь яких випадках з'єднання з землею;

- Захист при аварійних коротких замиканнях;

- Захист по перегріву електричної машини за втратами I2 t;

- Захист електричної машини за вимірами термісторів РТС.

2.1.3 Функціональні особливості

Базові функціональні можливості перетворювача:

- Векторне керування не використовуючи датчик швидкості;

- Керування потоком (FCC) з ціллю покращення динамічних характеристик і здійснення якісного керування електродвигуном;

- Миттєве обмеження струму (FCL) без необхідності вимкнення двигуна;

- Реалізація подання постійного струму на запискахі приєднання з ціллю динамічного гальмування;

- Посадження гальмівних способів для збільшення ефективності;
Згладжування в моменти прискорення, або загальмовування, що програмується;

- Наявність замкнутого PID регулятора із автоматичним підлаштування ;

- Влаштований в пристрої засіб переривання гальма;
- Можливість підлаштування інтенсивності за розгоном та 1 зупинкою;

- 4-х точкова інтенсивність для згладжування;

- Багатоточкова U/f характеристика, з можливістю її налаштування оператором;

- Швидкий і протий спосіб перенесення налаштування на для виконання аналогічних процесів на інший пристрій.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд Micromaster 440

Технічні параметри ПЧ Micromaster 440

Таблиця 2.1

Назва	Значення
Тип	6SE6440-2UD21-5AA1
Номинальна потужність, кВт	1,5
Повна потужність, кВА	3,0
Номинальна входна напруга,	3AC 380-480 (+10%/-10%)
Номинальний входний струм, А	5,9
Номинальна частота мережі, Гц	від 47 до 63

Арк.

02.08 –МКР. 175 “С” 2021.02.21. 024 ПЗ

25

Змн. Арк. № докум. Підпис Дата

Номинальний вихідний струм, А	4А
Вихідна частота, Гц	0-650
Ступінь захисту	IP20

2.1.4. Функціональна схема стану та призначення термінальних клем

Функціональні елементи Micromaster 440 та місця їх приєднання вказані на рис. 2.2. Схема розкладає базові компоненти за функціональним призначенням приводу Micromaster 440 та сигнальні канали взаємозв'язку з вище рівневими елементами керування. Головним функціональним компонентом приводного механізму є модуль Micromaster 440, який складається з силових компонентів приводного механізму та кіп керування, що базуються на елементній основі мікропроцесора. Термінальні входи та їх призначення вказано у таблиці 2.2.

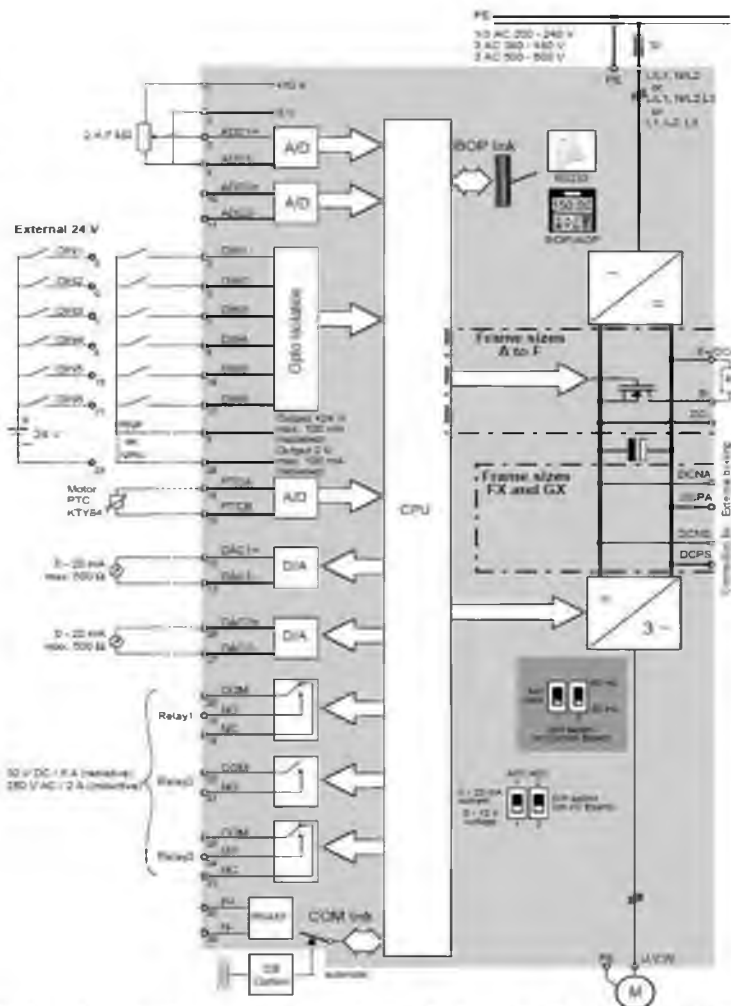


Рисунок 2.2 – Функціональна схема механізму приводу Micromaster 440

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Виводи термінальних клем та їхні призначення

п/н	Позначення	Призначення
1	-	Вихід, що призначено для внутрішнього джерела живлення +10 В
2	-	Вихід, що призначено для внутрішнього джерела живлення 0 В
3	<i>ADC1+</i>	Аналоговий вхід 1 (+)
4	<i>ADC1-</i>	Аналоговий вхід 1 (-)
5	<i>DIN1</i>	Цифровий вхід 1
6	<i>DIN2</i>	Цифровий вхід 2
7	<i>DIN3</i>	Цифровий вхід 3
8	<i>DIN4</i>	Цифровий вхід 4
9	-	Вхід ізольований всередину джерела +24 В/макс. струм 100 мА
10	<i>ADC2+</i>	Аналоговий вхід 2 (+)
11	<i>ADC2-</i>	Аналоговий вхід 2(-)
12	<i>DAC1+</i>	Аналоговий вихід 1 (+)
13	<i>DAC1-</i>	Аналоговий вихід 1 (-)
14	<i>PTCA</i>	Вхід, що призначений під термодатчик РТС або КТУ84
15	<i>PTCB</i>	Вхід, що призначений під термодатчик РТС або КТУ84
16	<i>DIN5</i>	Цифровий вхід 5
17	<i>DIN6</i>	Цифровий вхід 6
18	<i>DOUT1/NC</i>	Цифровий вихід 1 / нормально замкнутий контакт
19	<i>DOUT1/NO</i>	Цифровий вихід 1 / нормально розімкнений контакт
20	<i>DOUT1/COM</i>	Цифровий вихід 1 / контакт, що перемикається
21	<i>DOUT2/NO</i>	Цифровий вихід 2 / нормально розімкнений контакт
22	<i>DOUT2/COM</i>	Цифровий вихід 2 / контакт, що перемикається
23	<i>DOUT3/NC</i>	Цифровий вихід 3 / нормально замкнутий контакт
24	<i>DOUT3/NO</i>	Цифровий вихід 3 / нормально розімкнений контакт
25	<i>DOUT3/COM</i>	Цифровий вихід 3 / контакт, що перемикається
26	<i>DAC2+</i>	Аналоговий вихід 2 (+)
27	<i>DAC2-</i>	Аналоговий вихід 2 (-)
28	-	Вихід ізольований внутрішнього джерела 0 В/макс. струм 100мА
29	<i>P+</i>	Інтерфейс RS-485
30	<i>N-</i>	Інтерфейс RS-485

2.1.5. Описання терміналів управління ПЧ

2.1.5.1. Графічний термінал

Для налаштування служать два види панелей в ПЧ: "Базова Операторська Панель" (BOP) або "Розширена Панель Оператора" (AOP). Застосування інструменту – «DriveMonitor» - призводить до більш зручного параметризування та налаштування, сама по собі програма «Drive motion» напряду призначена для налаштування та збирання документальних даних.



- 1- Панель індикації
- 2- Базова панель
- 3- Розширена панель

Рисунок 2.3- Панелі для перетворювачів MICROMASTER 440

2.1.5.2. Обслуговування із панеллю індикації статусу (SDP)

SDP є невідемним елементом стандартної комплектації

MICROMASTER 440. В передній частині розташовано два світлодіода LED, принцип підсвічування яких може сигналізувати про конкретні режими та несправності в роботі.



Рисунок 2.4 – зовнішній вигляд панелі індикації статусу (SDP)

Таблиця 2.3

Значення символічної індикації SDP

Позначення	Стан приводу
1	ON
2	OFF
3	Загоряння з періодом ~ 0,3 с
4	Мерехтіння з періодом ~ 1 с

Послідовне підсвідчування та їх значення

2-2	Відсутність живлення
1-1	Стан готовності до запуску
2-1	Проблеми з приводом, виключаю ті причини, що зазначені далі
1-2	Інвертор, що запущений в обертання
2-4	По завищеному струму
4-2	По завищеній напрузі
4-1	По завищеній температурі двигуна
1-4	По завищеній температурі інвертору приводу
4-4	Одномоментне мерехтіння 2x LED: робота при обмеженому струмі
4-4	Альтернативне мерехтіння 2x LED: повідомлення по інших причинах
4-3	Сигнал про вимкнення через занижену напругу/занижена напруга
3-4	Неодночасність готовності приводу
3-3	Одочасні спалахи 2x LED: збої при роботі ROM
3-3	Альтернативні спалахи 2x LED: збої при роботі RAM

Первинні налаштування вказано в таблиці 2.5. Клемна колодка відображена на Рис. 2.5



Рисунок 2.5 – Клемна колодка

Таблиця 2.5

Первинні влаштування по роботі з дисплеєм стану

	Клеми	Параметр	За замовчуванням
Цифровий вхід 1	5	P0701 = 1	Увімкнення, праворуч
Цифровий вхід 2	6	P0702 = 12	Реверсування
Цифровий вхід 3	7	P0703 = 9	Скид аварії
Цифровий вхід 4	8	P0704 = 15	Вказана частота
Цифровий вхід 5	16	P0705 = 15	Вказана частота
Цифровий вхід 6	17	P0706 = 15	Вказана частота
Цифровий вхід 7	Через AIN 1	P0707 = 0	Не застосовується
Цифровий вхід 8	Через AIN 2	P0708 = 0	Не застосовується

2.1.5.3. Обслуговування базової (BOP) та розширеною панеллю приводу (AOP)

Панелі по зовнішньому відображенні наведені на рис. 2.6. Розширена і базова панелі, що являються опціональними (BOP-AOP), дають змогу параметризації та налаштуванню у відповідності до користувацьких цілей. Панель BOP та AOP обладнані дисплеєм, в якій є можливість спостерігати за параметрами приводу через індикативні елементи. Панель BOP для не розрахована на зберігання налаштувань (параметрів) і не має змоги використовувати компоненти ЕВМ в мікропроцесорному виконанні. (AOP для даної панелі весь перелічений функціонал навпаки доступний (на додачу, цей багатомовний інтерфейс). Таблиця 2.6 для представлення призначення розміщених на пристрої елементів керування.









Рисунок 2.6 - базова (BOP) та розширена панель приводу (AOP)

Таблиця 2.6

Кнопкові і індикаційні елементи на пристрої

Елемент	Функція	Призначення
	Параметричний індикатор	LCD для відображення чинних налаштувань перетворювача.
	Запуск двигуна	Налаштування даної кнопки за кодуванням P0700 =1. Спрацювання клавіші призводить до пуску перетворювача. При поставці являється
	Зупинка двигуна	OFF 1 – Взаємодія з клавішою призводить до закінчення роботи при заданій швидкості по кривій спадання. При поставці являється пасивною P0700=1.

Закінчення таблиці 2.6

		<p>Реверсивний режим</p>	<p>Реверсування двигуна по даній клавіші (обертання зі змінною напрямку) електродвигуна. При поставці являється пасивною P0700 = 1.</p>
		<p>Режим прямого включення</p>	<p>JOG клавіша дає змогу пуску двигуна при заданій попередньої частоті. Відпускання клавіші призводить до гальмування двигуна. Пацюючий двигун не реагує при натискання на дану клавішу.</p>
		<p>Різновиди функцій</p>	<p>Двох секундне утримання цієї клавіші дає змогу отримати інформацію про додаткові функції. Вона вказує під час роботи наступне:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Значення напруги для елемента постійного струму (з буквою d) в (V) 2. Значення струму вихідної (A) 3. Значення частоти вихідної (Hz) 4. Значення напруги вихідної (V) 5. Величина (вибрана в P0005) з метром повернення до попереднього екрану повторні натискання.
		<p>Доступність параметрів</p>	<p>Уможливорюється доступ по параметрам та налаштування приводу.</p>
		<p>Збільшення величин</p>	<p>Підвищення величин, які перебувають під контролем. Зміна частоти для ВОР по встановленій P1000=1</p>
		<p>Зменшення величин</p>	<p>Зниження величин, які перебувають під контролем. Зміна частоти для ВОР, по встановленій P1000 = 1</p>

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

2.2. Гальмівний резистор

Використання гальмівного резистора зв'язано з необхідністю гасіння надлишкової енергії, що потрапляє на ланку постійного струму в умовах виконання динамічного гальмування, також даний ефект прослідковується в режимі рекуперативного гальмування. Зазвичай приєднання гальмівних резисторів виконується безпосередньо біля перетворювача частоти. Вибір гальмівних резисторів виконується за каталоговими даними.

Гальмівний резистор

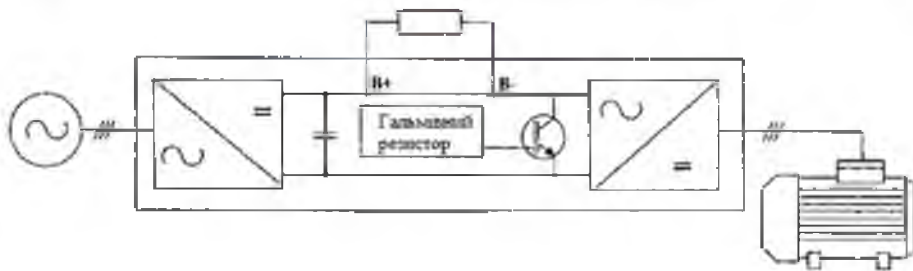


Рисунок 2.7 - Приєднання гальмівного резистора по схемі керування ПЧ

2.3. Основні теоретичні положення

Для побудови системи з автоматизованим керування асинхронним двигуном потрібно використати перетворювач частоти ПЧ, параметрами якого можна керувати (UZF), живлення якого відбувається на мережевій напрузі U_c із мережевою частотою f_c , а також асинхронний двигун АД (М), керування і живлення якого виконується від ПЧ, зображено на рис. 2.8

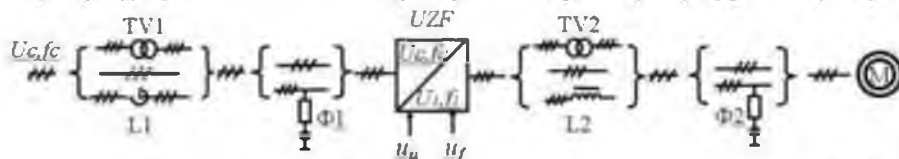


Рисунок 2.8 – Компоненти системи керування ПЧ-АД

UZF – узгоджувальний трансформатор виконує функцію по відношенню до потужності та по входнім напругам між ПЧ та мережевими параметрами. Реактори $L1$, а також додаткові RC -фільтри $\Phi1$ встановлюють з ціллю захисту за струмами короткого замикання і перенапругами по відношенню до входньої мережі, що живить ПЧ. UZF – узгоджувальний трансформатор, що слідке і діє при невідповідності вихідних напруг між ПЧ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

та АД, за часту це потрібно для високовольтних електроприводів. Дроселі $L2$, а також RC -фільтри $\Phi2$, використовуються для обмеження можливих перенапруг, що можуть виникнути на силових ключах, захист необхідний через довжину живлячих кабелів між перетворювачем частоти і електродвигуна, яка перевищує понад 50 м (для деяких ПЧ це може було і 200 м).

Частота на виході $f1$ міжфазна напруга $U1$ (або струм $I1$) ПЧ визначають по відношенню між сигналами керування u_f і u_c . Частотне регулювання $f1$ та напруги $U1$ (або струму $I1$) здійснює регулювання по ключовим параметрам координат фізичних параметрів машини напруги (струму, електромагнітного моменту M , кутової швидкості ω).

Силові напівпровідникові ключі по принципу виконання розпоширились в таких виконаннях для ПЧ:

- Автономний інвертор АІ, з встановленою ланкою постійного струму в ПЧ (з інвертором напруги АІН або струму АІС);
- Безпосередній зв'язок мережевих параметрів і навантаження ПЧНС в ПЧ (виконанням з ШІМ, або без неї).

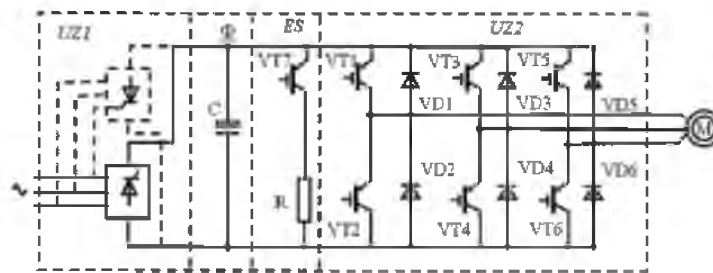
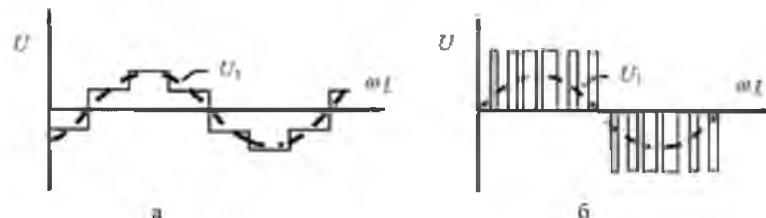


Рисунок 2.9 - Схема силові частини АІН

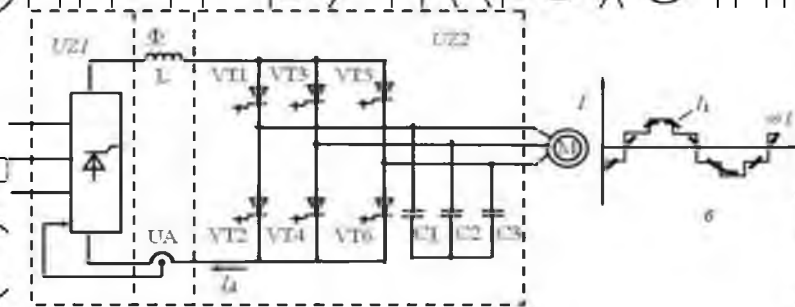


- а – амплітудно-імпульсна модуляція
- б – широтно-імпульсна модуляція

Рисунок 2.10 - діаграми вихідної напруги АІН

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Перетворювачі виконані по системі ПЧ-АІ побудовані з таких складових: UZ1-випрямляч, що піддається керування абс.ні, фільтр силовий Ф (С чи LC типу), що знаходиться в ланці постійного струму, а також автономний інвертор UZ2 (рис.2.9, рис 2.11). Елементна база АІ складається на даному етапі розвитку з напівпровідникової техніки, що заснована на IGBT-модулях, що являють собою транзистори з ізольованим затвором та силовий діод, що їх шунтує.



а - Принципова схема АІС

б - діаграми регулювання вихідного струму АІС

Рисунок 2.11 – Принципова схема АІС та його діаграма регулювання вихідного струму

АІН (Рис. 2.9) є джерелом живлячої напруги. Обмін енергією реактивного характеру між АД ланкою постійного струму, виконується через використання ємності C фільтра Φ і зворотним діодам $VD1-VD6$, що включено паралельно ключам силовим $VT1-VT6$, АД являється активно-індуктивним навантаженням і за рахунок цього можливе використання АІН саме в такій елементній збірці. Даний спосіб спонукає до неперервності струмового ланцюга і обмотках АД в умовах вимкнення x , від джерела живлення, що виникає в процесі комутації та повертання накопиченої магнітної енергії до конденсатору фільтра. Для регулювання вхідної напруги можливе виконання АІН:

- За керованого випрямляча $UZ1$ - змінювання напруги на частці схеми постійного струму, інвертор в даному випадку служить лише комутатором фаз, для створення необхідної частоти (АІН з амплітудно-імпульсною модуляцією АІМ);

За некерованого випрямляча - широтно-імпульсне регулювання в інверторі напругу з виконанням модуляції напруги несучої частоти (частоти з

якою вмикаються силові ключі) за сигналом затребуваної частоти (АІН із широтно-імпульсною модуляцією ШІМ). Фазові напруги у вигляді діаграм U та їхні перші гармоніки U_1 для АІН з АІМ і ШІМ зображено на рис. 2.10,а і рис. 2.10,б.

ПЧ з АІН не здатна до рекуперації енергії в мережу. Для створення даної можливості необхідно вхідний випрямляч ПЧ з АІН виконати реверсивним і керованим (на рис. 2,а відображено пунктиром). Ключ $VT7$ і силовий резистор R , застосовується для виконання скидання енергії у випадку виконання випрямляча який не забезпечує рекуперації енергії в мережу за гальмівних режимів АД. За перевищення вхідної напруги до $VT7$ ключ створює провідний проміжок для живлення надлишковою енергією R .

ПЧ з АІС, зображено на рис. 2.10,а, керований перетворювач $UZ1$ пряк джерело струму, а інвертор $UZ2$ виконує комутаційний процес з обмотками статора АД за посередництвом $VT1-VT6$. Основна відмінність з технічної точки зору ПЧ з АІС від ПЧ з АІН – за використанням L -фільтра та відсутністю ємнісного фільтра при випрямлячі на виході, зворотні діоди відсутні, для шунтування ключів силових, але наявні $C1, C2, C3$ конденсатори, що розміщуються на виході інвертора, що служить для ПЧ джерелом навантаження.

Виконання генераторного режиму АД призводить до зміни напрямку ЕРС та інвертора, якщо виконує режим випрямляча, що призводить до підвищення струму I_d на частці з постійним струмом. Однак відємний зв'язок по струму I_d (датчик струму UA на рис. 2.10,а) перетворювач $UZ1$ витягується в режим інвертора, що ведеться мережею, за первинного напрямку і значення I_d і гарантуючи тим, рекуперативний режим гальмування АД. Фазо-срумкові діаграми I АІС та відображення його першої гармоніки II наведено на рис. 2.10,б.

Однозначними перевагами системи ПЧ-АІ роцінують:

-Вищий частотний діапазон за напругою АІН (від 0 до 1500 Гц), що обмеженням якого виступає масштабування кількості комутацій та відповідні

комутаційні втрати по силових ключах АІ (для АІС діапазон по максимуму – не більше 100–125 Гц);

- Споживання з мережі низькогармонійних та низькочастотних складових напруги або струму, що споживаються в саторі двигуна;

- високий коефіцієнт потужності (до 0,95-0,98) для перетворювачів, що виконані з некерованими випрямлячами.

- Відносно незначна кількість силових ключів (порівняно з ПЧНС) і спрощена схема керування в порівнянні з ПЧНС, без синхронізації з мережею;

- для АІС здатність до рекуперації і безаварійність по виході на КЗ.

Недоліки даних перетворювачів:

- Повторне вторинне перетворення енергії (змінна-постійна-змінна) випрямляча, що ударяє по загальному ККД ПЧ (до 0,94-0,96);

- залежність (для тиристорних ключів АІ) від заданих умов по штучній комутації $\cos\phi$ та ступеню завантаження двигуна;

- для АІС нездатність виконання завдань при груповому навантаженні, габаритно-масові характеристик фільтра Φ , переапруження зв'язані з комутаційною діяльністю, занижений $\cos\phi$ для порівняння з АІН з ШІМ та випрямлячем на виході некерованим.

Конкретно вибраний для побудови експериментального еткнду Місгомстер 440 виконаний на автономному інвенторі напруги (АІН), що з використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Для розуміння меж використання, що накладаються застосування перетворювачів з АІН, необхідно знати фундаментальні принципи, на яких засновані перетворювачі частоти, що влаштовані таким чином.

Для пояснення принципу оботи винесемо схему, що наведена на Рис.

2.12. Трифазний змінний струм напруги мережі (можливе використання і однофазної схеми приєднання) інвертується трифазним випрямлячем.

Отримана постійна напруга потім випрямляється IGBT транзисторами в змінну із змінною частотою та амплітудою.

АІН здійснений з виконання перемикачання обмотки статора на

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

02.08 –МКР. 175 “С” 2021.02.21. 024 ПЗ

Арк.

36

постійний струм, і таким чином виконується динамічне гальмування, нереверсивний випрямляч дозволяє побудувати схему динамічного гальмування з додатковим резистором в ланцюгу живлення статорної обмотки, що покращує нагрівальні характеристики та зменшує витрати на електроживлення. За рахунок керованості інвертора є змога регулювати гальмівні режими.

Частотний перетворювач з ШІМ дає змогу регулювати частоту в діапазоні від 2 кГц і до 16 кГц, додатково є можливість виконання спеціальних засобів для задання її значення. Загалом ШІМ перетворювача частоти, що досліджується проявляє зміну частоти по параметрам навантаження та температури перетворювача, зберігання стабільного режиму роботи потребує змінного в обмежених рамках температурного режиму нагрівання, збільшення температури призводить до зниження частоти ШІМ.

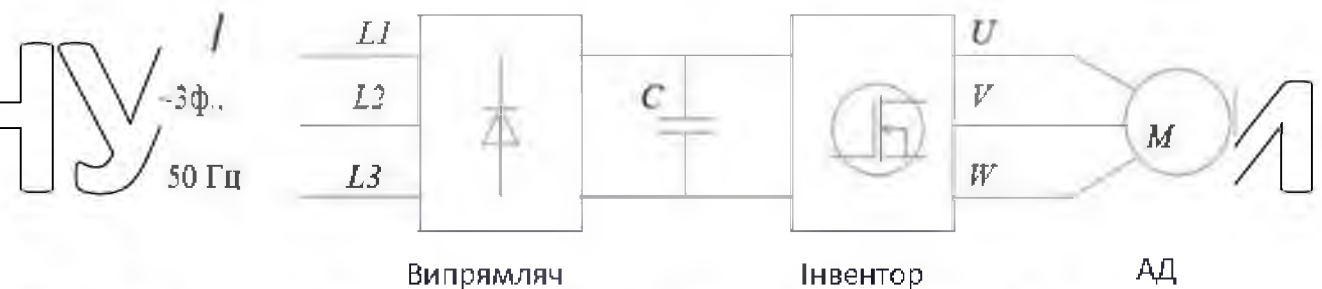


Рисунок 2.12- Засновки за якими побудовано ПЧ

Для перетворювачі, що зараз у використанні і для конкретно використаного Micromaster 440 наявні наступні закони по регулюванню частоти і напруги:

- Лінійний U/f (за замовчуванням), застосування передбачає можливість виникнення зміни моменту навантаження (насоси, конвеєри);
- FCC (*Flux Current Control*) – для підтримання струму двигуна, наявності поток, що підвищує ефективність, цей спосіб використовується для покращення ККД та підвищення динамічних характеристик;
- Квадратична U/f для навантажень, що характеризуються змінним моментом (компресори, насоси);
- Багатоточкова U/f – в особливих умовах.

2.4. Асинхронний електродвигун 5A80MA4

Даний електродвигун широкого використання за принципом асинхронний з роботою на змінному струмі, ротор двигуна короткозамкнутий:

- Можливий для приводу різноманітних механізмів від верстатів локального застосування до загальнопривідних компресорів, млинів, вентиляторів, насосів тощо;
- Номінальна напруга живлення – 380 В.

Умови роботи електродвигуна:

- Граничні значення критичних температур мінус -40° до плюс $+45^{\circ}$;
- Локалізовані для використання на висотності не більше 1000 м, над рівнем моря,
- Значення вологості при контрольній температурі плюс $+25^{\circ}$ C - до 98%

для виконання У3;

- Неприйнятне розміщення в середовищі з ризиками до вибіхв, відсутність струмопровідного пилу, концентрація агресивних газів не повина призводити до пришвидшення зношення металу та ізоляції з яких виготовлений двигун;

- Границя можливого запилення для даного двигуна із ступенем захисту IP54 не більше 10 мг/м³;

- середній рівень звуку на відстані 1 м від розміщення двигуна загального виконання на холостому ході становить від 51 до 85 дБ залі залежить від габариту (50-250 мм) та занчення частоти обертання, синхронного типу;

- Захисту від впливу вологи та пилу IP 54.

[1]

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



Рисунок 2.13 - Асинхронний двигун 5A80MA4 з пристосування для приєднання електромагнітного гальма

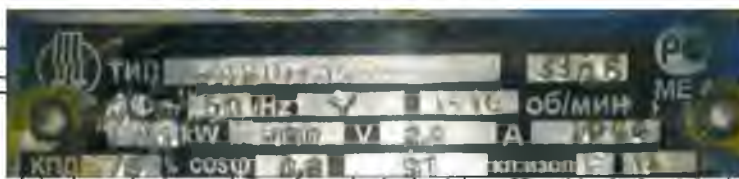


Рисунок 2.14 – Паспорт Асинхронного двигуна з технічними параметрами

Таблиця 2.7

Технічні параметри електродвигуна

Тип двигуна	5A80MA4
Потужність, кВт	1,1
Швидкість обертання, хв.	1410
ККД, %	75
Коефіцієнт потужності, cos φ	0,8
Маса механізму, кг	13
Кількість полюсів	4

2.5. Енкодер інкрементальний

Імпульсний (або покроковий) енкодер - це тип енкодерів, які використовуються для визначення напрямку руху зовнішнього механізму, а також відображають тобто слідує за кутовим переміщення, даного механізму.

Покрокові енкодери, що є інкрементальними з певним періодом створюють імпульси, що відповідають куту обертання валу. Дані енкодери, на відміну абсолютних енкодерів, не створюють вихідні імпульси, коли їх вал нерухомий. Покрокові енкодери пов'язані з рахунковими пристроями, що

є необхідною умовою для підрахунку вихідних імпульсів та їх перетворення на міру переміщення валу.

Інкрементальні енкодери застосовуються у тих місцях, де є необхідність визначення швидкості обертання валу конкретних механізмів.

Вісі валу механізму та валу енкодера механічно з'єднують використовуючи гнучку перехідну муфту, або взявши вирішення даного завдання жостку втулку, а також енкодер можна встановлювати прямо на вал, якщо енкодер виконаний з порожнистою віссю. Для виконання першого способу

виконують фіксацію корпусу енкодера до корпусу механізму, не співвісність,

можливі биття запобігають з використанням ефекту деформації гнучкої втулки. У двох інших випадках корпуси енкодера механізму зафіксують штифтом, для запобігання один відносно одного.

2.5.1 Принцип дії Енкодера

Складовою частиною енкодера являється скляний диск, що кріпиться всередині (рис. 4.2). Застосовується лінза для концентрування світлового потоку. Світловипроміньовачий елемент розміщується на протележній

стороні від фотоелементу. Тоді сприймаючий фотоелемент поглине таку

кількість світла, яка пройде через прорізи на в залежності від їхнього

розміщення. Для перетворення сприйнятого фотоелементом сигналу в

сигнал, що може сприймати цифрова апаратура використовується електронна

плата. В найпростішому випадку буде спостерігатись співпадіння кількість

імпульсів сигналу з кількістю прорізів на диску інкрементального Енкодера.

Вихідний сигнал складасть з двох каналів, які будуть генерувати імпульси

один по відношенню до іншого з затримкою на 90 градусів, це виконано для

визначення напрямку обертання. Базові параметри енкодера представлені у

таблиці 2.8.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



Рисунок 2.15 Зовнішній вигляд енкодера



Рисунок 2.16 - Принцип дії інкрементального енкодера

Таблиця 2.8

Технічні параметри Енкодера

Технічні параметри	Цифрові величини
Живляча напруга	10 ..30VDC
Сигнали вихідні	HTL доріжки, нульовий імпульс та інверсні сигнали
Оберти в кількості за один	1000 PPR
Точність (кутові секунди)	+/- (64,800) / імпульсів за секунду
Обмеження частоти (-3 дБ)	300 кГц
Швидкість допустима в електричних	7,200RPM
Швидкість макчимальна механічна	12000
Довжина кабелю з'єднувального, max	100 метрів
Індекс по захисту	IP67 (корпус), IP 64 (вхід валу)

Принцип фіксації зсуву фази $90^{\circ} \pm 0^{\circ}$, використовуються для визначення напрямку обертання валу за чи проти годинникової стрілки, для фіксації використовується квадратура виходу енкодера на базі двох вихідних каналів, допуск $\pm 45^{\circ}$ дозволений для зсуву фази по стандартизації.

НУБІП



аїни

НУБІП



аїни

Рисунок 2.17 – Відображення сигналів на вході енкодера

2.5.2. Модуль енкодера

Модуль датчика MICROMASTER створений для забезпечення взаємодії перетворювача частоти з іншими пристроями керування та контролю.

Модуль датчика застосовується у випадку виконання схем з енкодерами високої напруги на транзисторній логіці (НТЛ).

НУБІП

України

НУБІП

України

НУБІП



аїни

Рисунок 5.1 - Зовнішній вигляд модуля Енкодера

2.5.3. Приєднання модуля

Модуль датчика MICROMASTER містить 12 клемних з'єднань, описаних у таблиці 2.9

НУБІП

України

НУБІП

України

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Клемні з'єднання

Клем	Опис
A	Канал А
AN	Канал А Інвертований
B	Канал В
BN	Канал В Інвертований
Z	Нульовий імпульс
ZN	Нульовий імпульс Інвертований
18V	HTL зв'язок клеми з LK & 18V тільки)
LK	Напруга живлення валу енкодера
5V	TTL зв'язок клеми з LK & 5V тільки)
VE	Живлення для енкодера
0V	Живлення для енкодера
PE	Захисне заземлення

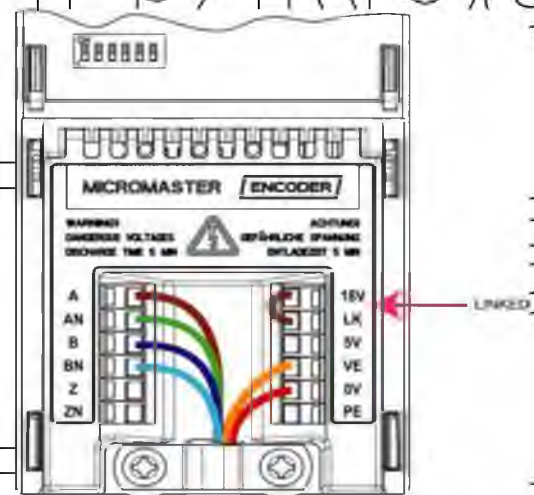


Рисунок 2.18 – Клемне приєднання модуля енкодера до інкрементального енкодера (HTL)

2.6. Тахогенератор постійного струму ТМГ-30П

Тахогенератор постійного струму - електрична машина працююча на постійному струмі із виконання обмотки збудження незалежним чином або з використанням постійних магнітів, яка працює в генераторному режимі.

Конструктивно наявні лише незначні відмінності від машин постійного струму. Призначення даних машин полягає в замірах частоти обертання слідуючи та перетворюючи для цього значення вихідної напруги, а також

збирання електричних сигналів, що пропорційні частоті обертання вулу для схем з автоматичним регулюванням. Конкретно тахогенератор ТМГ-30П це малопотужна електрична машина постійного струму, система збудження якої виконана на постійних магнітах. Пропорційність кутової частоти роторного обертання генераторної машини до ЕРС при постійній величині потоку збудження це є принципом дії машини. Рис. 2.19 зображує ТМГ-30П.



Рисунок 2.19 Зовнішній вигляд тахогенератора ТМГ-30П



Рисунок 2.20 Паспортні дані Тахогенератора

Таблиця 2.10

Базові характеристики тахогенератора

Характеристики	Номінальні значення
Номінальна напруга,	230
Опір навантаження, кому	2,64
Номінальна частота обертання, хв -1	4000
Клас точності	2,5
Похибка по відображенню функ. відношення, %, не більше	± 1
Режим роботи	тривалий
маса, кг	3,34

2.6.1. Принцип дії тахогенератора

Тахогенератори постійного струму (ТГПС) конструктивно і за принципом дії не мають відмінностей в порівнянні з простими генераторами, що видають постійний струм при малих номінальних значення потужності (рис. 2.21). Підтримання сталого струму в обмотках збудження здійснюється за способами компенсації коливань опору обмотки за температурою, а також приведення для живлення стабільної напруги.

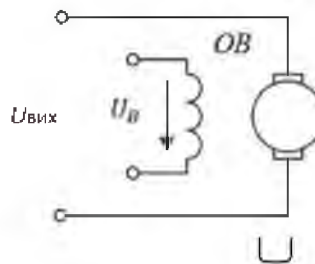


Рисунок 2.21 – за принципом дії ТГПС

Специфіка функціонування тахогенератора заключається у тому, що його якор звично вимикають на постійний струм R_n .

$$I = \frac{E}{R_n + R_B} = \frac{cn\Phi_B}{R_n + R_B'} \quad (6.1)$$

де R_n – внутрішній опір тахогенератора;

c – конструктивна постійна генератора;

n – швидкість обертання якоря;

Φ_B – потік збудження.

Напруга на виході тахогенератора:

$$U_{\text{вих}} = \frac{cn\Phi_B R_n}{R_n + R_n} \cdot n, \quad (6.2)$$

Постійність величин, що описують параметри, та вписані в чисельник та знаменник дробу виразу (6.2), дає змогу записати наступний вираз:

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

$$U_{\text{вих}} = k\omega, \quad (6.3)$$

де ω – кутсва частота обертання якоря.

k - коефіцієнт перетворення тахогенератора

$$k = \frac{30c\Phi_B}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{R_B'}{R_B}} \quad (6.4)$$

Рівняння (6.3), сутнісно відображає принцип за яким будується статична тахогенераторна характеристика, і відображає пропорційність напруги на виході тахогенератора до його швидкості обертання ω (рис 6.4).

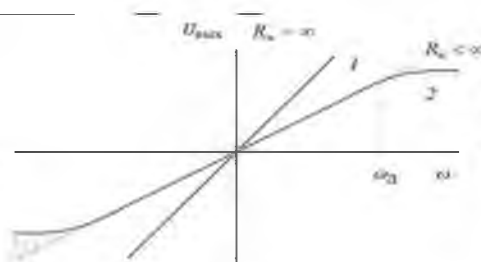


Рисунок 2.22 – статична характеристика тахогенератора

Пропорційність виникає тільки за значення $\Phi_B = \text{const}$. Хоча треба відмітити про можливість зміни магнітного потоку, що виникає в обмотках збудження, за дії реакції якоря.

При розташування щіток на нейтралі (Рис 2.23), поздовжній складник реакції якоря (намагнічує і розмагнічує) рівний нулю. Поперечний складник реакції якоря, утворює похибки розподілу індукції і знаходиться на поверхні якоря, а зміна величини магнітного потоку реалізується у виключному випадку одночасного насичення полюсів і якоря. В свою чергу вихідна напруга тахогенератора буде описуватись днійною функцією за функцією швидкоти обертання, при цьому розміщення щіток повинно бути виконаним по нейтралі; відповідно полюси та якір не наситяться достатньо і в наслідку струм навантаження не досягне значення, за якого під краєм полюса, що збігає, могло виникнути насичення посередньо через дію поперечного складника реакції якоря.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

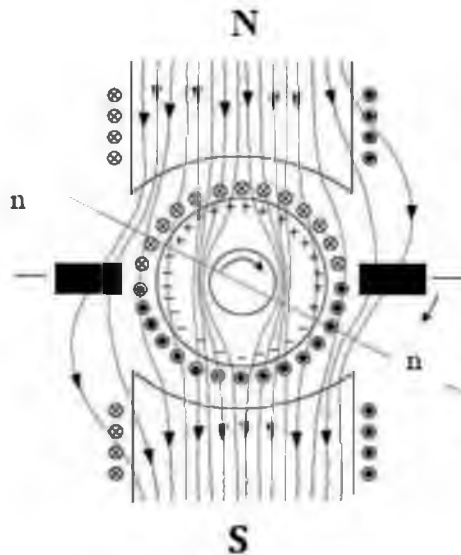


Рисунок 2.23 - Магнітне поле ТГПС

Рис. 2.22 зображає залежність $i_{\text{вих}} = f(\omega)$ у випадку холостого ходу, тобто $R_n = \infty$ і при певному навантаженні $R_n < \infty$. Похибка по відхиленню характеристики 2 на відмінність від лінійного закону викликана тим, зростаюча швидкість обертання призводить до збільшення струму якоря, поперечні ампервитки якоря під краєм полюса, що збігає все значніше приводять до збільшення індукції, яка при умові $\omega > \omega_d$ виходить на етап насичення, і встановлюється ситуація при якій індукція не змінюється пропорційно ампервиткам. Під краєм полюса, що набігає, здійснюється зменшення індукції в пропорційності до ампервитків. Результуючий магнітний потік спадає і характеристика 2 змінює свою траєкторію не слідує лінійному закону. З чого встановлюється ситуація при якій диференційовані значення R приходять у відповідність до встановленим діапазонам швидкості від нуля до ω_d , в розподілі коли напруга є лінійною функцією по відношенні до швидкості обертання. Причому розподіл зростає за умови збільшення опору навантаження, паралельно з чим і збільшується коефіцієнт перетворення тахогенератора (6.4). Тахогенератори володіють деяким списком достоїнств: зміна напрямку обертання призводить до зміни полярності сигналу, загальна маса та габарити зменшені, компенсаційна схема температурної похибки упрощена.

2.7. Електромагнітне гальмо

2.7.1. Пристрої та принцип дії електромагнітного гальма

Електромагнітні гальма (ЕМГ) загалом отримали значне розпоширення як пристрої для вимірювання моменту на валу машин, що виробовуються. Також вони отримали розпоширення як механізми для створення навантажень на різноміанітних механізмах, характерною рисою цих навантажень є те, що вони змінні, не менш значним є використання їх для вимірювання к.к.д. ЕМГ являє собою хрестовину на сердечниках якої виконано обмотки збудження, оскільки є чотири сердечника то і кількість обмоток відповідає їм. Ці чотири сердечника при роботі по суті роздвоюють два полюси в послідовності: N-S-N-S, це досягається за рахунок живлення обмоток постійним струмом. В повітряному проміжку що знаходиться між полюсами розміщений диск який виконує функцію провідника магнітного потоку між полюсами. Функціональним його використання є також наявність індукованих вихрових струмів на диску, які при роботі з магнітним потоком створюють гальмівний момент.



Рисунок 2.24- Поеднання складників експериментального стенду

2.8. Фазовий регулятор потужності на основі мікросхеми

K1182PM1P

Фазовий регулятор виконаний на базі мікросхеми K1182PM1P застосовується у випадку необхідності керування потужністю (ЕМГ) у

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

електричних колах, що працюють на рівні напруги 220В. Для живлення необхідний постійний струм, який здобувається на даному етапі схеми за посередництвом діодного мосту.

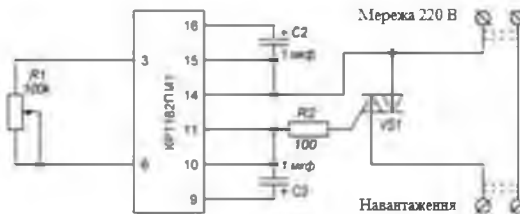


Рисунок 2.25 – Фазовий регулятор потужності на базі мікросхеми K1182PM1P

Таблиця 2.11
Елементна база фазового регулятора K1182PM1P

Умовне позначення	Повна назва елемента
R1	Потенціометр
C2, C3	Конденсатор електролітичного типу
VS1	Напівпровідниковий елемент симістор
R2	Резистор
K1182PM1P	Мікродифрова фазового регулятора

Таблиця 2.12

Позначення контактних входів та виходів мікросхеми K1182PM1P фазового регулятора

Номер виводу	Призначення контактних входів та виходів
1	NC-не застосовується
2	NC-не застосовується
3	C-для приєднання ємнісних елементів
4	NC-не застосовується
5	NC-не застосовується
6	C+-для приєднання ємнісних елементів
7	NC-не застосовується
8	NC-не застосовується
9	UST2+ електрод керування
10	AC2 Мережева напруга
11	AC2 Мережева напруга
12	NC-не застосовується
13	NC-не застосовується
14	AC1 Мережева напруга
15	AC1 Мережева напруга
16	UST1+ електрод керування

НУБІП України

2.8.1 Принцип дії фазового регулятора

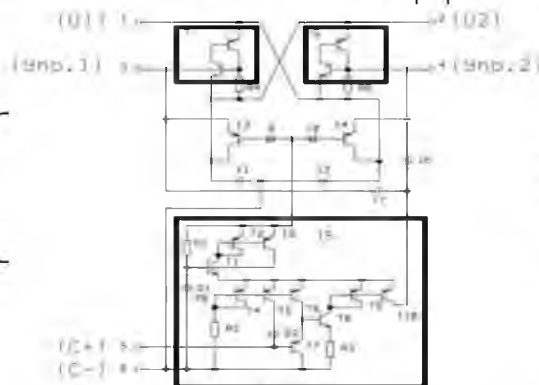


Рисунок 2.26 – Схема фазового регулятора - структурна

Тиристори 7 і 8, що являються складовими для пристрою фазової регуляції включені порізно на клеми силових виводів 1 і 2, зустрічно-паралельним чином, перетворювач, що здійснює трансформацію напруги в струм 15, обладнаний вихідними клемами 5 і 6 для приєднання керуючого елемента, напруга на який потрапляє з діодного моста 9, 10, 11 і 12 що роз'єднано між виводами 1 і 2. Вихідні клеми перетворювача 15 приєднано через діоди призначені для розв'язки 17 і 16 до клем 3 і 4 керування елементами на тиристорній базі 7 і 8 відповідно. Клеми керування 3 і 4 одночасно мають з'єднання з транзисторними емітерами елементів 13 і 14 Р-Н-Р-типу провідності, переходи між базою та колектором яких з'єднано послідовно з діодами 9 і 10 по двом плечам мосту.

Робота пристрою заключається в наступному. В умовах коли тиристори закриті 7 і 8 поява мережевої напруги керування перетворювач, що трансформує напругу в струм 15 отримує живлення через міст (діоди 9, 10, 11, 12) і буде створювати вихідний струм I . Найвчий взаємозв'язок між рівнем керуючої напруги і струмом на виході елемента 5 по відношенню до 6 це дає змогу встановлення елемента керування, що являються зовнішніми (резистор, можливо ємність).

Потенціометр, служить для зміни ступеню R . Значення на виводі 1

						02.08 –МКР. 175 “С” 2021.02.21. 024 ПЗ	Арк.
							50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

більш позитивної напруги, ніж на виводі 2, це призводить до того, що вихідний струм елемента 15 призводить до накопичення енергії на С2, що включено на вивід 3, що служить тиристорним керуванням 7.

Живильний струм перетворювача протікає через вивід 1, транзистор 14 Р-N-P-типу провідності, діод 10, керований перетворювач 15, діод 11 і висновок 2 УРМ. Транзистором 14 ємність С1 перебуватимуть в стані розрядження. Зростання рівня напруги на елементі С2, до напруги відкриття тиристора 7, призводить до вмикання, цього елемента та утворення проходу для струму на навантаження.

Керований перетворювач 15 що зашунтовано елементом 7, що включено до закінчення напівперіодового етапу напруги мережі (або до закінчення протікання струму у випадку, якщо навантаження індуктивне).

Відповідно, керований перетворювач 15 за опосередкованим впливом ємності С2 здатен до затримки відкриття тиристорного провідного каналу 7.

За напруги відкриття тиристора 0.7В. Напруга між клемми 1 і 2 міняє полярність, що призводить до приведення значення напруги на клемі 2 по величині більш позитивним, в порівнянні з клемою 1, тиристор 7

увімкнеться в зворотному напрямку та не призведе до подальшого проведення струму, а діодний міст 9, 10, 11 і 12 подасть живлення на елемент 15. Протікання струму буде виконуватись через клему 2, база-колекторний перехід транзистора 13, діод 9, перетворювач 15, діод 12, клемма 1. Ємність

С2, що розташовується між клемми 3 і 2, почне втрачати енергію через транзистор 13; ємність С1, що розташовується між клемми 4 і 1, отримає живлення вхідним струмом перетворювача 15, за заданий час t, напруга повинна досягнути рівня коли тиристор 8 увімкнеться. Вмикання тиристора призведе до проходження струму до навантаження і до шунтованого

кервованого перетворювача. У висновку, це призводить до послідовної зміни передачі функцій розрядження та заряджання між ємностями в залежності від діючої півхвилі напруги. Резистори R4 і R5 застосовуються з ціллю розряджання С1 і С2 при заверженні живлення пристрою.

2.9. Склад експериментального стенду та принципова схема

Експериментальний стенд налічує наступні позиції.

1. Вимикачі автоматичні Р82(трьохполюсний) та Р84(однополюсний);
2. Перетворювач частоти MicroMaster 440;
3. Асинхронний двигун 5А80МА4;
4. Електромагнітне гальмо;
5. Тахогенератор ТМГ-30П;
6. Кодовий диск (Енкодер інкрементальний);
7. Датчик для зчитування швидкості;
8. Пальмівний резистор;
9. Тугоплавкий запобіжник.

Обладнання стенду проводилось за принциповою схемою, що зображено на рис. 2.27.

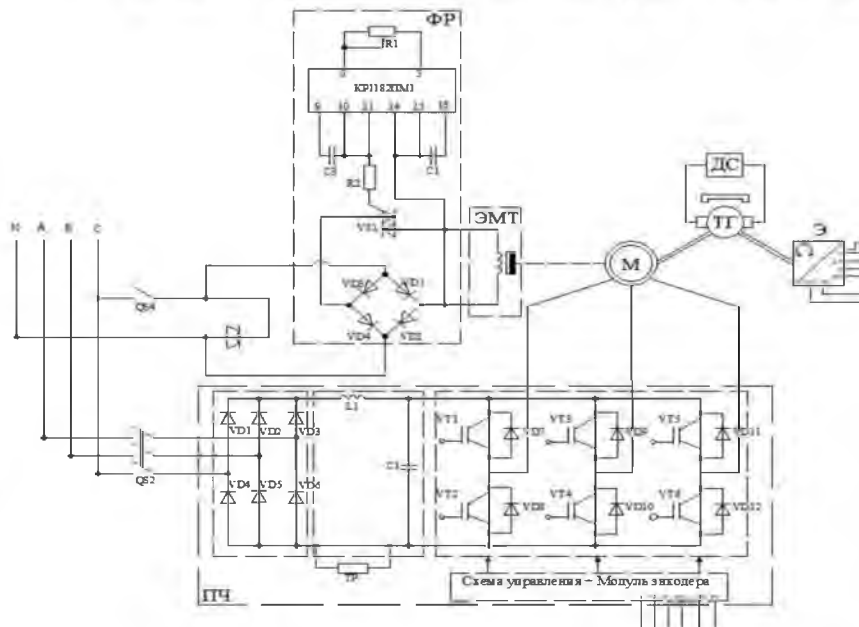


Рисунок 2.27 – Принципова електрична схема експериментального стенду

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Умовні позначення елементів на схемі

Умовне позначення	Повне найменування
ПЧ	Перетворювач частоти
М	Асинхронний двигун
ТГ	Тахогенератор
ЕМГ	Електромагнітне гальмо
ДШ	Датчик швидкості
Е	Енкодер
QS2, QS4	Автоматичний вимикач
ТР	Гальмівний резистор
ФР	Фазовий регулятор

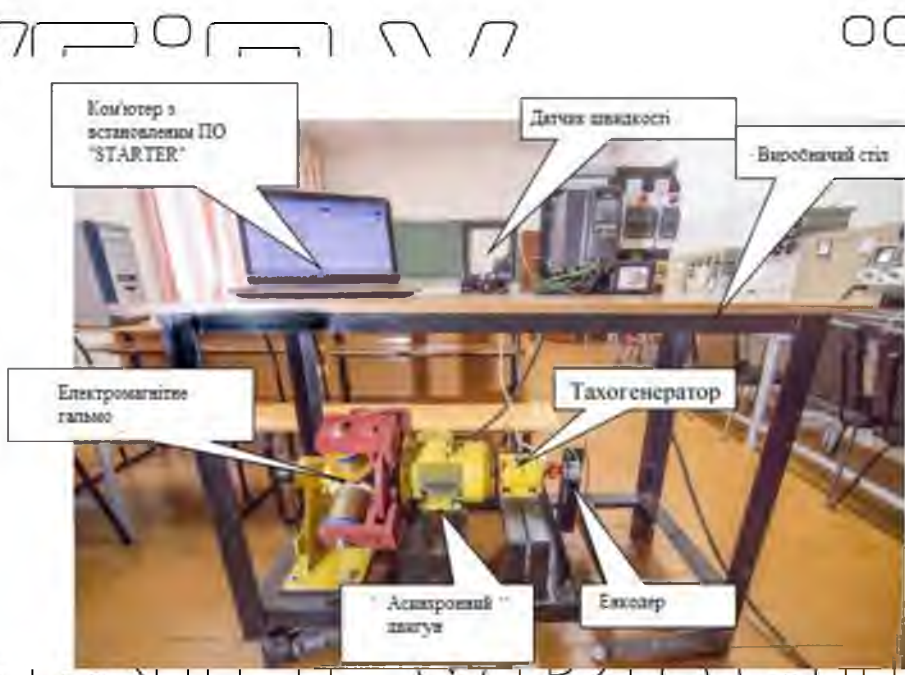


Рисунок 2.28 - Експериментальний стенд «Асинхронний електропривод, що керується у функції частоти, з використанням перетворювача SIEMENS Micromaster 440»



Рисунок 2.29 – Експериментальний стенд «Схема керування асинхронний електродвигуном, що керується у функції частоти з використанням перетворювача SIEMENS Micromaster 440»

Усі механічні з'єднання проведені резиновими муфтами, та виконані жорстко, місця з'єднань зображено на рис.2.30.



Рисунок 2.30 – області механічних з'єднань елементів експериментального стенду

2.10. Програмне забезпечення для експлуатації перетворювача частоти Micromaster 440 – Siemens «STARTER»

«STARTER» - це програмне забезпечення, що забезпечує виконання ряду етапів налаштування та підтримує користувача при параметризації, введенні в експлуатацію, діагностиці та обслуговуванні. Справжня цінність «STARTER» це можливість перенесення даних з електронних таблиць

Змн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата

складових приводу. Сама наявність даної можливості підвищує швидкість параметризації, протидіє хибним записам, що призводить до загальної оптимізації. Узагальнене функціональне тестування є можливість перевірити конфігуративні налаштування та автоматичного підвищення ефективності в подальшому. Окермо є можливість стеження за зданими, що вносяться оператором та тим, що фактично створюються при роботі. Серед функціоналу наявна здатність до створення звіту в безпеці прийому за різні періоди часу, а також графічний інтерфейс зручний для роботи та простий для опанування.

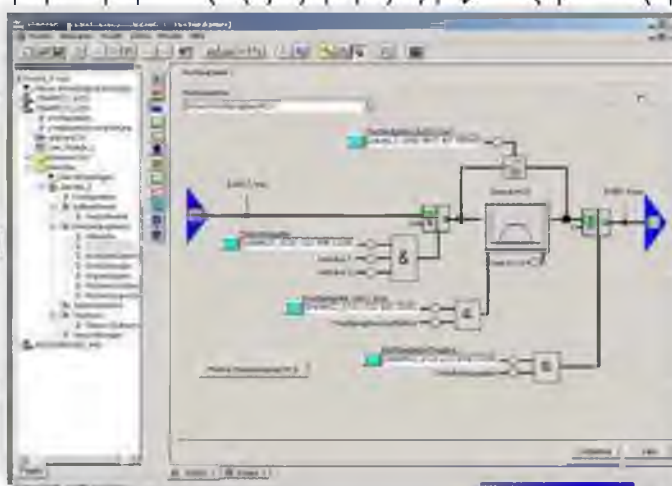


Рисунок 2.31 – Робоче вікно програми «STARTER»

За посередництвом даного програмного забезпечення проводиться параметризація обладнання, що поєднано на для створення експериментального стенду

РОЗДІЛ 3 Дослідження асинхронного електроприводу з частотним керуванням

3.1. Скалярне $U/f=const$ керування асинхронним електроприводом на основі експериментального стенду.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Попередньо перед запуском двигуна потрібно пройти етап параметризації перетворювача частоти див. Табл 3.1.

НУБІП УКРАЇНИ

Таблиця 3.1

Швидка параметризація

Параметр	Значення
P0010	1 – швидка парметризація
P0100	0 - потужність кВт, частота 50Гц
P0304	380 – напруга двигуна, (В)
P0305	2,8 – струм двигуна, (А)
P0307	1,1 – потужність приєднаного двигуна, (кВт)
P0310	50 – частота для двигуна, Гц
P0311	1410 – швидкість двигуна (об/хв)
P0700	1 – панель оператора
P1000	1 - панель оператора
P1080	5 – Нижнє значення частоти, Гц
P1082	50 – Найвище значення частоти, Гц
P1120	10 – Розгон, (сек)
P1121	10 – Гальмінний час, (сек)
P3900	1 – прийняття швидкого введення, враховуючи розрахунки по двигуну та додатково первинні налаштування (рекомендовано)

Подальші дії зв'язані з запуском двигуна і виконанню за посередництвом інтерфейсу RS485(COM)-USB, або ВОР(базова панель оператора) отримання значення для створення характеристик.

НУБІП УКРАЇНИ

Таблиця 3.2

Технічні харакетристи, що знімаються з АД

Пареметричний номер	Назва
r0025	$U_{ПЧ}$ – Напруга на виході перетворювача
r0027	I - Струм на двигуні
r0031	M – діючий момент на валу двигуна
r0032	P_1 – Споживана двигунна потужність
r0038	cosφ - коефіцієнт потужності

В свою чергу зняття мехінічних харакетристик АД виконують за змінного моменту навантаження використовуючи при цьому функції

електромагнітного гальма. А значення швидкості двигуна можна виявити на датчику швидкості.

НУВБІП України

Таблиця 3.3

Дані, що отримані в результаті вимірювань

f, Гц	$M_c, Н*м$	$I_2, А$	$\omega, рад/с$	$U_{пч}, В$
50	0	2.4	156	380
	7.15	2.6	146.6	380
	9.3	3.5	145.5	380
	9.5	3.7	141.3	380
40	0	2.4	125	306
	5.2	2.5	120	306
	7.3	3	114	306
	9.2	3.6	104.7	306
30	0	2.4	94	232
	3	2.47	87	232
	6.45	2.7	81.6	232
	8.25	3.2	75.3	232
	9	3.6	73.3	232
20	0	2.4	61	157
	4	2.6	55.5	157
	7.25	3	51.31	157
	8	3.2	42.93	157
10	0	2.4	31	84
	2	2.4	30.3	84
	4	2.4	24	84
	4.95	2.4	21	84
	5.35	2.42	20	84

Графіки, створені використовуючи дані з таблиці 3.3.

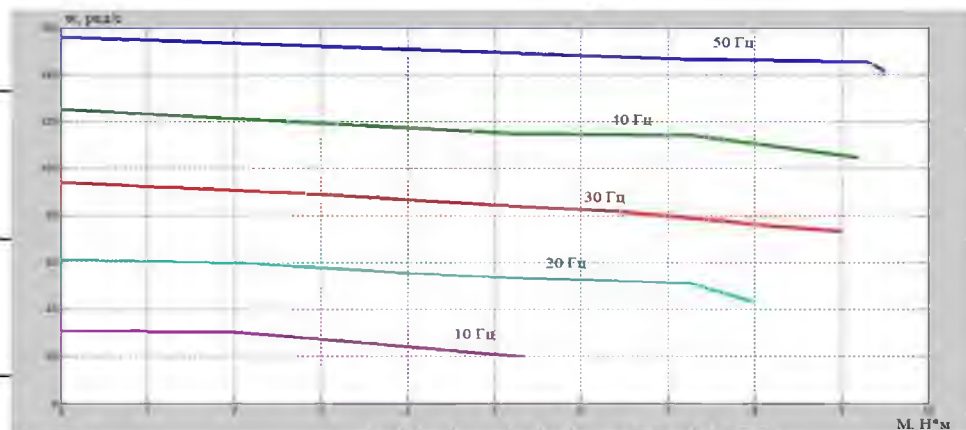


Рисунок 3.1 – Механічні характеристики АД за різних значень частоти

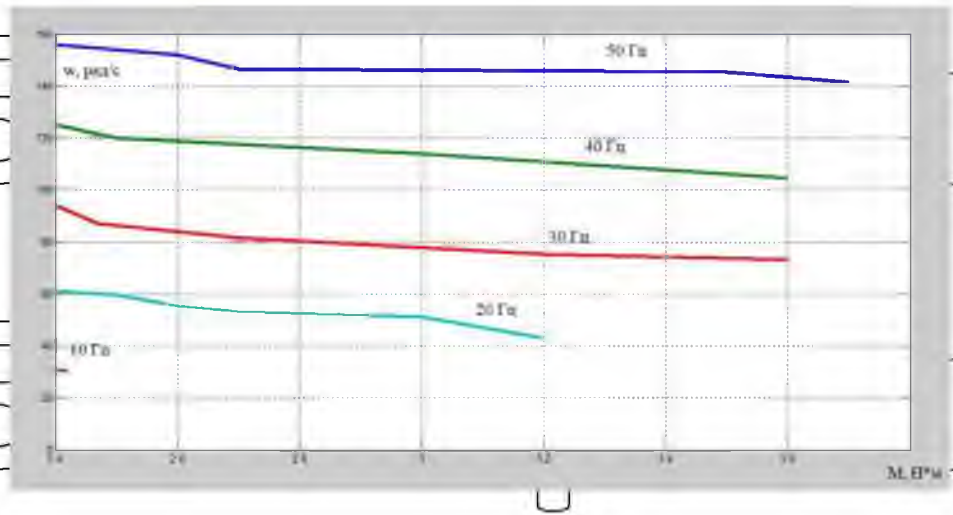


Рисунок 3.2 – Електро механічні характеристики АД за різних значень частоти

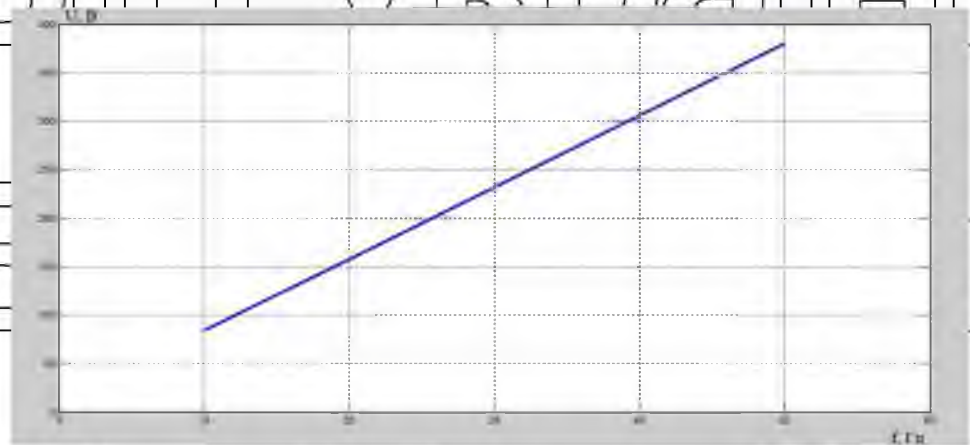


Рисунок 3.3 - Регулювальна характеристика ПЧ

З рис.3.1 слідує, що механічна характеристика має високу степінь жорсткості, при цьому прямоподібність регулювальної характеристики

Рис.3.3 співвідноситься з законом $U/f = \text{const}$.

3.2. Моделювання частотно-керованого електроприводу у пакеті Simulink. Порівняння модульних та експериментальних даних.

3.2.1. Пакет імітаційного моделювання SIMULINK

Беззаперечним варіантом в частині програмного середовища, що було вибрано для математичного моделювання асинхронної машини, було використано відомий пакет Simulink, що є частиною більшого загального середовища Matlab. Simulink - це візуальне відображення блоків з функціоналом імітаційного моделювання, основні складові, що в ньому використовуються це блок-діаграми, які за виглядом виконані спрямованими графами, за використанням їхнього функціоналу можна створювати динамічні моделі, не виключаючи дискретні, безперервні та гібридні, нелінійні та розірвані системи.

Simulink стає корисним і як база для використання уже готових функціональних блоків, що дозволяє простіше моделювати системи з електричним, гідравлічним, або механічним. Є можливість застосовувати модельно-орієнтований розвинутий підхід, для виконання систем керування, засоби керування та пристрої роботи в реальному часі. Для виконання даної роботи стало в нагоді можливість моделювання різноманітних впливів, які наявні в системі АД-ПЧ, а також точність з якою виконувалося компілювання побудованої моделі.

3.2.2. Моделювання частотно-керованого електроприводу

Імітаційна модель за системою перетворювач частоти - асинхронний двигун викладено на Рис. 3.4.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

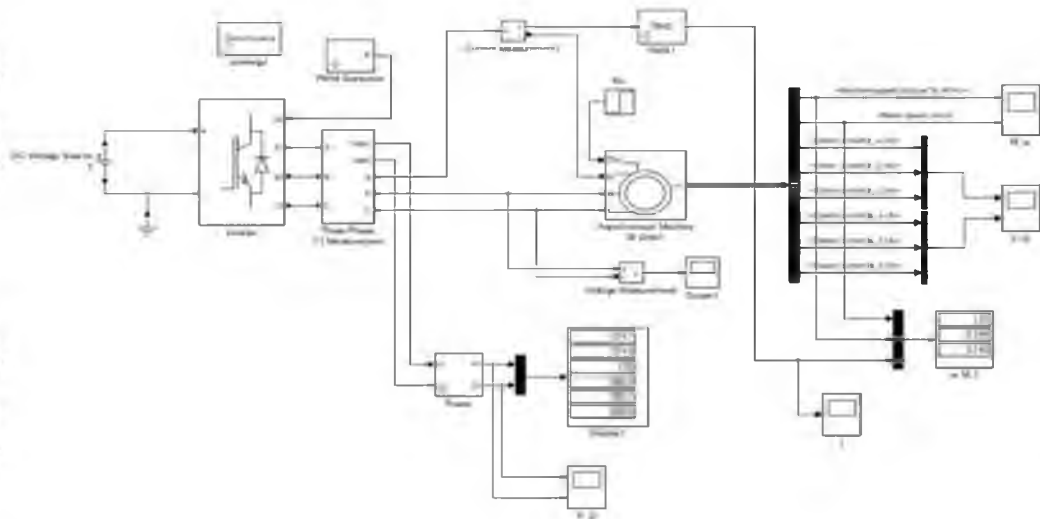


Рисунок 3.4 – Імітаційна модель системи ПЧ-АД з керування $U/\omega = \text{const}$ в пакеті

Simulink

Складовими моделі є:

- 1) Генератор постійного струму (блок DC Voltage Source);
- 2) силова складова ПЧ (блок Inverter);
- 3) схема керування ПЧ (блок PWM Generator);
- 4) асинхронний двигун із ротором, що виконано короткозамкнутим (блок Asynchronous Machine);
- 5) Задавач навантаження для АД із КЗ ротором M_c (блок Step);
- 6) вимірювальні пристрої, що виконують вимірювання за кутовою швидкістю, моментом та напругою на статорі двигуна (блоки Scope та Display);
- 7) Вимірювальний засіб для струму та напруги по трифазній схемі живлення (блок Three-Phase VI Measurement);
- 8) Вимірювальний пристрій за параметрами активної та реактивної потужностей (блок Power);
- 9) блок RMS використовується для слідування за діючим струмом ротора АД;
- 10) блок Machines Measurement/Display для розподілення вектора m на ряд змінних параметрів, що вимірюються в АД.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Параметри, що задаються для АД:

1) тип ротора Rotor type, для вибору короткозамкнутого виділяємо Squirrel-cage;

2) система контролю часу для виконання аналізу Reference frame = Stationary;

3) потужність (Вт), діюча напруга номінальна, лінійна (В) та частота (Гц) у вигляді $[P_n, V_n, f]$;

4) активний опір (Ом) та індуктивність розсіювання (Гн) для заміни параметрів статора $[R_s, L_s]$;

5) прикладені на статор: активний опір (Ом) та індуктивність (Гн) для вигляду по схемі заміщення $[R'r, L'r]$;

6) індуктивність вітки намагнічування L_m ;

7) момент інерції (кг*м²), коефіцієнт в'язкого тертя (Н*м*с), кількість пар полюсів за виглядом $[J, F, p]$;

8) Вихідні дані для моделювання (ковзання, положення ротора, струми статора та його початкові фази) – залишають беззмінними.

Параметри машини для введення складаються з паспортних даних, що вказані на ній, а деякі необхідні параметри розраховуються з використання наступних формул.

Таблиця 3.4

Технічні параметри АД: 5А80МА4

P_n , кВ	n_n , об/	η_n , %	cos φ	I_n , А	k_I , v.o	k_n , v.o	k max	J , кг • м ²
1.1	14	75	0.8	2.8	5.0	2.2	2.4	0.0

Номінальна швидкість АД:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{3,1415 \cdot 1410}{30} = 147,6 \text{ рад/с}, \quad (3.1)$$

Номінальний момент АД:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{1100}{147,6} = 7,45 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (3.2)$$

Критичний момент АД:

$$M_{кр} = k_{max} \cdot M_H = 2,4 \cdot 7,45 = 17,88 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (3.3)$$

Пусковий момент АД:

$$M_n = k_n \cdot M_H = 2,2 \cdot 7,45 = 16,839 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (3.4)$$

Критичне і номінальне ковзання АД:

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0,06, \quad (3.5)$$

$$s_{кр} = s_H (k_{max} + \sqrt{k_{max}^2 - 1}) = 0,06 \cdot (2,4 + \sqrt{2,4^2 - 1}) = 0,275, \quad (3.6)$$

Опори активні, по приведенню ротора та статора АД:

$$R_r^I = \frac{P_H + \Delta p_{мех}}{3 \cdot I_H^2 \cdot \frac{1-s_H}{s_H}} = \frac{1100 + 0,03 \cdot 1100}{3 \cdot 2,8^2 \cdot \frac{1-0,06}{0,06}} = \frac{1133}{395,27} = 3,075 \text{ Ом} \quad (3.7)$$

$$R_s = \frac{U_{лн} \cdot \cos \varphi (1-\eta)}{\sqrt{3} I_H} - C^2 \cdot R_r^I - \frac{\Delta p_{мех}}{3 \cdot I_H^2} = \frac{380 \cdot 0,8 \cdot (1-0,75)}{\sqrt{3} \cdot 2,8} - 1,03^2 \cdot 3,075 - \frac{0,03 \cdot 1100}{3 \cdot 2,8^2} = 15,67 - 3,041 - 1,403 = 11,005 \text{ Ом} \quad (3.8)$$

Індуктивність розсіяння статора і приведення ротора:

$$L_s = L_r = \frac{U_{лн} / \sqrt{3}}{4 \pi \cdot f_1 \cdot (1+C^2) \cdot k_I I_H} = \frac{380 / 1,732}{4 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot (1+1,03^2) \cdot 5 \cdot 2,8} = \frac{219,4}{18129} = 0,012 \text{ Гн} \quad (3.9)$$

$$L_1 = L_m + L_s = \frac{U_{лн} / 1,732}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot I_H \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{кр} \cdot s_H}{1,723 \cdot U_{лн} \cdot p \cdot s_{кр}}} = \frac{380 / 1,732}{2 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot 2,9 \cdot \sqrt{1 - (0,8)^2} - \frac{4 \cdot 3,1415 \cdot 50 \cdot 17,88 \cdot 0,06}{1,723 \cdot 380 \cdot 4 \cdot 0,275}} = \frac{219,4}{527,78 - 0,931} = 0,416 \text{ Гн} \quad (3.10)$$

Кофіцієнт приведення:

$$C = 1 + \frac{L_s}{L_m} = 1 + \frac{0,012}{0,416 - 0,012} = 1,0299 \approx 1,03, \quad (3.11)$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Налаштування передусе зняття характеристик при M_c при його зміні, які були зняті після внесення усіх значень параметрів, результати викладено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Результати моделювання за $U/f = \text{const}$ регулювання

f , Гц	M_c , Н*м	I_2 , А	w , рад/с
50	0	2.4	156
	3	2.6	154
	5	3.1	153
	9.5	3.7	147
40	0	2.4	126
	5.2	2.6	121
	7.3	2.9	118
	9.2	3.6	114
30	0	2.4	94.2
	3	2.47	92
	6.45	2.7	89
	8.25	3.2	86
	9	3.6	84.3
20	0	2.4	62.8
	4	2.6	60.5
	7.25	3	59.3
	8	3.2	55.5
10	0	2.4	31.4
	2	2.4	31
	4	2.4	30.4
	4.95	2.4	30
	5.35	2.42	30

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3.2.2 Порівняльні експериментальні дослідження з результатами комп'ютерного моделювання

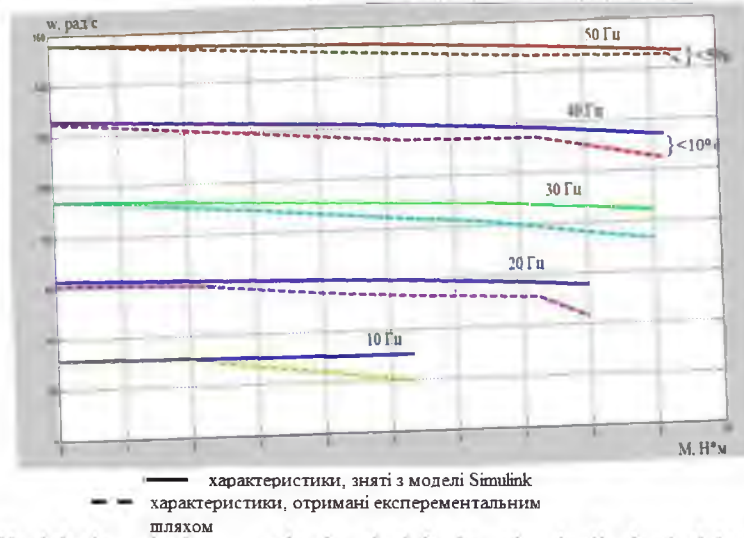


Рисунок 3.5 Механічні характеристики АД за різних значень частоти

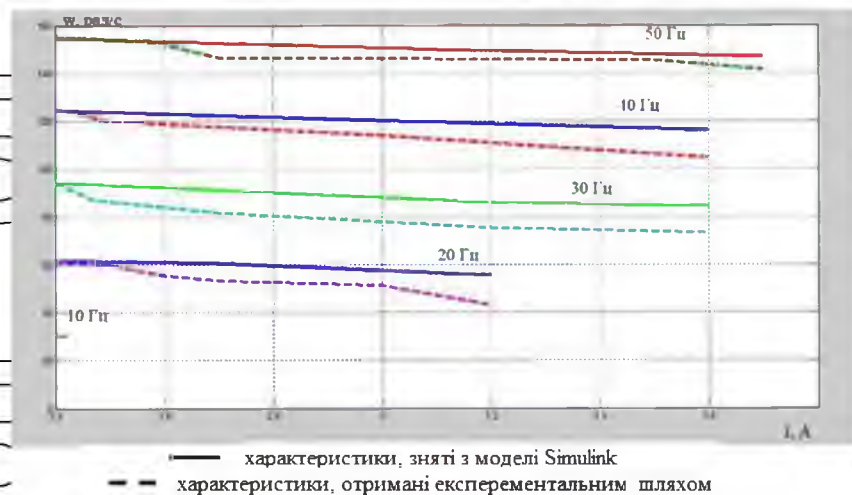


Рисунок 3.6 – Електромеханічні характеристики АД за різних значень частоти

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

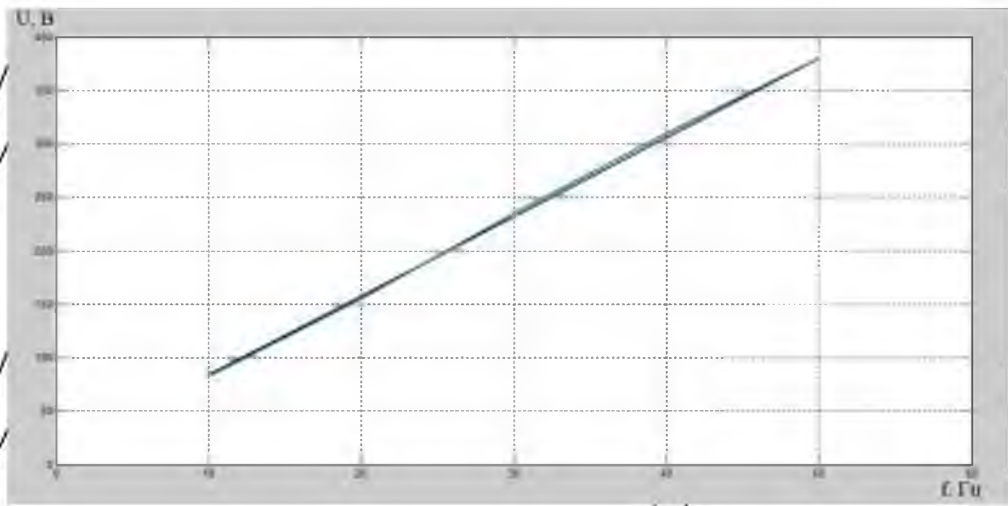


Рисунок 3.7 - Імітаційна та експериментальна характеристики АД

Аналітичний аналіз методом порівняння даних отриманих з двох джерел за модельного виконання та експериментально (див. рис. 3.5 та 3.6), дає змогу оцінити саме математичну модель системи АД-ПЧ. Основним критерієм є точність з яким описуються статичні режими. Відхилення на рівні 5% при порівнянні між даними отриманими за двома різними методами збору вказує на високу потенційну корисність імітаційної моделі, що відкриває горизонти для виконання на її основі більш складних систем. Питанням розгляду наступного розділу виступає векторне керування з зворотнім зв'язком по параметру швидкості, беручи за основу модель розглянуту в цьому розділі.

3.3. Векторне керування асинхронним електродвигуном із зворотнім зв'язком за швидкістю на основі експериментального стенду

Використання зворотнього зв'язку у функції швидкості здійснюється за допомогою інкрементального енкодера, який механічно поєднують через муфту з валом двигуна, також його з'єднують з перетворювачем частоти Micromaster 440.

Попередньо до ввімкнення стенду потрібно перемикнути усі перемикачі DIP в функціональне положення «0». Зворотній бік модуля енкодера використовується для розміщення DIP перемикача.

НУБІП України



Рисунок 3.8 - DIP-перемикачі

Введенню в експлуатацію двигуна з налаштованим режимом векторного керування з використанням датчика (VC) є необхідність активації перетворювача з режимом U/f (P1300 = 0). Якщо двигун, що працює і підключений до датчика швидкості (активований через P0400), то його параметри P0061 і P0021 мають збігатися по наступним величинам:

- знак значення (декілька відсоткове відхилення допустиме)

При умові виконання попередньо вказаних вимог можливе активування векторного керування, при регулювання датчиком швидкості (P1300 = 21).

Вимоги по порядок введення в роботу:

- 1) Створюється можливість появи різності потенціалів на живлячих клеммах електроприводу, опосередковано через комутацію автоматів SA2, SA4.
- 2) Попереднє налаштування ПЧ та параметризація на режим векторного керування:
 - P0003=3 – ступінь доступності параметрів.
 - P0400=2 – тип датчиків швидкості вибір (імпульсний датчик двохдоріжковий)
 - P0491=0 – зчитування реакції при зникненні сигналу швидкості (відсутній перехід)
 - P0492=0 – втрата сигналу та контроль даного стану;
 - P1300=21 – тип керування (датчик для векторного керування).
 - P1442=4 мс – фактична швидкість – контроль часу фільтрації;
 - P1460=3.0 – коефіцієнт поділення по регулятору швидкості
 - P1462=400 мс – інтегровальний час для регулятора швидкості.

Не потрібно забувати про внесення параметрів, описаних у розділі 3.1.

3) За параметризацією слідує розрахунок двигуна ($P_{3900} = T$).

4) Виконується запуск електричної машини

5) Використання ЕМГ дає змогу провести завантаження електродвигуна і зняти значення його параметрів, таких як:

- r0022 – частота обертання;

- r0027 – струм двигуна;

- r0031 – момент двигуна.

6) Здійснення 5 пункту необхідно виконати при різних значеннях частоти.

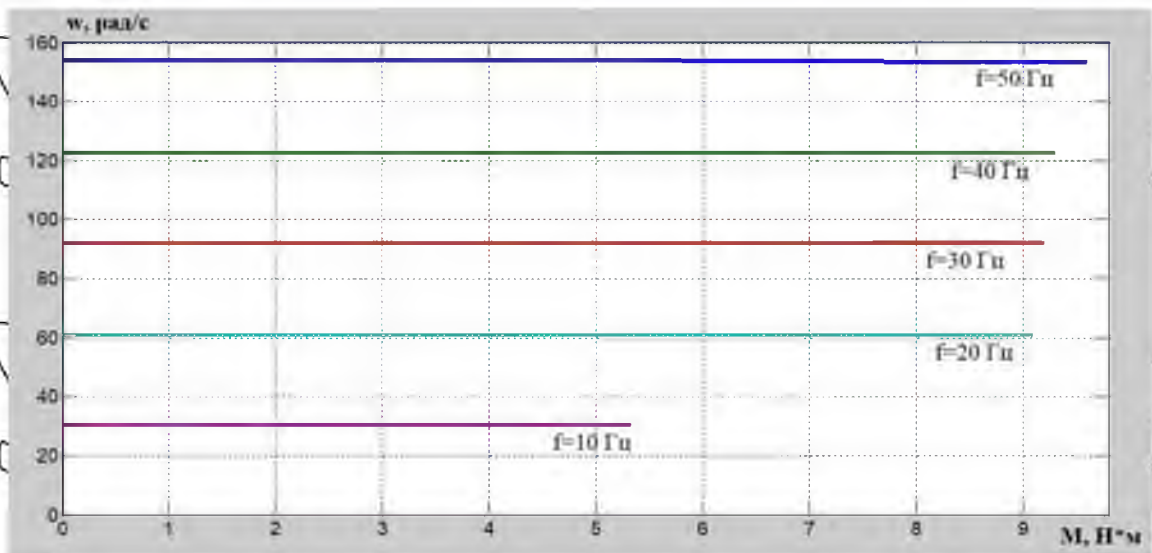
Таблиця 3.6 містить дані, що були зняті при виконанні попередньо описаної процедури.

Таблиця 3.6
Дані отримані при вимірюванні з 33 по швидкості

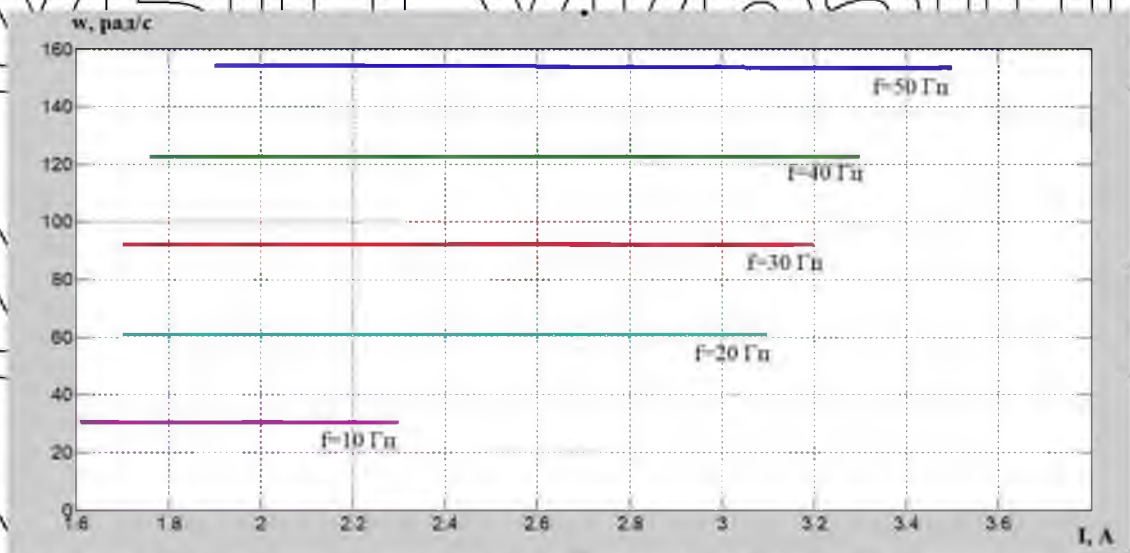
f, Гц	M_c , Н*м	I_2 , А	w, рад/с
50	0	1,9	153
	5,8	2,6	153
	9,6	3,5	153
40	0	1,76	122,5
	6,5	2,7	122,5
	9,3	3,3	122,5
30	0	1,7	92
	5,5	2,5	92
	9,2	3,2	92
20	0	1,7	61
	6,6	2,7	61
	9	3,1	61
10	0	1,6	30,3
	3,3	2	30,3
	5,35	2,3	30,3

За даними таблиці 3.6 будуються механічні та електромеханічні характеристики маюнок 3.9 та 3.10.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



Малюнок 3.9 - Механічні характеристики для частот різних по значенню при регулюванні з 33 за швидкістю



Малюнок 3.10 - Електромеханічні характеристики для частот різних по значенню при регулюванні з 33 за швидкістю

З вище розміщених рисунків можна зробити висновок, щодо незмінності частоти обертання двигуна навіть при умовах високого моменту на валу двигуна. Отримання даного результату стало можливим через використання зворотнього зв'язку з використанням енкодера, імпульси з якого подаються на ПЧ, на якому з використанням їх величини здійснюються розрахунки сигналів заданої напруги для підтримання необхідної швидкості. Порівняльний аналіз за модельними та на основі експериментальних характеристик викладено в розділі 3.4.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3.4. Моделювання електроприводу з векторним керуванням, з зворотнім зв'язком за швидкістю в пакеті Simulink. Порівняння векторного і скалярного керування.

3.4.1. Моделювання електроприводу з векторним керуванням

Узагальнене зображення моделі ПЧ-АД з векторним керуванням представлено Рис. 3.11.

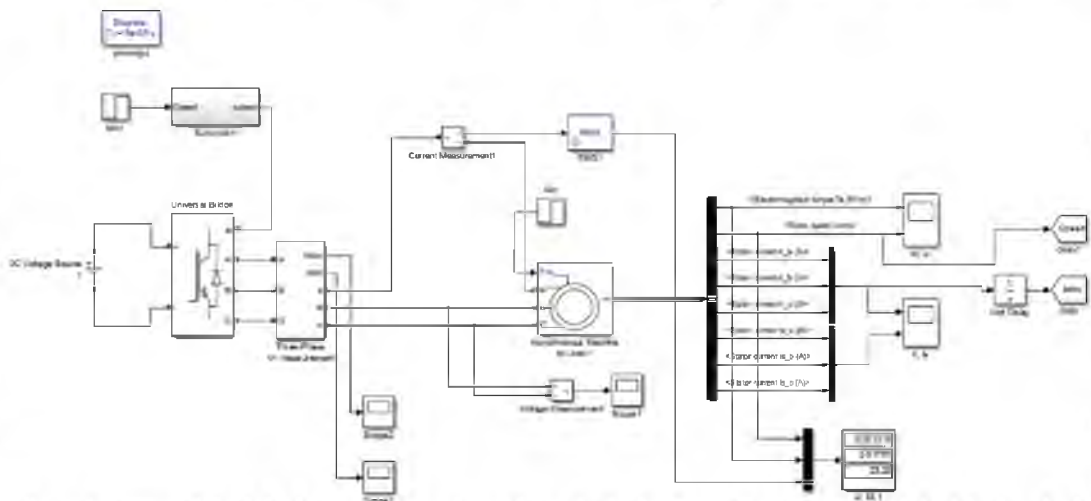


Рисунок 3.11 - Модель системи ПЧ-АД з векторним управлінням з ЗЗ за швидкістю Simulink

Необхідність виконання моделі з векторним управлінням з ЗЗ за параметром швидкості реалізують на основі попередньо виконаної моделі з U/f-const управлінням, Рис. 3.4. В попередньо згаданій моделі необхідно замінити PWM-Generator на підсистему (блок векторного керування) Рис. 3.12.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

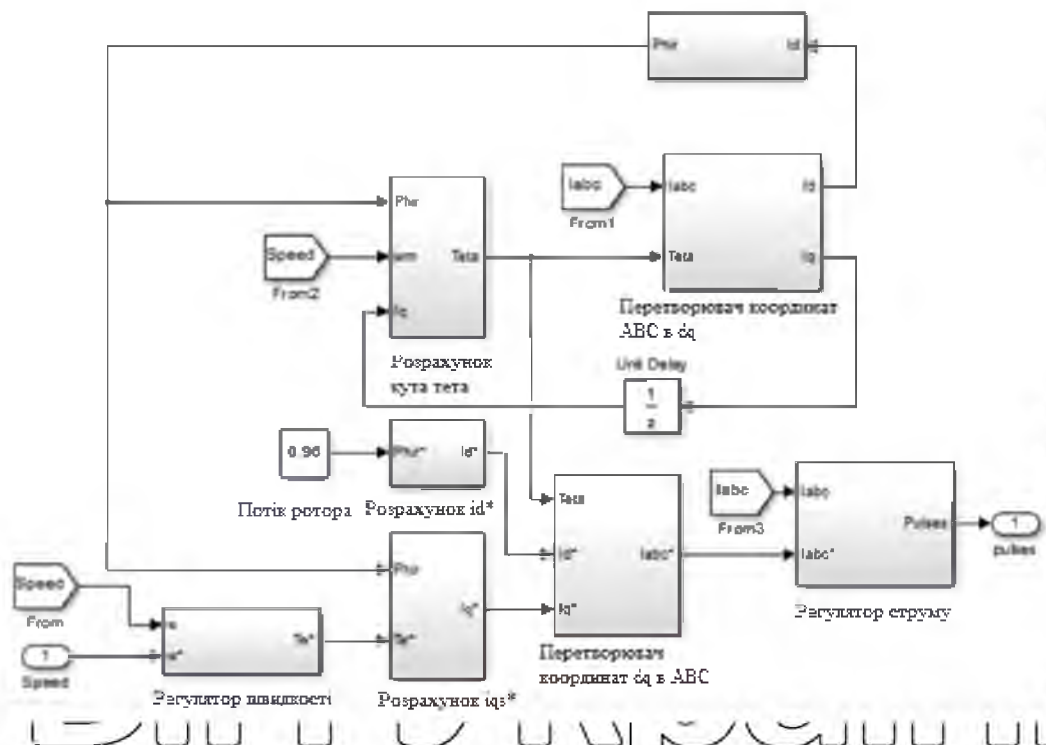


Рисунок 3.12 – Блок векторного управління

Виконання векторного блоку управління було передбачено виконувати за функціональною схемою малюнок 3.13.

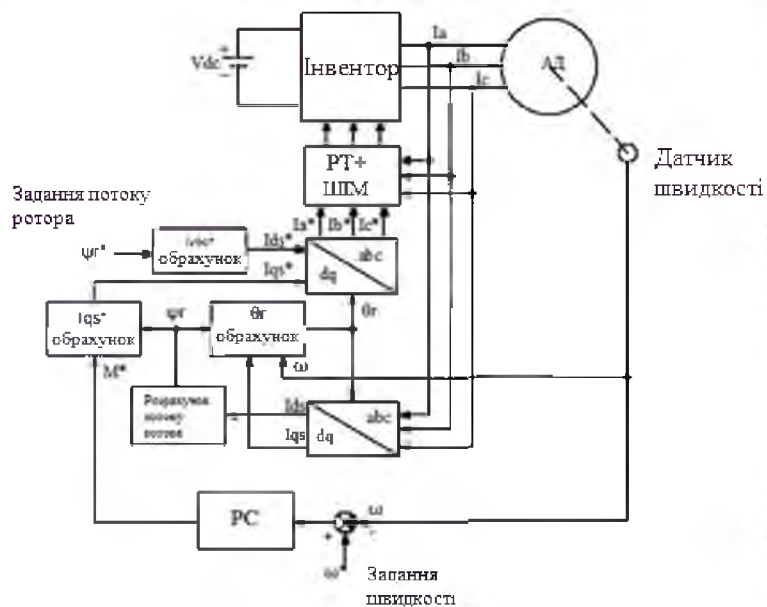


Рисунок 3.13 – Функціональна схема системи регулювання швидкості АД з прямою орієнтацією по полю

Блоки, що імітують певні реальні впливи в модельній формі і використовуються для складання векторного блоку управління, описані нижче.

					02.08 –МКР. 175 “С” 2021.02.21. 024 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

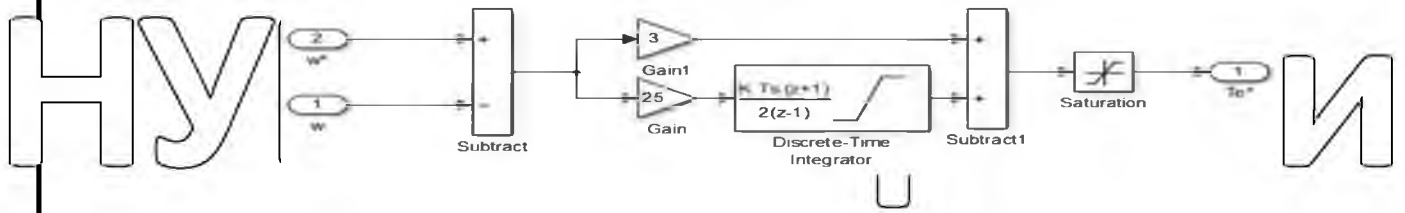


Рисунок 3.14 – Регулятор швидкості

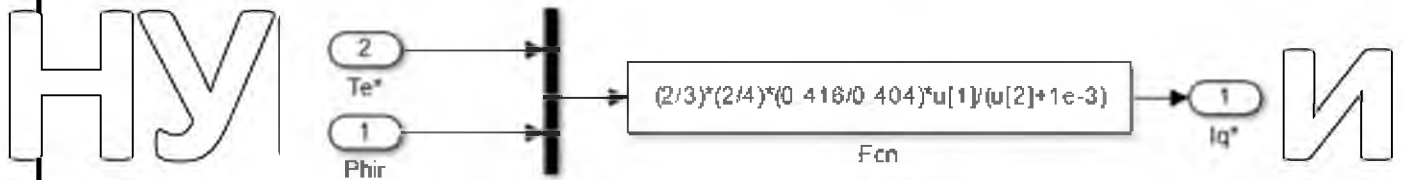


Рисунок 3.15 Розрахунок струму i_{qs}^*

Розрахунок проведено з використанням наступної формули:

$$i_{qs}^* = (2/3) \cdot (2/p) \cdot (L_r/L_m) \cdot (M/\psi_r) = (2/3) \cdot (2/4) \cdot (0.416/0.404) \cdot (M/\psi_r), \quad (3.12)$$

Де, $L_r = L_r' + L_m = 0.012 + 0.404 = 0.416$

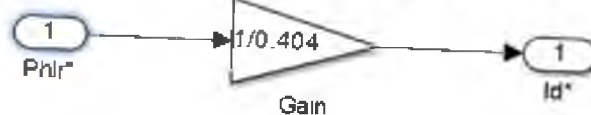


Рисунок 3.16 Розрахунок струму I_d^*

Розрахунок проведено з використанням наступної формули:

$$i_{d1}^* = (\psi_r' / L_m) = (\psi_r^* / 0.404) \quad (3.14)$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

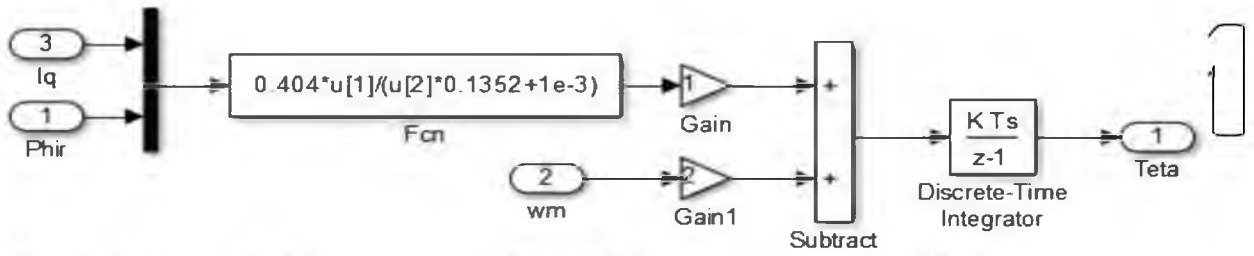


Рисунок 3.17 - Розрахунок кута положення θ

$$\theta = \int (\omega + \omega_{ск}) dt \quad (3.15)$$

де,

$$\omega = \frac{L_m \cdot i_{qs}^*}{\left(\frac{L_r}{R_r} \cdot \psi_r\right)} = \frac{0.404 \cdot i_{qs}^*}{\left(\frac{0.416}{3.075} \cdot \psi_r\right)} \quad (3.16)$$



Рисунок 3.18 Розрахунок потоку ψ_r

$$\psi_r = \left(L_m \cdot i_d / (1 + T_r)\right) = \left(0.404 \cdot i_d / (1 + 0.1352)\right) \quad (3.17)$$

де,

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} = 0.1352 \text{ c} \quad (3.16)$$

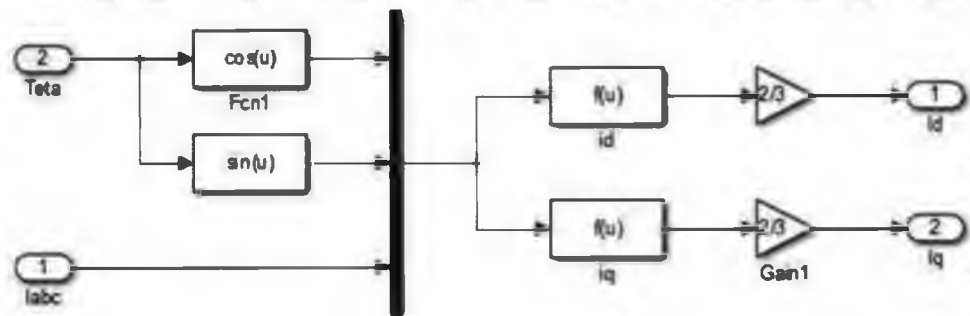


Рисунок 3.19 Перетворювач координат $ABC \rightarrow dq$

В параметрах блоку id необхідно записати вираз:

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

НУБІП України

$$u[1] \cdot u[3] + (1.7320508 \cdot u[2] - u[1]) \cdot u[4] \cdot 0.5 + (-u[1] - 1.7320508 \cdot u[2]) \cdot u[5] \cdot 0.5. \quad (3.18)$$

В блоці іа:

$$u[2] \cdot u[3] + (u[2] + 1.732050 \cdot u[1]) \cdot u[4] \cdot 0.5 + (-u[2] - 1.732050 \cdot u[2]) \cdot u[5] \cdot 0.5. \quad (3.19)$$

НУБІП України

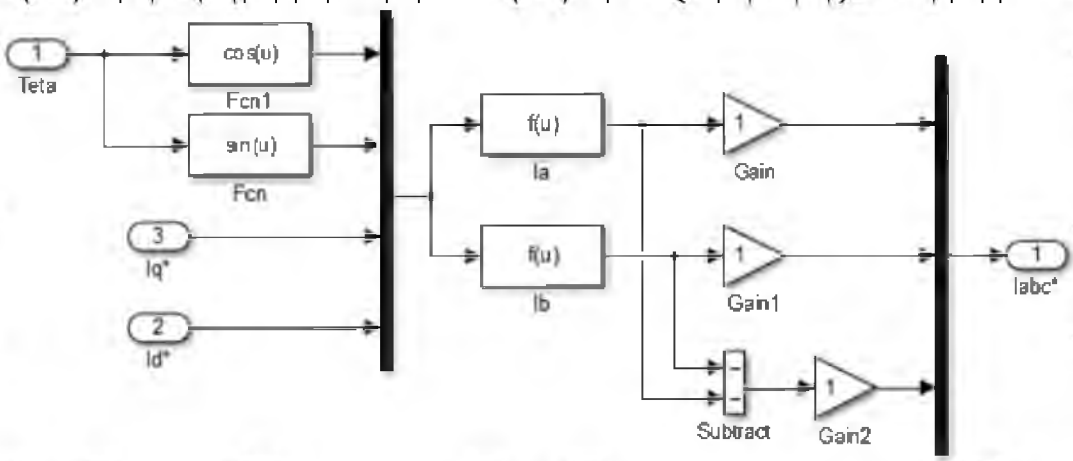


Рисунок 3.20 Перетворювач координат $dq \rightarrow ABC$

В блоці іа:

НУБІП України

$$-u[3] \cdot u[2] + u[4] \cdot u[1] \quad (3.20)$$

В блоці іб:

$$(-u[1] + 1.7320508 \cdot u[2]) \cdot u[4] \cdot 0.5 + (u[2] + 1.7320508 \cdot u[1]) \cdot u[3] \cdot 0.5 \quad (3.21)$$

НУБІП України

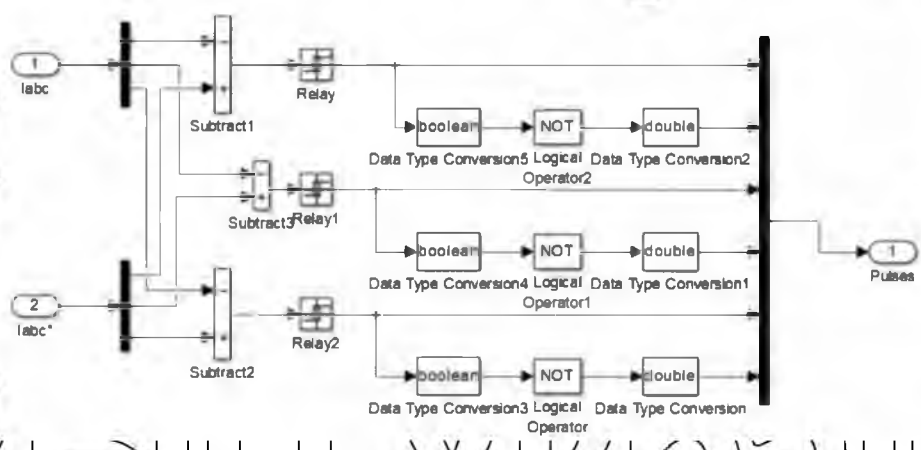


Рисунок 3.21 - Регулятор струму

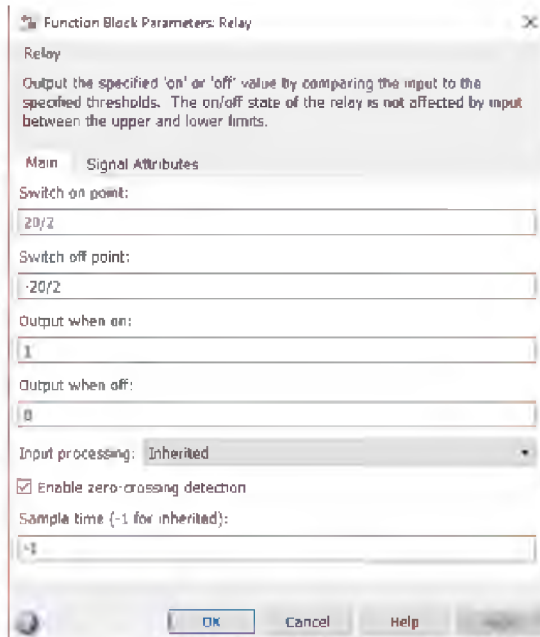


Рисунок 3.22 - Параметри блоку Relay

3.4.2. Порівняння результатів скалярного та векторного керування

Отримані дані в результаті моделювання виконано за допомогою графічних матеріалів, що відображають перехідні процеси при наборі швидкості та електромагнітного моменту за період часу, дані графічні метріали наведені нижче.

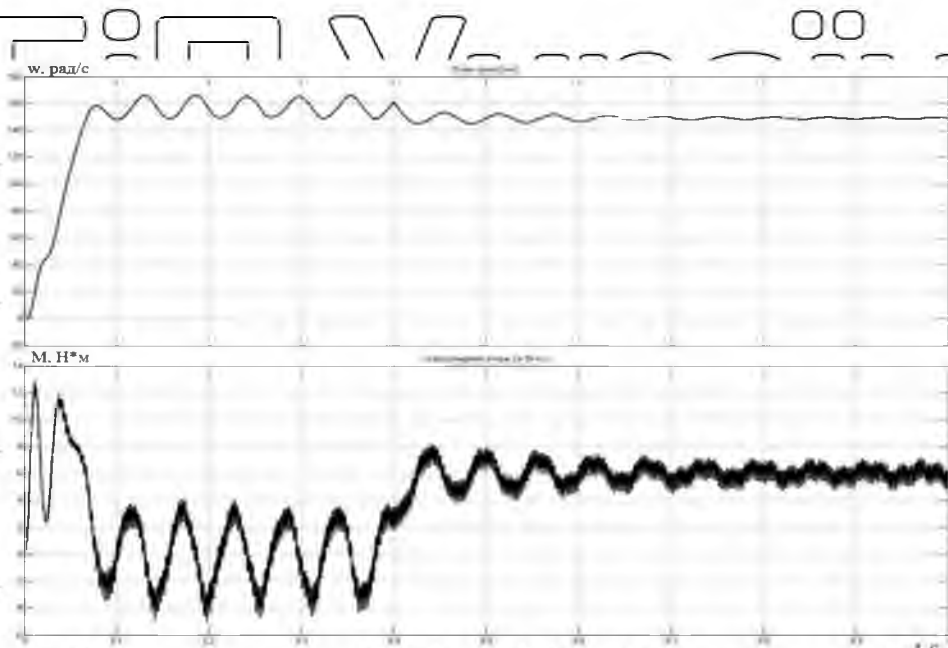


Рисунок 3.23 - Перехідні процеси швидкості та моменту для скалярного керування

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

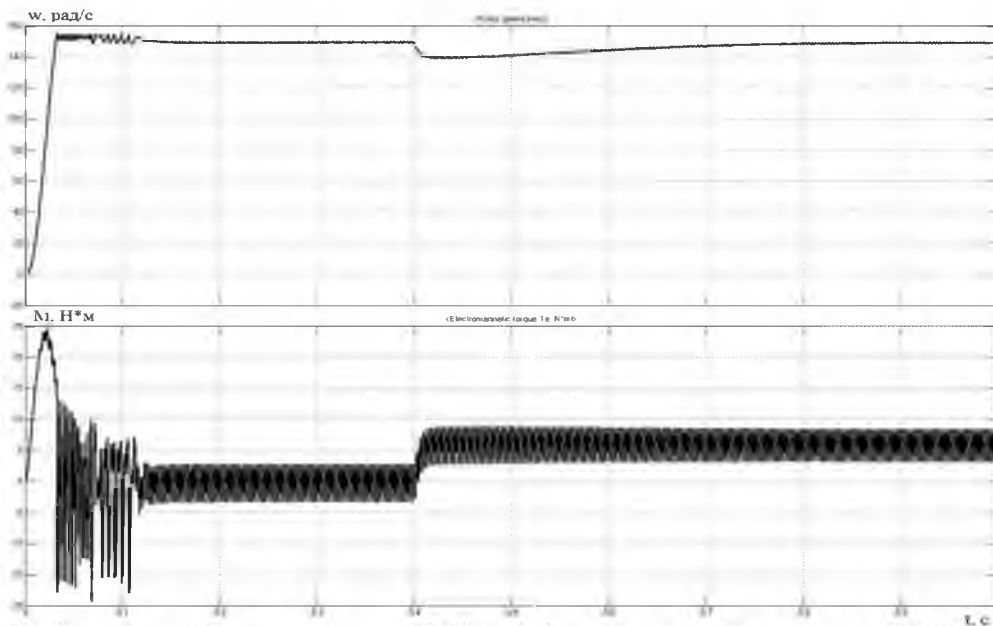


Рисунок 3.24 - Перехідні процеси швидкості та моменту для векторного керування

Рис. 3.23 та 3.24 відображають, що час перехідного процесу та

перерегулювання в чималих значення більший для скалярного керування, ніж

у випадку виконання керування векторним способом. Виконання за

векторним способом потребує 0.1 с. для перерегулювання, а в сесю чергу скалярний спосіб за цим параметром потребує 1 с. при вмикання

навантаження. Скалярне керування призводить до перерегулювання у 12%,

для векторного керування даний показник складає 3%, і даний результат

досягається з використанням ПІ-регулятора для швидкості. Наступний етап

навантаження при векторному керуванні із зворотним зв'язком при значенні в 0,4 с., не призводить до виникнення коливального процесу і швидко затухає

видаючи номінальну швидкість, щодо скалярного керування даний показник

значно гірше забезпечується, у випадку накидання навантаження можливе

спостереження за коливальним процесом, і також удар припадає на зниження швидкості на рівні 3%. Момент на валу, що збільшується з виконання

скалярного керування значною мірою понижає швидкість, по відмінності до

керування за векторного способу при якому навіть у випадку приближення

моменту до критичного швидкість не змінюється і замикається стабільною

(див. рисунок 3.9.)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ВИСНОВОК

Магістерська кваліфікаційна робота у відповідності до мети та завдань передбачала виконання ряду методологічних та аналітичних рішень.

Головними способами керування було обрано скалярний та векторний,

для виконання заданого було виконано демонстраційні експерименти з

зняттях характеристик для подальшого порівняння використовуючи, як

робочий пристрій перетворювач частоти - Micromaster 440. Проведено пуско-

налагоджувальні роботи пов'язані з облаштування експериментального

стенду, отримано механічні, електромеханічні та регульовальні

характеристики за посередництвом експериментального стенду. Розроблено

віртуальну повну імітаційну модель асинхронного електроприводу з

способами керування скалярним та векторним зі зворотним зв'язком по

швидкості в програмному середовищі Simulink. Виконані порівняльні

аналітичні висновки, проведених методів регулювання, на підставі яких

проведено розподіл на переваги та недоліки, вибраних способів регулювання

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. I. Oskoue, M. A., Awuah-Offei K. Statistical methods for evaluating the effect of operators on energy efficiency of mining machines // Mining Technology. 2014. Vol. 123, №. 4. P. 175–182.
2. <https://research-journal.org/technical/vliivanie-preobrazovatelya-chastoty-na-koefficient-poteznogo-deistviya-asinxronnogo-dvigatelya/>
3. Siemens AG. MICROMASTER 440/Руководство по эксплуатации – 2006 [Электронный ресурс]. Систем. требования:
Режим доступа:
https://www.siemens-pro.ru/docs/sinamics/mm/mm440/440_OPI_24294529_ru_1006.pdf
4. Дипломне проектування енергетичних та електротехнічних систем в агропромисловому комплексі : навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів / Іноземцев Г. Б., Козирський В. В., Лут М. Т., Радько І. П., Синявський О. Ю. – 2-е вид., перероб. і доп. – К., 2014. – 526 с.
5. Siemens AG. MICROMASTER 440/Список параметров . - 2006 [Электронный ресурс]. Систем. требования: - Режим доступа:
https://www.siemens-pro.ru/docs/sinamics/mm/mm440/440_PLi_23708204_ru_0106.pdf
6. Пахомов, А. Н. Переходные процессы в электромеханических системах : учебно-методическое пособие [Электронный ресурс]: для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» / сост. А. Н. Пахомов. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. - 54 с.
7. Виноградов, А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов - Иваново: ГСУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2008. - 298 с.
8. Качин, С. И. Электрический привод: учебно-методическое пособие / С. И. Качин, А. Ю. Чернышев, О. С. Качин.; Томский политехнический университет - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. - 157 с.
9. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems. / И. В. Черных. - М: ДМК Пресс; СПб.; Питер, 2008 - 288 с.
10. Аристов, Е. В., Р. А. Хузин. Исследование датчика скорости: методические указания к лабораторной работе по курсу «Элементы систем автоматики» / Е. В. Аристов, Р. А. Хузин. - Пермь: Изд-во Перм. Гос. Техн. Ун-та, 2007. - 14с.
11. Соколовский, Г. Р. Электроприводы переменного тока с частотным

- регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Б. Соколовский. - М.: Издательский центр «Академия», 2006. - 272 с.
12. Терехов, В.М. Системы управления электродвигателей: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Обилов, Под ред. В.М. Терехова. - М.: Издательский центр «Академия», 2005. - 304 с.
13. Ильинский, Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. М./ Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. - Москва: Издательский центр «Академия», 2008. - 208 с.
14. Дементьев, Ю. Н. Электрический привод: учебное пособие / Дементьев Ю. Н., Чернышев А. Ю., Чернышев И. А. - Томск: Изд-во ТПУ, 2010. - 232 с.
15. Simscape Power Systems Examples [Электронный ресурс] // MathWorks. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/physmod/%20sps/examples.html>.
16. Терехин, В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В. Б. Терехин. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. — 292 с.
17. Герман-Галкин, С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. / С. Г. Герман-Галкин — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. - 368 с.
18. Усольцев, А.А. Электрический привод: Учебное пособие // Усольцев А.А. - СПб.: НИУ ИТМО, 2012. - 238 с.
19. Калачев, Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика) / Ю. Н. Калачев - М.: ЭФО, 2013. - 63 с.
20. Ключев, В. И. Теория электропривода: учебник для вузов / В. И. Ключев - М.: Энергоатомиздат, 2001. - 704 с.: ил.
21. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: учеб. пособие / Г.С. Зиновьев - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. - 201 с.
22. Панасенков, М.А. Теория, методика расчета и экспериментальные исследования электромагнитных тормозов : Диссертация кандидата технических наук / М. А. Панасенков, Моск. энерг. ин-т (МЭИ) . - 1954 . - 75 с.
23. Лавріненко Ю.М., Синявський О.Ю., Савченко В.В., Марченко С.С., Войтюк Д.Г., Лисенко В.П. Електропривод: підручник, Київ, 2009. 504 с.
24. Синявський О.Ю., Савченко В.В., Лавріненко Ю.М. Методичні вказівки щодо виконання курсової роботи з дисциплін «Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній», «Електропривод виробничих машин і агрегатів», Київ, 2010 р.
25. Попович М.Г., д.т.н., проф., Кіселичник О.І., к.т.н., доц., Бур'ян С.О., Бабаскін К.Г. Адаптивні електромеханічні системи автоматичного керування наосними установками з векторно-керуваними асинхронними двигунами, Київ, 2008 р.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата