

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ КОЛЕКТОРНОГО ДВИГУНА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЙОГО РОБОТИ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-Е23мг-1
Спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/Вячеслав СТАРОКОЖКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/Олег ЛИТВИН
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

К.Т.Н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти

здобувачу вищої освіти Вячеславу СТАРОКОЖКУ

1. Тема «Розробка та дослідження системи стабілізації швидкості обертання колекторного двигуна для підвищення ефективності його роботи»
затверджена наказом по університету № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Номінальна потужність, напруга і струм колекторного двигуна, параметри роботи двигуна, умови експлуатації двигуна, тип конструкції колекторного двигуна.

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОПИС РОЗРОБКИ; РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯТОРА НА БАЗІ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ; РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОЛЕКТОРНИМ ДВИГУНОМ; ВИСНОВКИ

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):
Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2024 р.

Керівник

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Вячеслав СТАРОКОЖКО

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	12.10.24 – 15.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	16.10.24 – 23.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	24.10.24 – 01.11.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	02.11.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Вячеслав СТАРОКОЖКО

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

ВІДГУК
на кваліфікаційну роботу магістра
ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В. Н.
КАРАЗІНА

Навчально-науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра: Електротехніки та електроенергетики

Вячеслава СТАРОКОЖКА

Тема: «РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ
ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ КОЛЕКТОРНОГО ДВИГУНА ДЛЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЙОГО РОБОТИ»

Магістерська робота здобувача вищої освіти Вячеслава Старокожка присвячена важливій та актуальній темі розробки і дослідження системи стабілізації швидкості обертання колекторного двигуна. У сучасних умовах підвищення ефективності роботи електродвигунів є ключовим завданням для багатьох галузей промисловості. Робота студента робить значний внесок у цю галузь, пропонуючи нові підходи до стабілізації швидкості обертання колекторних двигунів.

Автор продемонстрував високу наукову новизну та оригінальність у підході до вирішення поставленої задачі. Робота містить детальний аналіз існуючих методів стабілізації швидкості обертання та пропонує вдосконалені алгоритми, що дозволяють підвищити точність і стабільність роботи двигуна.

Автором проведено детальний аналіз отриманих даних, виявлено основні чинники, що впливають на стабільність швидкості обертання, та запропоновано практичні рекомендації щодо їх вдосконалення. Висновки роботи обґрунтовані та мають значну практичну цінність для подальшого застосування.

Робота має чітку і логічну структуру, що сприяє легкому сприйняттю матеріалу. Автор дотримувався всіх вимог щодо оформлення наукових робіт, що свідчить про його уважність та відповідальність.

Магістерська робота здобувача вищої освіти Вячеслава Старокожка є високоякісною науковою працею. Робота заслуговує на високу оцінку і може бути рекомендована до захисту з відмінною оцінкою.

Керівник кваліфікаційної роботи
(дипломної роботи/дипломного проєкту)

Доц. каф. ЕТ і ЕЕ, доц., к. пед. н _____

(посада, вчені звання, ступінь)

Юлія ОЛІЙНИК

(підпис)

(ім'я, прізвище)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОПИС РОЗРОБКИ

1.1. Колекторний електродвигун постійного струму

1.2. Системи адаптивного керування

1.3. Структура штучної нейронної мережі регулятора

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯТОРА НА БАЗІ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

2.1. Загальні відомості

2.2. Створення ефективного регулятора двигуна за допомогою нейронної мережі

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОЛЕКТОРНИМ ДВИГУНОМ

3.1. Структура колекторного двигуна

3.2. Електричні та механічні моделі

3.3. Побудова математичної моделі системи управління

3.4. Моделювання в середовищі MATLAB/Simulink

3.4.1. Розробка системи управління

3.4.2. Аналіз динамічних характеристик

3.5. Моделювання систем управління колекторними двигунами: інтеграція та оптимізація

3.6. Порівняння систем керування колекторним двигуном постійного струму з постійними магнітами

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕЕ – електрична енергія

ЛЕП – лінії електропередавання

ПЛЕП - -повітряні лінії електропередавання

ЯЕЕ – якість електричної енергії

Т – силовий трансформатор

ТС – трансформатор струму

ТН – трансформатор напруги

ККД – коефіцієнт корисної дії

ПІ - пропорційно-інтегральний регулятор

ПІД - пропорційно-інтегрально-диференційний

АСУ - автоматизованої системи управління

ШНМ - штучна нейронна мережа

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи на тему

«Розробка та дослідження системи стабілізації швидкості обертання колекторного двигуна для підвищення ефективності його роботи»

СТАРОКОЖКА ВЯЧЕСЛАВА

Магістерська робота виконана на ____ сторінок, містить ____ таблиць, ____ рисунків, що характеризують результати дослідження, використано літературних джерел.

Колекторні двигуни постійного струму широко використовуються в різних галузях завдяки своїм високим характеристикам крутного моменту, простоті управління та надійності. Однак стабільність швидкості обертання таких двигунів значною мірою залежить від зовнішніх факторів, зокрема зміни навантаження, коливань напруги живлення та температурних впливів. Це зумовлює необхідність у системі стабілізації швидкості обертання, яка могла б забезпечити стабільну роботу двигуна та підвищити його енергоефективність.

Метою цієї роботи є розробка та дослідження системи стабілізації швидкості обертання колекторного двигуна постійного струму для покращення його динамічних та енергетичних характеристик. Основна увага приділяється вибору та налаштуванню регулятора, здатного підтримувати стабільну швидкість обертання при змінних умовах експлуатації. Для цього було розглянуто сучасні методи регулювання, зокрема ПД-регулювання, адаптивні алгоритми та нейромережеві підходи.

В процесі дослідження було побудовано математичну модель системи стабілізації та проведено моделювання в середовищі MATLAB/Simulink. Це дозволило детально проаналізувати перехідні процеси, оцінити динамічні характеристики системи та дослідити ефективність різних методів регулювання. Порівняльний аналіз показав, що використання адаптивних і

нейромережових підходів дає змогу підвищити стабільність швидкості обертання та зменшити вплив зовнішніх збурень, забезпечуючи енергоефективну роботу двигуна.

КОЛЕКТРОНИЙ ДВИГУН, ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ, КОЕФІЦІЄНТ
КОРИСНОЇ ДІЇ, ШВИДКІСТЬ ОБЕРТАННЯ, НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ, MATLAB
SIMULINK

ABSTRACT

to a master's thesis on

**«Development and research of a system for stabilizing the speed of rotation of
a collector motor to improve its efficiency»**

STAROKOZHKO VIACHESLAV

The master's work is executed on ____ pages, contains ____ tables, ____ drawings, which characterize the results of research, additions, used literary sources.

DC collector motors are widely used in various industries due to their high torque characteristics, ease of control and reliability. However, the stability of the speed of rotation of such motors largely depends on external factors, in particular changes in load, fluctuations in supply voltage and temperature effects.

This necessitates a system for stabilizing the speed of rotation, which could ensure stable operation of the engine and increase its energy efficiency.

The purpose of this work is to develop and study a system for stabilizing the rotation speed of a DC collector motor to improve its dynamic and energy characteristics.

The focus is on selecting and configuring a regulator capable of maintaining a stable rotation speed under variable operating conditions. For this purpose, modern methods of regulation were considered, in particular PID regulation, adaptive algorithms and neural network approaches.

During the study, a mathematical model of the stabilization system was built and modeling was carried out in the MATLAB/Simulink environment.

This made it possible to analyze in detail the transients, evaluate the dynamic characteristics of the system and investigate the effectiveness of various control methods.

Comparative analysis showed that the use of adaptive and neural network approaches allows to increase the stability of the rotation speed and reduce the impact of external disturbances, ensuring energy-efficient operation of the engine.

COLLECTOR MOTOR, EFFICIENCY, EFFICIENCY, SPEED, NEURAL NETWORKS, MATLAB SIMULINK

ВСТУП

Актуальність.

Колекторні двигуни постійного струму широко використовуються у промисловості, транспорті, побутових та інших сферах завдяки їх надійності, простоті управління та високому крутному моменту на низьких обертах. Проте стабільність швидкості обертання такого двигуна суттєво залежить від зовнішніх умов, як-от навантаження, коливання напруги живлення та температурні зміни. Через це виникає потреба в системі стабілізації швидкості обертання, яка б могла адаптуватися до змінних умов роботи, мінімізуючи коливання швидкості та забезпечуючи високу ефективність роботи двигуна.

Метою цієї роботи є розробка та дослідження системи стабілізації швидкості обертання колекторного двигуна, яка дозволить покращити його динамічні та енергетичні характеристики. Основна увага приділяється вибору та налаштуванню регулятора, здатного підтримувати стабільну швидкість обертання при змінному навантаженні та умовах експлуатації. Сучасні підходи до управління, такі як ПІД-регулювання, адаптивні та нейронні мережі, відкривають можливості для розробки гнучких і високоточних систем стабілізації.

Колекторні двигуни широко використовуються в різних галузях промисловості завдяки своїй простоті та надійності. Проте їхня ефективність значною мірою залежить від стабільності швидкості обертання. Будь-які коливання можуть спричинити зниження продуктивності або навіть пошкодження обладнання. Розробка системи стабілізації швидкості має за мету забезпечити постійну і стабільну роботу двигуна, що дозволяє зменшити знос механічних компонентів, знизити енергоспоживання та підвищити загальну ефективність роботи пристрою. У дослідженнях будуть використовуватися передові методи аналізу та моделювання, щоб визначити найкращі рішення для стабілізації та оптимізації роботи колекторного двигуна.

Колекторні двигуни також знаходять застосування в різних аспектах енергетики, де вони використовуються для виконання низки важливих завдань. Вони можуть служити джерелом живлення для електроінструментів, вентиляційних систем, насосів та інших механізмів, які використовуються в енергетичних установках. Завдяки своїй надійності та здатності працювати з високими швидкостями, ці двигуни сприяють ефективній роботі різноманітних систем і процесів. Їхня універсальність та можливість точної регуляції швидкості роблять їх незамінними у багатьох галузях енергетики.

У високопродуктивних приводах, таких як роботи та пристрої керування накопичувачами, керування двигуна постійного струму вимагає особливої уваги, тому що він повинен відповідати критеріям швидкого реагування, швидкого відновлення швидкості після зміни навантаження, точного відстеження траєкторії та нечутливості до змін параметрів. Традиційні конструкції для надійного контролю, часто пов'язані з регуляторами постійного посилення, такими як пропорційно-інтегральний (ПІ) або пропорційно-інтегрально-диференціюючий (ПІД) можуть стабілізувати лінійні системи з невеликим діапазоном змін системних параметрів. Більш того, ці типи систем потребують точних математичних моделей для опису динаміки системи з метою правильного налаштування та розробки контролера.

Часто їх досить складно отримати практично. Крім того, більшість Методи адаптивного управління для нелінійних систем часто пов'язані з лінеаризацією моделі та застосуванням теорій лінійного управління. Це призводить до значних помилок через лінеаризацію нелінійної моделі.

В режимі реального часу впровадження таких систем часто буває важким, а іноді і нездійсненним у зв'язку з використанням великої кількості параметрів у цих схемах.

В роботі було досліджено колекторний двигун постійного струму із постійними магнітами.

В процесі дослідження буде проаналізовано моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink, що дозволить детально вивчити перехідні процеси, проаналізувати динамічні характеристики системи та оцінити ефективність різних методів регулювання. Результати досліджень сприятимуть підвищенню надійності та енергоефективності колекторних двигунів, що є особливо актуальним у контексті зростаючого попиту на енергоощадні технології.

Об'єкт дослідження - система управління колекторним двигуном постійного струму, зокрема процес стабілізації швидкості його обертання під впливом змінних навантажень та зовнішніх збурень.

Предмет дослідження - методи та алгоритми стабілізації швидкості обертання колекторного двигуна для підвищення його енергоефективності та точності роботи, зокрема застосування регуляторів (ПІД-регулятори, адаптивні та нейромережеві підходи) в системі управління двигуном.

Завдання дослідження:

- ✓ Провести аналіз існуючих методів стабілізації швидкості обертання колекторних двигунів та вибрати найбільш ефективні для досліджуваної системи.
- ✓ Розробити математичну модель системи стабілізації швидкості обертання колекторного двигуна.
- ✓ Реалізувати моделювання системи управління в середовищі MATLAB/Simulink та провести аналіз динамічних характеристик.
- ✓ Оцінити ефективність різних методів регулювання (ПІД-регулювання, адаптивні методи, нейромережі) у забезпеченні стабільної швидкості обертання при змінних навантаженнях.
- ✓ Визначити оптимальні параметри регулятора для забезпечення надійної та енергоефективної роботи двигуна.

Магістерська кваліфікаційна робота на тему «Розробка та дослідження системи стабілізації швидкості обертання колекторного двигуна для

підвищення ефективності його роботи» складається з таких частин: перелік умовних позначень, вступ, три розділи, висновки, список посилань.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОПИС РОЗРОБКИ

1.1. Колекторний електродвигун постійного струму

Колекторний електродвигун постійного струму - обертова електрична машина постійного струму, що перетворює електричну енергію постійного струму в механічну енергію, у якої хоча б одна з обмоток, що у основному процесі перетворення енергії, з'єднана з колектором.

Конструкція колекторного електродвигуна постійного струму

Колекторні двигуни постійного струму часто застосовуються в промисловості завдяки своїй простоті, доступності та надійності. Ефективність таких двигунів є ключовим фактором, який визначає їх енергоспоживання та продуктивність. У цій статті розглядаються основні аспекти ефективності колекторних двигунів постійного струму, включаючи чинники, які на неї впливають, методи вимірювання та способи підвищення для різних застосувань.

Ефективність колекторних двигунів постійного струму:

Ефективність або коефіцієнт корисної дії (ККД) визначається як відношення вихідної потужності до вхідної. Для колекторного двигуна вихідна потужність означає механічну роботу, яку виконує двигун, тоді як вхідна — це електрична енергія, яку він споживає. ККД вимірюється у відсотках і зазвичай варіюється в межах від 0 до 100%.

Фактори, що впливають на ефективність:

✓ Втрати міді: Виникають через опір у обмотках двигуна, що призводить до нагрівання та зниження ККД. Використання матеріалів з низьким опором допомагає мінімізувати втрати.

✓ Втрати в осерді: Також відомі як втрати в залізі, вони виникають через гістерезис та вихрові струми в магнітному осерді. Високоякісні магнітні матеріали та зменшення розміру осердя знижують ці втрати.

✓ Втрати через тертя та опір повітря: Викликані рухом компонентів двигуна. Оптимізація конструкції двигуна та належне мастило допомагають їх зменшити.

✓ Електричні втрати: Охоплюють втрати через опір щіток і контактів. Вибір високоякісних матеріалів для щіток та оптимізація контакту з комутатором допомагають знизити ці втрати.

Методи вимірювання ефективності:

✓ Прямий метод: Передбачає вимірювання вхідної потужності електровимірювальним приладом та вихідної потужності за допомогою динамометра. Ефективність розраховується як співвідношення цих величин.

✓ Непрямий метод: Потребує вимірювання втрат (у міді, залізі, через тертя тощо) для подальшого їх віднімання від вхідної потужності та обчислення вихідної потужності.

✓ Важливість підвищення ефективності:

✓ Енергозбереження: Зменшене енергоспоживання знижує витрати на електроенергію, особливо у випадках тривалої роботи двигуна.

✓ Строк служби батареї: Вища ефективність продовжує термін служби батареї в пристроях на батарейному живленні.

✓ Екологічна вигода: Зниження споживання енергії зменшує викиди парникових газів.

✓ Зменшене розсіювання тепла: Більш ефективний двигун виділяє менше тепла, що спрощує його конструкцію, зменшуючи потребу в додатковому охолодженні.

Методи підвищення ефективності:

✓ Вдосконалені магнітні матеріали: Матеріали з високою магнітною проникністю допомагають зменшити втрати в осерді.

✓ Оптимізація конструкції двигуна: Передові технології конструювання підвищують ефективність роботи двигуна.

✓ Колекторні двигуни постійного струму залишаються затребуваними завдяки надійності та можливостям підвищення їх ефективності.

1.2. Системи адаптивного керування

З початком розробки систем автоматичного керування виникла потреба визначення оптимальної структури регулятора та його параметрів для певного процесу. Основна складність полягала у налаштуванні контролера таким чином, щоб він забезпечував ефективне керування в усьому діапазоні робочих точок, а не лише в конкретній точці. Для подолання цих труднощів на початку 1940-х років були створені адаптивні контролери. У період між 1960 та 1990 роками було розроблено багато фундаментальних положень теорії керування, таких як теорія стійкості та методи в просторі станів, що довели свою ефективність.

Адаптивні регулятори вирізняються здатністю збирати інформацію про параметри процесу безпосередньо під час його керування, а також змінювати закони керування на основі цієї інформації. Більшість адаптивних контролерів поділяють на два основні типи: адаптивні контролери з прямим зв'язком і контролери зі зворотним зв'язком.

Адаптивні регулятори з прямим зв'язком

Адаптивні регулятори з прямим зв'язком для колекторних двигунів постійного струму здатні підтримувати оптимальний режим роботи, навіть коли навантаження на двигун змінюється. Це особливо важливо для додатків, де потрібна стабільна швидкість обертання або точне управління моментом. Зазвичай такі регулятори використовують датчики для безперервного моніторингу параметрів двигуна, а дані з них дозволяють регулятору вносити коригування в режим роботи двигуна в реальному часі, не залежачи від фіксованої моделі поведінки.

Цей підхід, що включає безпосереднє управління струмом якоря та напругою збудження, дозволяє уникати стрибків і втрат потужності при зміні

навантаження. Важливою перевагою адаптивних регуляторів є їх здатність забезпечувати надійність і робастність системи керування в умовах зовнішніх збурень та зміни навантаження, що підвищує загальну ефективність електроприводу на базі колекторного двигуна.

[16-17].

Ці системи базуються на зміні властивостей органу управління можуть впливати на процес управління. Реалізація такої адаптивної системи з прямим зв'язком представлено на рисунку 1.1.

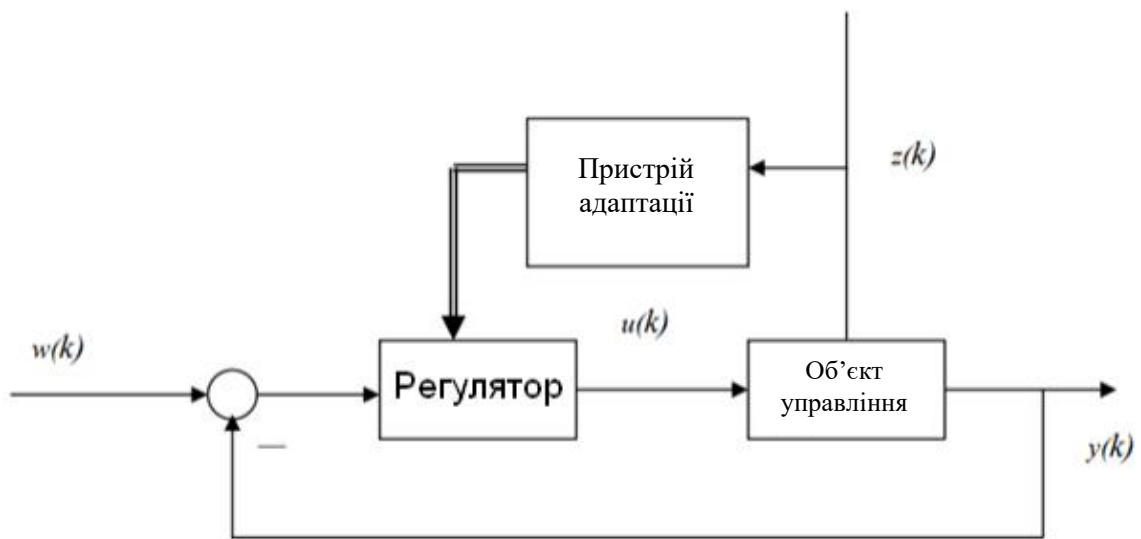


Рисунок 1.1. – Адаптивний регулятор з прямими зв'язком

Основною ознакою сучасного рівня автоматизації є управління об'єктом в умовах апіорної невизначеності. Для прямого адаптивного управління характерними є багатовимірність, багатозв'язковість, нелінійність та нестационарність. Проте невизначеність є серйозною проблемою, оскільки нестача інформації, необхідної для формування керуючого впливу, ускладнює виконання завдання.

Ще одна особливість такого регулятора полягає у відсутності зворотного зв'язку з «внутрішніми» замкнутими сигналами для адаптації параметрів контролера. На рисунку 1.1 показано, як вхідне збурення $z(k)$ вимірюється, а

адаптивний механізм налаштовує параметри контролера, щоб зберегти високий рівень продуктивності.

Перевагою адаптивних контролерів із прямим зв'язком є швидка реакція на зміни в об'єкті управління завдяки використанню сигналів з входу збурення та виходу об'єкта керування.

Цей тип управління має і недоліки, серед яких: ігнорування змін, що виникають через не вимірювані сигнали або перешкоди. Це може призвести до непередбачуваних змін у поведінці об'єкта управління та сповільнення процесів і корекції параметрів.

Адаптивні регулятори із зворотним зв'язком

Адаптивні регулятори із зворотним зв'язком застосовуються у випадках, коли зміни в поведінці процесу неможливо визначити лише за вимірюванням зовнішніх сигналів. Основну структуру такого регулятора наведено на рисунку 1.2. Ці регулятори мають три ключові особливості:

- ✓ Зміну характеристик процесу або його сигналів можна виявити шляхом вимірювання сигналів у внутрішньому контурі керування.
- ✓ До основного зворотного зв'язку контуру додається механізм адаптації, що забезпечує додатковий рівень зворотного зв'язку.
- ✓ Замкнутий контур сигналів формує другий рівень нелінійного зворотного зв'язку.

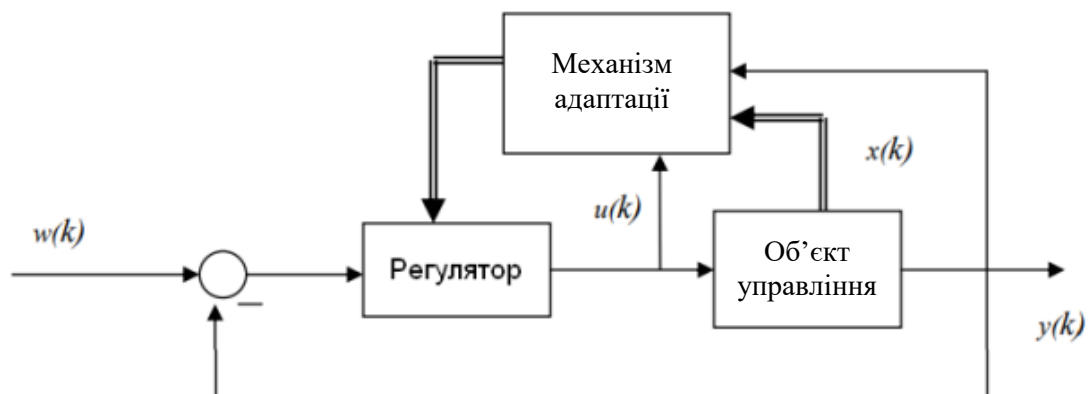


Рисунок 1.2. - Адаптивний регулятор із зворотним зв'язком

Цифрові сервоконтролери

Крім регулятора, заснованого на штучній нейронній мережі, ще необхідно приділити увагу двом типам звичайних контролерів з зворотним зв'язком. Один із них – пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор, а інший – пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор.

Обидва ці регулятори використовуються для порівняння з контролером на основі штучної нейронної мережі.

Пропорційно-інтегральний регулятор

Ідеалізоване рівняння пропорційно-інтегрального контролера

$$u(t) = K \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (1.1)$$

де K – коефіцієнт посилення,

T_i – час інтегрування,

$e(t)$ – помилка зворотний зв'язок;

тобто $e(t) = r(t) - y(t)$, де $r(t)$ та $y(t)$ є сигналом входу та виходу установки відповідно.

Еквівалентна передатна функція в s -домені задається наступним чином:

$$U(s) = \left[K \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \right] \cdot E(s) \quad (1.2.)$$

Для цифрового керування рівняння 1.2 перетворюється на дискретний тимчасовий еквівалент(z -домен), що обчислюється як:

$$U(z) = \left[K_p + \frac{K_1}{1-z^{-1}} \right] \cdot E(z) \quad (1.3)$$

або в термінах швидкості:

$$U(z) = -K_p \cdot Y(z) + K_I \cdot \frac{E(z)}{1-z^{-1}} \quad (1.4)$$

$$\text{де } K_p = K - \frac{K \cdot T}{2 \cdot T_i} \quad (1.5.)$$

$$K_I = \frac{K \cdot T_s}{T_i} \quad (1.6)$$

T_s – інтервал дискредитації.

Пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор

Ідеалізоване рівняння пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) регулятора має вигляд

$$u(t) = K \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1.7)$$

Еквівалентна передатна функція в s -домені задається наступним чином:

$$U(s) = \left[K \cdot \left(\frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \right] \cdot E(s) \quad (1.8)$$

Для цифрового управління рівняння (1.8) перетворюється в його дискретно-часовий (z -домений) еквівалент, який задано наступним чином:

$$U(z) = \left[K_p + \frac{K_I}{1-z^{-1}} + K_p \cdot (1-z^{-1}) \right] \cdot E(z) \quad (1.9)$$

або в термінах швидкості:

$$U(z) = -K_p \cdot Y(z) + K_I \cdot \frac{E(z)}{1-z^{-1}} - K_p \cdot (1-z^{-1}) \cdot Y(z) \quad (1.10)$$

$$\text{де } K_I = K - \frac{K \cdot T_s}{2 \cdot T_i} \quad (1.11)$$

$$K_I = \frac{K \cdot T_s}{2 \cdot T_i} \quad (1.12)$$

$$K_p = \frac{K \cdot T_d}{T_i} \quad (1.13)$$

Вибір типу регулятора або закону керування для конкретного об'єкта є важливим завданням, на яке впливають кілька факторів. Серед них – тип передавальної функції об'єкта, а також наявність запізнення. Якщо об'єкт має запізнення, важливе значення має співвідношення загального запізнення до часу T_0 (для статичного об'єкта) або до T (для астатичного об'єкта). Вибір регулятора також визначається вимогами до якості роботи автоматизованої системи управління (АСУ), що проектується.

Існують різні діаграми та емпіричні формули, які допомагають визначити оптимальний тип регулятора і налаштування його параметрів на основі передавальної функції об'єкта.

Адаптивний контролер зі штучними нейронними мережами

Людське мислення має як логічні, так і інтуїтивні або суб'єктивні сторони. Логічна сторона була розроблена та використана, у результаті з'явилися сучасні передові комп'ютери. Однак з'ясувалося, що жорсткі обчислення власними силами не можуть дати рішення для реальних, дуже складних та нелінійних систем. Для того, щоб впоратися з цією труднощами, було використано інтуїтивне та суб'єктивне мислення людського розуму, що призвело до 'м'яких' обчислень, що включають нейронні мережі.

Нещодавно розроблені програми у різних галузях довели, що чудові результати можна отримати за допомогою штучних нейронних мереж. Штучна нейронна мережа забезпечує нелінійне відображення між входами та виходами системи електроприводу, без знання заздалегідь заданої моделі. Тому використання штучної нейронної мережі в адаптивному управлінні може зробити системи надійними та ефективними.

Рівняння руху системи колекторного приводу постійного струму

Хоча у разі використання ІНС у схемі керування двигуном немає

Необхідність отримання моделі двигуна, важливо зробити це з аналітичної точки зору, щоб закласти основу структури штучної нейронної мережі для порівняння з ідеальною лінійною системою.

Рівняння руху колекторного двигуна з постійними магнітами описується такими формулами:

$$v_a = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (1.14)$$

$$e_b(t) = K_E \cdot \omega_r(t) \quad (1.15)$$

$$T_e(t) = K_T \cdot i_a(t) \quad (1.16)$$

$$T_e(t) = J \cdot \frac{d\omega_r(t)}{dt} + B \cdot \omega_r(t) + T_l(t) + T_F \quad (1.17)$$

де v_a - напруга на клеммах двигуна,

$e_b(t)$ - проти-ЕРС,

$i_a(t)$ - струм якоря,

$\omega_r(t)$ - швидкість обертання двигуна,

Крутний момент $T_l(t)$ може бути виражений як:

$$T_l(t) = \Psi(\omega_r(t)) \quad (1.18)$$

$\Psi(\omega_r(t))$ де функція залежить від характеру навантаження.

Передбачається, що точне функціональне вираз $\Psi(\omega_r(t))$ передбачається невідомим.

Для отримання навчальних даних для штучної нейронної мережі та застосування алгоритмів керування потрібна дискретна тимчасова модель двигуна постійного струму. Припустимо, що момент, що навантажує $T(t)$ рівняння (1.18) нелінійний і має форму:

$$T_l(t) = v \cdot \omega_r^2(t) \cdot [\text{sign}\{\omega_r(t)\}] \quad (1.19)$$

де v є константою, що використовується для моделювання нелінійного механічного навантаження. Хоча навантаження, виражена в (1.19), передбачається як тип вентилятора або пропелера для цілей моделювання, в

реальному житті вона невизначена і має невідомі нелінійні механічні характеристики. Для полегшення завдання керування система приводу двигуна постійного струму на постійних магнітах може бути виражена як система з одним входом і одним виходом (1.14 - 1.17), що дає класифікувати регулятори за регульованим законом регулювання.

Штучна нейронна мережа (ШНМ) у складі регулятора зазвичай має кількшарову структуру, що забезпечує ефективне керування складними об'єктами за рахунок наближення нелінійних залежностей.

1.3. Структура штучної нейронної мережі регулятора

Основні елементи структури ШНМ для регулятора включають:

- ✓ Вхідний шар: отримує сигнали від об'єкта керування, які можуть включати значення помилки, похідної помилки, вхідних і вихідних параметрів об'єкта тощо. Кількість нейронів у цьому шарі відповідає числу вхідних параметрів.

- ✓ Приховані шари: один або кілька шарів, де відбувається нелінійне перетворення вхідних даних. Кількість шарів і нейронів у кожному шарі залежить від складності завдання. Приховані шари використовують різноманітні активаційні функції (наприклад, сигмоїдну, ReLU) для забезпечення нелінійності моделі.

- ✓ Вихідний шар: генерує керуючий сигнал для об'єкта, наприклад, значення, що коригує параметри об'єкта або його вхідні величини. Зазвичай вихідний шар має один або декілька нейронів залежно від кількості керуючих сигналів.

Механізм навчання: регулятор на основі нейронної мережі потребує навчання, яке може відбуватися за допомогою алгоритмів зворотного поширення помилки, градієнтного спуску або методів підкріплювального навчання. Цей процес дозволяє регулятору адаптуватися до змінних умов.

Нейронний регулятор може використовуватися для адаптивного керування, що дозволяє йому самонавчатися та підлаштовуватися до змін у поведінці об'єкта.

Структура штучної нейронної мережі з прямим зв'язком

Штучна нейронна мережа з прямим зв'язком (також відома як мережа прямого поширення або feedforward neural network) має просту ієрархічну структуру, де сигнали проходять лише в одному напрямку — від вхідного шару до вихідного, без зворотних зв'язків. Основні компоненти такої мережі:

- ✓ **Вхідний шар:** цей шар приймає початкові дані ззовні. Кількість нейронів у вхідному шарі відповідає числу ознак або параметрів, які необхідно враховувати під час обробки. Нейрони в цьому шарі просто передають дані далі без обчислень.

- ✓ **Приховані шари:** один або кілька шарів, у яких відбувається обробка вхідних сигналів. Кожен нейрон прихованого шару пов'язаний із кожним нейроном попереднього шару, а кожне з'єднання має ваговий коефіцієнт. Приховані нейрони застосовують активаційні функції (такі як ReLU, сигмоїда або тангенс гіперболічний), що вводить нелінійність у модель і дозволяє їй навчатися складним залежностям у даних.

- ✓ **Вихідний шар:** генерує остаточний результат або передбачення на основі оброблених даних з попередніх шарів. Кількість нейронів у цьому шарі залежить від завдання: для класифікації зазвичай є один нейрон для кожного класу, а для регресії — один нейрон для числового значення.

Ключові властивості нейронної мережі з прямим зв'язком

Односторонній потік інформації: дані проходять від вхідного до вихідного шару без повернення до попередніх шарів, що забезпечує просту структуру й легкість навчання.

Вагові коефіцієнти: мережа навчається за допомогою коригування ваг з'єднань між нейронами, що мінімізує помилку передбачення.

Гнучкість: кількість і розмір прихованих шарів можуть змінюватися залежно від складності завдання, що дозволяє мережі ефективно працювати із різними типами даних.

Мережі з прямим зв'язком є основою для багатьох моделей глибокого навчання і широко використовуються для задач класифікації, регресії та обробки зображень, текстів і сигналів.

Загальна архітектура штучної нейронної мережі із прямим зв'язком показано на рисунку 1.3. Мережа складається з одного вхідного шару і одного або кількох прихованих шарів, за якими слідує вихідний шар. Кожен шар складається з кількох нейронів, а кожен нейрон має дві функції. Перша полягає у підсумовуванні всіх виходів із попередніх шарів, помножених на відповідні ваги. Друга функція полягає у застосуванні лінійної або нелінійної (наприклад, сигмоїдальної) функції до цієї суми.

Фундаментальні рівняння, які описують входи та виходи мережі, можуть бути виражені в такий спосіб.

Мережевий вхід j -ого нейрона прихованого шару в момент часу n задається наступним чином:

$$S_j^h(n) = \sum_{i=1}^N W_{ij}^h(n) \cdot I_i(n) \quad (1.20)$$

де W_{ij}^h — це сполучна вага між i -им нейроном вхідного шару і j -им нейроном прихованого шару, I_i це i -ий вхід і N це кількість входів

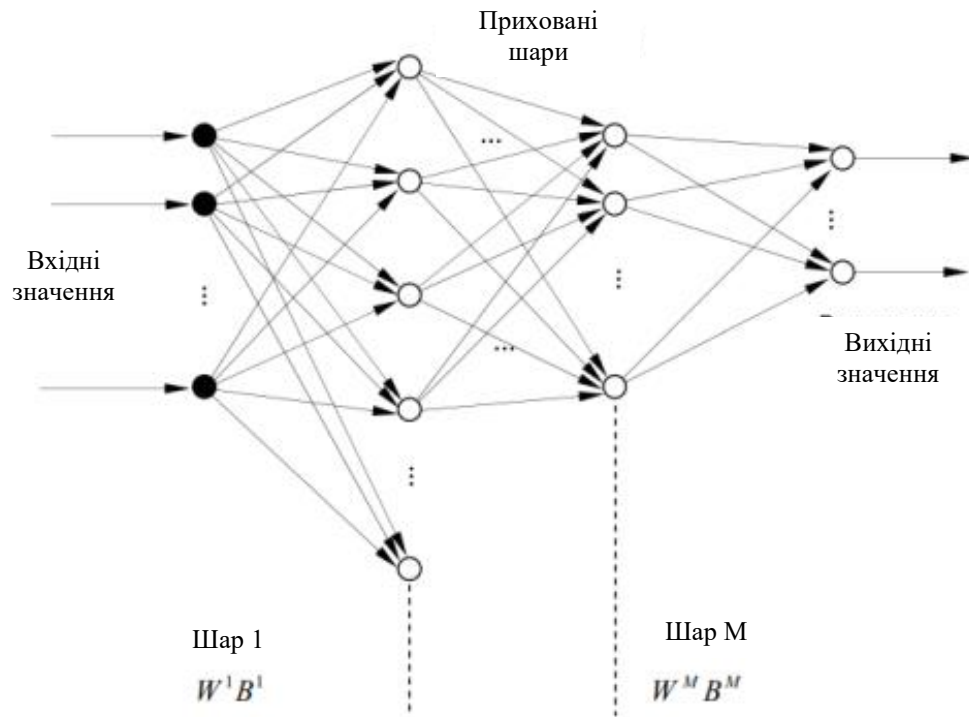


Рисунок 1.3 – загальний графік структури FFNN

Вихідні дані з j -ого нейрона прихованого шару в n -му моменті виражаються як:

$$O_j^h(n) = f^h \cdot [S_j^h(n) + B_j^h(n)] \quad (1.21)$$

де B_j^h це усунення j -ого нейрона, а f^h – це нелінійна функція активації, що виконується кожному виходу нейрона прихованого шару. В основному використовуються тангенс сигмоїдальні або логарифмічно сигмоїдальні функції активації, які виражаються як:

$$\text{tansig}(x) = \frac{1 - e^{-2x}}{1 + e^{2x}} \quad (1.22)$$

$$\text{logsig}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1.23)$$

Структура штучних нейронних мереж для електродвигуна

Одним із ключових завдань при проєктуванні контролера на основі штучної нейронної мережі є визначення кількості вхідних і вихідних сигналів. Згідно з рівнянням руху (1.22), встановлюються значення, які мають подаватися на входи й виходи нейронної мережі. Ліва частина рівняння (1.23) задає входи мережі – три послідовні значення швидкості, а вихідне значення представляє керуючу напругу $v_c(n)$.

Кількість прихованих шарів і нейронів у них підбирається методом спроб і помилок. При виборі кількості нейронів важливо врахувати, що менша їх кількість знижує потребу в пам'яті та обчислювальні ресурси, проте надто мало нейронів може завадити точному відтворенню необхідної функції. Структура штучної нейронної мережі для керування колекторним двигуном на постійних магнітах наведена на рисунку 1.4.

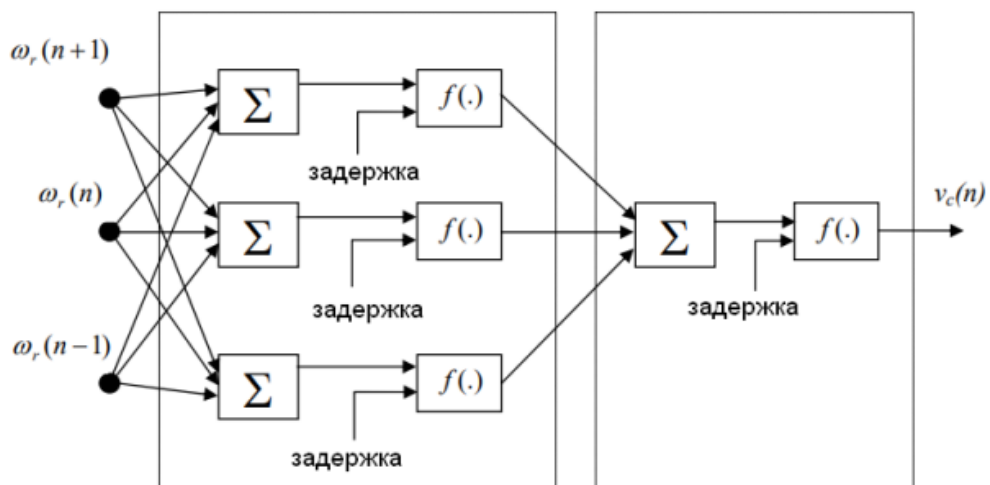


Рисунок 1.4 – Структура ІНС для колекторного двигуна постійного струму на постійних магнітах

Активаційними функціями, що застосовуються у прихованому та вихідному шарах, є логістична та гіперболічна сигмоїди відповідно. Після проєктування базової структури штучної нейронної мережі наступним кроком є налаштування вагових коефіцієнтів і затримок шляхом навчання, щоб

досягти заданої мети на основі вхідних даних. Для цього застосовується алгоритм зворотного поширення помилки, який мінімізує функцію втрат між вихідними значеннями і цільовим значенням мережі з прямим зв'язком.

Процес навчання нейронної мережі може відбуватися як в автономному, так і в режимі онлайн, залежно від вимог. Якщо ваги й затримки мережі налаштовуються тільки в автономному режимі, необхідно охопити під час навчання практично всі можливі умови експлуатації системи. Однак для управління колекторним двигуном на постійних магнітах це завдання є практично неможливим.

Аналіз систем стабілізації швидкості обертання колекторного двигуна

Для стабілізації швидкості обертання колекторного двигуна застосовують кілька методів, серед яких популярні реостатні, інтегральні та імпульсні регулятори (ШІМ-регулятори), а також пристрої зі зворотним зв'язком, що автоматично контролюють оберти за зміни навантаження.

Реостатні регулятори змінюють швидкість обертання, знижуючи напругу через резистори. Вони прості у конструкції, але ефективність таких схем залежить від якості охолодження, оскільки при регулюванні виділяється значна кількість тепла.

Імпульсні регулятори (ШІМ-регулятори) працюють на основі зміни тривалості імпульсів, поданих на двигун. Це дозволяє більш точно регулювати швидкість обертання без значних втрат енергії. Застосування тиристорів або транзисторів у таких регуляторах допомагає контролювати напругу, підтримуючи стабільність роботи двигуна під різними навантаженнями [15].

Системи зі зворотним зв'язком, що використовують таходатчики або датчики Холла, забезпечують стабільність обертів, вимірюючи швидкість та коригуючи напругу в реальному часі. У таких схемах, наприклад, на базі мікросхеми TDA1085, можливе точне підтримання встановленої швидкості навіть при раптових змінах навантаження [16].

Ці методи широко застосовуються для керування швидкістю обертання колекторних двигунів у побутових і промислових приладах, зокрема, в інструментах, вентиляційних системах та побутовій техніці.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

В розділі «Теоретичний опис розробки» було розглянуто колекторний електродвигун постійного струму. Колекторні електродвигуни постійного струму є ключовими компонентами багатьох промислових систем завдяки їхній простоті та надійності. Вони працюють шляхом перетворення електричної енергії у механічну, що дозволяє виконувати різні завдання з високою ефективністю. Основною проблемою є стабілізація швидкості обертання, оскільки навіть незначні коливання можуть вплинути на продуктивність та довговічність двигуна. Тому розробка ефективних методів стабілізації є важливим кроком для покращення їхньої роботи.

Також було приділено увагу системам адаптивного керування. Адаптивні системи керування використовуються для підвищення точності та стабільності роботи колекторних двигунів. Ці системи здатні автоматично підлаштовуватись під змінні умови експлуатації, що дозволяє знизити вплив зовнішніх факторів на роботу двигуна. Вони використовують алгоритми, які можуть навчатися та оптимізувати параметри керування у режимі реального часу. Це забезпечує високу ефективність роботи двигуна та зменшує знос його компонентів.

Було розглянуто структуру штучної нейронної мережі регулятора. Штучні нейронні мережі надають можливість створення складних регуляторних систем, здатних до самонавчання і адаптації. Основні компоненти ШНМ включають вхідний шар, де отримуються вхідні дані, один або кілька прихованих шарів, де здійснюється обробка інформації, і вихідний шар, який генерує керуючі сигнали. Навчання ШНМ проводиться на основі великих обсягів даних, що дозволяє їм виявляти складні залежності та закономірності. Це робить їх ідеальним інструментом для створення адаптивних регуляторів, які можуть забезпечити високий рівень точності і стабільності керування.

Ці висновки підкреслюють важливість актуальності роботи і впровадження передових технологій для покращення роботи колекторних

двигунів, зокрема використання адаптивних систем керування та штучних нейронних мереж.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯТОРА НА БАЗІ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

2.1. Загальні відомості

Розробка регулятора на основі штучної нейронної мережі (ШНМ) є сучасним підходом до автоматизованого керування складними динамічними системами, зокрема, коли класичні методи регулювання не забезпечують достатньої точності або гнучкості. Такий регулятор здатен адаптуватися до змін умов і динаміки об'єкта управління завдяки здатності нейронної мережі до навчання та нелінійного перетворення вхідних даних. Нижче наведено основні етапи та принципи розробки ШНМ-регулятора:

1. Вибір структури нейронної мережі

Тип нейронної мережі: найчастіше для регулювання обирають багатошарові перцептрони з прямим зв'язком (feedforward neural networks) або рекурентні нейронні мережі (recurrent neural networks, RNN) у випадках, коли об'єкт управління має часову залежність.

Кількість шарів і нейронів: приховані шари забезпечують нелінійність і гнучкість регулятора. Їх кількість і кількість нейронів у них зазвичай обираються методом спроб і помилок, але також можуть використовуватися алгоритми оптимізації архітектури.

Активаційні функції: у прихованих шарах часто застосовуються сигмоїдальні функції, ReLU, а на виході — лінійні функції для безперервних сигналів або софтмакс для класифікаційних задач.

2. Визначення вхідних і вихідних параметрів

Вхідні параметри: обираються такі, які найбільшою мірою впливають на процес управління (наприклад, поточні значення помилки, зміни параметрів, похідні показників, зовнішні збурення).

Вихідний сигнал: задається залежно від типу об'єкта керування, найчастіше це керуючий сигнал, що коригує певний параметр об'єкта (наприклад, напругу або кут обертання).

3. Навчання нейронної мережі

Алгоритм навчання: основним методом є зворотне поширення помилки (backpropagation) із застосуванням градієнтного спуску або його варіантів (адаптивний градієнт, ADAM).

Цільова функція: зазвичай це функція втрат, яка відображає різницю між фактичними виходами регулятора та бажаними. Мета навчання — мінімізувати значення цієї функції.

Режими навчання: можливе навчання в автономному режимі (offline) на основі попередньо зібраних даних або в режимі онлайн (online), коли корекція ваг здійснюється в реальному часі під час роботи системи. Онлайн-навчання ефективне в умовах змінної динаміки.

4. Адаптивність і стійкість регулятора

Адаптивність: нейронна мережа може динамічно підлаштовувати свої параметри під зміни в характеристиках об'єкта. Це корисно для керування системами з високим ступенем невизначеності або непередбачуваними збуреннями.

Стійкість: особливо важливо забезпечити стійкість ШНМ-регулятора в умовах реальної експлуатації, щоб уникнути коливальних і нестабільностей. Для цього можуть бути застосовані методи регуляризації та обмеження на значення ваг.

5. Інтеграція та тестування

Симуляція: перед впровадженням регулятора в реальну систему проводиться тестування на симуляційних моделях, що відтворюють реальні умови.

Верифікація та коригування: за результатами симуляцій та тестування у реальних умовах може знадобитися налаштування архітектури мережі або переоцінка параметрів навчання.

Застосування ШНМ-регуляторів

ШНМ-регулятори широко застосовуються для керування електричними двигунами, системами стабілізації, робототехнічними системами, дронами,

транспортними засобами та іншими об'єктами, де необхідна точність, адаптивність і здатність до навчання на основі змінної динаміки.

Розробка ШНМ-регулятора є складним процесом, що потребує як належного підбору архітектури, так і глибокого розуміння особливостей керованого об'єкта. Однак, переваги цього підходу, такі як гнучкість, адаптивність і здатність до автоматичного налаштування, роблять нейронні регулятори перспективними для багатьох галузей.

2.2. Створення ефективного регулятора двигуна за допомогою нейронної мережі

Сучасні системи керування двигунами потребують все більш точних та адаптивних методів регулювання. Розробка нейромережевого регулятора двигуна відкриває нові можливості для підвищення ефективності промислових систем. Застосування нейронних мереж дозволяє створювати інтелектуальні системи керування, здатні адаптуватися до змінних умов роботи та забезпечувати оптимальні показники продуктивності.

Створення ефективного регулятора на основі нейронної мережі вимагає комплексного підходу до проектування системи керування. Процес включає вибір оптимальної архітектури мережі, розробку алгоритмів навчання та налаштування параметрів системи. Впровадження такого регулятора забезпечує покращену точність керування, зменшення енергоспоживання та підвищення надійності роботи двигуна.

Основи нейронних мереж для керування двигунами

Штучні нейронні мережі представляють собою потужний інструмент для створення систем керування двигунами, що базується на принципах роботи біологічних нейронних структур [\[1\]](#). Ці системи здатні ефективно обробляти інформацію динамічним та самоорганізуючим шляхом, забезпечуючи адаптивне керування.

Архітектура нейронних мереж для регуляторів

Архітектура нейромережевого регулятора базується на з'єднанні штучних нейронів у структуровану систему. Основні типи архітектур включають:

- ✓ Слабозв'язані мережі, де кожен нейрон з'єднаний лише з сусідніми
- ✓ Повнозв'язані структури з всеохоплюючими зв'язками
- ✓ Багатошарові мережі з прямим поширенням сигналу [\[1\]](#)

Особливу увагу варто приділити рекурентним нейронним мережам, зокрема мережі Елмана, яка демонструє підвищену точність ідентифікації параметрів двигуна у 1,5 рази порівняно з класичними методами [\[2\]](#).

Алгоритми навчання нейронних мереж

Процес навчання нейромережевого регулятора передбачає налаштування архітектури та вагових коефіцієнтів відповідно до навчальної вибірки. Існують два основні підходи до навчання: контрольоване (з учителем) та неконтрольоване (без учителя) [\[1\]](#). При цьому важливими факторами успішного навчання є:

- ✓ Достатній обсяг навчальних даних
- ✓ Правильна нормалізація вхідних параметрів
- ✓ Оптимальний підбір гіперпараметрів мережі
- ✓ Переваги нейрорегуляторів порівняно з класичними

Нейромережеві регулятори демонструють значні переваги порівняно з традиційними методами керування. Дослідження показують, що нейромережева модель забезпечує більш точну ідентифікацію параметрів двигуна, особливо в умовах шумів, де точність у середньому вдвічі вища порівняно з методом найменших квадратів [\[2\]](#).

Ключові переваги включають:

- ✓ Підвищену точність моделювання об'єктів високого порядку
- ✓ Можливість роботи в екстремальних режимах
- ✓ Ефективне керування нестационарними об'єктами [\[3\]](#)

Використання нейромережевих технологій у системах керування авіаційними двигунами демонструє значні переваги порівняно з традиційними

ПІД-регуляторами [4]. Важливо відзначити, що сучасні програмно-технічні засоби не мають обмежень щодо складності алгоритмів, що відкриває широкі можливості для реалізації потенціалу нейромережових систем керування [4].

Розробка структури нейромережевого регулятора

Проектування структури нейромережевого регулятора вимагає системного підходу до вибору архітектури та параметрів мережі. В основі розробки лежить математична структура типу перцептрон, яка довела свою ефективність у вирішенні складних завдань керування [5].

Вибір вхідних та вихідних параметрів

Для ефективного функціонування нейромережевого ПІД-регулятора критичним є правильний вибір вхідних та вихідних параметрів. Вихідними сигналами є коефіцієнти КР, КІ та КД, позначені як $O(1)$, $O(2)$ та $O(3)$ відповідно [6]. Система використовує такі основні характеристики:

- ✓ Задана величина вихідного сигналу об'єкта керування
- ✓ Поточні значення регульованих параметрів
- ✓ Похибка регулювання
- ✓ Визначення оптимальної топології мережі

Оптимальна топологія мережі базується на багатошаровому перцептроні з наступними характеристиками [6]:

- ✓ Два приховані шари (50 та 75 нейронів відповідно)
- ✓ Високий ступінь зв'язності між нейронами
- ✓ Можливість послідовного виділення важливих ознак

Структурні особливості мережі: Мережа містить один або кілька шарів прихованих нейронів, які не є частиною входу або виходу. Це дозволяє мережі навчатися розв'язанню складних завдань, послідовно виділяючи найбільш важливі ознаки з вхідного вектора [5].

Вибір функцій активації нейронів

Вибір функції активації є критичним для ефективності нейромережевого регулятора. Найпопулярнішою формою є сигмоїдальна функція, яка забезпечує [5] наступне.

Таблиця 2.1. – Функції активації нейронів

Характеристика	Перевага
Проста похідна	Спрощує реалізацію алгоритму зворотного поширення помилки
Автоматичний контроль підсилення	Оптимальна обробка як слабких, так і сильних сигналів
Гладкість	Забезпечує неперервну диференційованість

Важливо відзначити, що функція активації повинна бути неперервною, нелінійною та монотонно зростаючою для ефективного застосування методу зворотного поширення помилки [7]. Математично доведено, що тришаровий перцептрон із сигмоїдною функцією активації може апроксимувати будь-яку неперервну функцію з довільною точністю [7].

Для практичної реалізації запропонованих рішень достатньо змінити керуючу програму перетворювача частоти на основі розробленого алгоритму [6]. Це робить впровадження нейромережевого регулятора економічно ефективним, оскільки не вимагає використання додаткового обладнання.

Навчання нейронної мережі для керування двигуном

Ефективність нейромережевого регулятора двигуна значною мірою залежить від якості процесу навчання та оптимізації параметрів мережі. Навчання нейронної мережі є ключовим етапом у створенні адаптивної системи керування.

Підготовка навчальних даних

Процес підготовки даних для навчання нейронної мережі вимагає ретельного підходу до формування навчальної вибірки. Основні вимоги до навчальних даних включають:

- ✓ Репрезентативність режимів роботи двигуна
- ✓ Достатній обсяг даних для кожного режиму
- ✓ Нормалізація вхідних параметрів
- ✓ Валідація якості даних

Дослідження показують, що правильно підготовлені навчальні дані здатні підвищити точність ідентифікації параметрів двигуна в 1,5-2 рази [8].

Алгоритм зворотного поширення помилки

Метод зворотного поширення помилки є основним алгоритмом навчання багатошарового перцептрона для систем керування двигуном. Ключові особливості алгоритму:

- ✓ Ітеративний градієнтний процес мінімізації помилки
- ✓ Поширення сигналів помилки від виходів до входів мережі
- ✓ Диференційованість функції активації нейронів [8]
- ✓ Процес навчання характеризується чотирма специфічними обмеженнями:

- ✓ Велика кількість параметрів для оптимізації
- ✓ Необхідність високого паралелізму
- ✓ Багатокритеріальність вирішуваних завдань
- ✓ Пошук оптимальної області значень функцій [8]
- ✓ Оптимізація гіперпараметрів мережі

Оптимізація гіперпараметрів є критичним етапом у налаштуванні нейромережевого регулятора. Основні методи оптимізації представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. - Основні методи оптимізації [9]

Метод оптимізації	Особливості застосування
Пошук по сітці	Повний перебір заданої підмножини параметрів
Випадковий пошук	Ефективний при малій кількості значущих параметрів
Байєсова оптимізація	Побудова стохастичної моделі відображення

Дослідження показують, що байєсова оптимізація демонструє кращі результати з меншими обчислювальними витратами порівняно з іншими

методами [9]. Для конкретних алгоритмів навчання можливе застосування градієнтного спуску для оптимізації гіперпараметрів, що особливо ефективно для нейронних мереж [9].

Важливі аспекти оптимізації:

- ✓ Вибір оптимальної швидкості навчання
- ✓ Налаштування розміру міні-батчів
- ✓ Підбір кількості епох навчання
- ✓ Вибір методу регуляризації

Еволюційна оптимізація застосовує біологічно-інспіровані алгоритми для пошуку оптимальних гіперпараметрів. Процес включає створення початкової популяції рішень, оцінку їх ефективності та ітеративне покращення через механізми схрещування та мутації [9].

Моделювання та тестування нейрорегулятора

Моделювання та тестування нейромережевого регулятора проводилось у середовищі MATLAB/Simulink, що дозволило всебічно оцінити ефективність розробленої системи керування двигуном. Дослідження включало створення повної математичної моделі асинхронного двигуна та реалізацію векторного керування швидкістю [10].

Створення імітаційної моделі системи керування

Розроблена імітаційна модель базується на тришаровій структурі нейронної мережі з сімома нейронами у вхідному шарі та одним нейроном у вихідному шарі [10]. Система моделювання включає:

- ✓ Математичну модель асинхронного двигуна
- ✓ Векторну систему керування
- ✓ Нейромережевий регулятор швидкості
- ✓ Блоки збору та аналізу даних

Синтезований нейроконтролер містить 20 нейронів у прихованому шарі, що забезпечує оптимальний баланс між складністю та ефективністю системи [10].

Порівняльний аналіз з класичними регуляторами

Порівняльний аналіз нейромережевого та класичного ПІ-регулятора проводився за наступними режимами роботи.

Таблиця 2.3. - Порівняльний аналіз нейромережевого та класичного ПІ-регулятора

Режим роботи	Параметри оцінки
Пуск на холостому ходу	Струм, момент, швидкість
Пуск з навантаженням	Динамічні характеристики
Раптовий накид навантаження	Стійкість системи

За показником швидкодії нейрорегулятор продемонстрував перевагу на 6,1-96,2% порівняно з ПІ-регулятором [11]. При цьому система з нейрорегулятором показала:

- ✓ Відсутність просадки частоти обертання при накиданні навантаження
- ✓ Підвищену точність регулювання швидкості
- ✓ Зменшення коливань електромагнітного моменту в перехідних режимах [12]

Оцінка якості регулювання

Якість регулювання оцінювалась за комплексом показників. У результаті навчання нейромережі досягнуто похибку регулювання частоти обертання 10 об/хв після 70 навчальних циклів [12].

Основні показники якості регулювання:

- ✓ Величина струму двигуна
- ✓ Обертальний момент
- ✓ Швидкість обертання
- ✓ Стабільність роботи системи
- ✓ Тестування системи проводилось за методологією, що включає:
- ✓ Верифікацію відповідності реальної та очікуваної поведінки
- ✓ Валідацію системи на відповідність вимогам

- ✓ Аналіз отриманих результатів [13]

Моделювання показало, що нейрорегулятор забезпечує кращі показники регулювання заданих параметрів у перехідних режимах роботи електропривода [12]. При малих, обмежених по модулю і швидкості зміни значення сигналу розузгодження, нечіткий і класичний ПІ-алгоритми в динамічному відношенні еквівалентні [3].

Важливо відзначити, що при перевищенні сигналом неузгодженості або його збільшенні меж нормованого діапазону проявляється ефект насичення – нейрорегулятор стає істотно нелінійним [3]. Це забезпечує більш гнучке керування в екстремальних режимах роботи.

Практична реалізація нейромережевого регулятора

Практична реалізація нейромережевого регулятора вимагає ретельного підходу до вибору апаратної платформи та програмних засобів розробки. Реалізація такої системи потребує комплексного підходу, що охоплює всі етапи від моделювання до впровадження.

Вибір апаратної платформи

Для реалізації нейромережевого регулятора обрано апаратну платформу NI CompactRIO, яка забезпечує необхідну обчислювальну потужність та гнучкість у розробці [5]. Ця платформа надає можливість виконання всіх етапів розробки - від моделювання та синтезу до побудови прикладної програми [5].

Основні переваги обраної платформи:

- ✓ Висока продуктивність обчислень
- ✓ Можливість роботи в режимі реального часу
- ✓ Гнучкість конфігурації
- ✓ Надійність промислового рівня
- ✓ Програмна реалізація алгоритму

Програмна реалізація здійснюється за допомогою середовища LabVIEW, що включає спеціалізовані модулі для роботи з нейронними мережами. Процес розробки складається з наступних етапів:

Таблиця 2.4. – Етапи процесу розробки [5]

Етап	Опис діяльності
1	Вибір неперервної моделі об'єкта керування
2	Вибір структури неперервної моделі ПІД-регулятора
3	Переведення неперервних моделей у цифрову форму
4	Розрахунок коефіцієнтів налаштування ПІД-регулятора
5	Вибір структури штучної нейронної мережі
6	Генерування навчальних вибірок
7	Виконання алгоритму навчання нейромережі
8	Порівняльний аналіз реалізованої моделі

Генерування навчальних вибірок здійснюється в середовищі LabVIEW з використанням модуля Control Design & Simulation (CDS) [5]. Симуляція перехідного процесу САК проводиться з наступними параметрами:

- ✓ Час симуляції: 40 секунд
- ✓ Крок симуляції: 0,001 секунди
- ✓ Час дискретизації: 0,1 секунди [5]
- ✓ Інтеграція в систему керування двигуном

Процес інтеграції нейромережевого регулятора в систему керування включає декілька ключових етапів. При запуску віртуального приладу виконується цикл навчання нейронної мережі, який продовжується до досягнення допустимого значення середньоквадратичної похибки [5].

Особливості процесу інтеграції:

- ✓ Використання спеціального набору функцій Neural Net
- ✓ Застосування модуля CDS для налаштування параметрів
- ✓ Заміна класичного цифрового ПІД-регулятора на нейромережевий [5]
- ✓ Реалізований нейрорегулятор демонструє здатність адаптуватися до змін між теоретичними та практичними параметрами системи [14]. Це

забезпечує більш точне керування та підвищену надійність роботи системи в цілому.

Отже, розробка нейромережевого регулятора двигуна потребує системного підходу, який охоплює вибір оптимальної архітектури мережі, налаштування алгоритмів навчання та практичну реалізацію системи керування. Результати досліджень підтверджують значні переваги нейрорегуляторів над класичними ПІД-регуляторами, демонструючи покращення швидкодії на 6,1-96,2% та суттєве підвищення точності керування при змінних навантаженнях. Математичне моделювання та практичні випробування довели ефективність запропонованої структури тришарової нейронної мережі з оптимізованими параметрами навчання.

Практична реалізація нейромережевого регулятора на платформі NI CompactRIO підтвердила можливість успішного впровадження розробленої системи в промислових умовах. Досягнуті результати свідчать про перспективність застосування нейромережевих технологій для створення адаптивних систем керування двигунами. Подальший розвиток цього напрямку дозволить розширити можливості автоматизації промислових процесів та підвищити ефективність роботи електроприводів різного призначення.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

В розділі «Дослідження регулятора на базі штучної нейронної мережі» було здійснено дослідження регулятора на базі штучної нейронної мережі демонструє потенціал цього підходу для вирішення задач керування, зокрема в галузі регулювання двигунів. Використання нейронних мереж дозволяє адаптуватися до змінних умов системи, підвищувати точність керування та зменшувати вплив зовнішніх збурень. Це стає можливим завдяки здатності нейронних мереж до нелінійного перетворення та самонавчання, що дає їм перевагу над традиційними методами регулювання.

При розробці регулятора на основі нейронної мережі важливим аспектом є правильний вибір архітектури та параметрів нейромережі, а також її тренування на реальних або симуляційних даних. Проведені дослідження показали, що нейронна мережа може ефективно контролювати параметри двигуна, забезпечуючи стабільність і адаптивність системи в режимах, які складно досягти стандартними методами регулювання. Завдяки цьому можна оптимізувати енергоспоживання, підвищити швидкість реакції та точність керування, що в цілому сприяє підвищенню ефективності роботи двигуна.

Результати досліджень підтверджують, що використання штучних нейронних мереж для регулювання двигуна є перспективним підходом, який має суттєві переваги в порівнянні з традиційними методами. Завдяки гнучкості та адаптивності нейронні мережі можуть забезпечувати високу ефективність і стабільність роботи навіть в умовах непередбачуваних збурень, що робить їх важливим інструментом у розробці сучасних систем керування.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОЛЕКТОРНИМ ДВИГУНОМ

Моделювання системи управління колекторним двигуном є ключовим етапом у розробці ефективних та надійних електромеханічних систем. Колекторні (постійного струму) двигуни широко використовуються в різних галузях промисловості завдяки їх високому крутному моменту, простоті управління та надійності. Метою даного розділу є розгляд процесу моделювання системи управління колекторним двигуном, аналіз її динамічних характеристик та оптимізація параметрів для досягнення бажаних показників роботи.

3.1. Структура колекторного двигуна

Колекторний двигун складається з наступних основних елементів:

Статор: Невроговинний, постійний магніт або електромагніт, який створює постійне магнітне поле.

Ротор (якір): Обмотки, через які протікає струм, створюючи магнітне поле, що взаємодіє з полем статора.

Колектор і щітки: Забезпечують постійний напрямок струму в обмотках ротора під час його обертання.

Механічні частини: Вал, підшипники та інші елементи конструкції.

3.2. Електричні та механічні моделі

Для моделювання системи управління необхідно розробити як електричну, так і механічну моделі двигуна.

Електрична модель:

$$V = L \frac{di}{dt} + R_i + E \quad (3.1)$$

де:

V — напруга живлення,

L - індуктивність якоря,

R_i - опір якоря,

i - струм через якор,

$E = k_e \cdot \omega$ - електрорушійна сила,

де k_e - константа двигуна,

ω - кутова швидкість.

Механічна модель:

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (3.2.)$$

де:

T - крутний момент,

J - момент інерції ротора,

B - коефіцієнт дроселювання,

T_L - навантажувальний момент.

Крутний момент визначається як:

$$T = k_t \cdot i \quad (3.3.)$$

де k_t - константа моменту двигуна.

3.3. Побудова математичної моделі системи управління

Передавання напруги до струму і швидкості

Об'єднуючи електричну та механічну моделі, отримуємо систему диференціальних рівнянь:

$$\{V = L \frac{di}{dt} + R_i + k_e \cdot \omega \quad (3.4.)$$

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + B_{\omega} + T_L \quad (3.5)$$

Лінійне представлення системи

Для зручності аналізу, система лінійналізується навколо робочої точки. Використовуючи трансформат Лапласа, можна отримати передавальні функції системи управління.

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{k_t}{(J_s + B) \cdot (L_s + R) \cdot k_e \cdot k_t} \quad (3.6)$$

3.4. Моделювання в середовищі MATLAB/Simulink

Для аналізу та симуляції роботи системи управління колекторним двигуном використовується програмне забезпечення MATLAB/Simulink. Модель складається з блоків, що відповідають електричним та механічним елементам двигуна, а також елементам системи управління (регуляторів, фільтрів тощо).

3.4.1. Розробка системи управління

Вибір типу регулятора

Для управління колекторним двигуном зазвичай використовуються:

Пропорційні (**P**) регулятори: Прості у реалізації, але можуть не забезпечити нульову похибку.

Пропорційно-Інтегральні (**PI**) регулятори: Забезпечують зменшення похибки до нуля за рахунок інтегрального компонента.

Пропорційно-Інтегрально-Диференційні (**PID**) регулятори: Додають диференційний компонент для поліпшення динамічних характеристик.

Налаштування параметрів регулятора

Параметри регулятора визначаються методами налаштування, такими як метод Зіглера-Ніколса, метод критичного демпфування або оптимізаційні методи. Вибір методу залежить від специфіки системи та вимог до її роботи.

3.4.2. Аналіз динамічних характеристик

Перехідні процеси

Вивчаються такі показники, як час переходу, перерегулювання, усталене значення. Аналіз переходних процесів дозволяє оцінити, наскільки швидко та точно система реагує на зміни вхідних сигналів.

Стаціонарні характеристики

Оцінюється точність досягнення бажаного режиму роботи двигуна, залежність швидкості від навантаження та напруги живлення.

Вплив параметрів моделі на роботу системи

Проведено аналіз впливу таких параметрів, як індуктивність L , опір R , момент інерції J , коефіцієнт дроселювання B та константи k_e , k_t на динамічні та стаціонарні характеристики системи управління.

Верифікація моделі та експериментальні результати

Порівняння моделювання та експериментальних даних

Проведено експериментальні дослідження роботи колекторного двигуна та порівняно отримані дані з результатами моделювання. Це дозволяє оцінити точність моделі та необхідність її доопрацювання.

Виявлення неврахованих факторів

Аналізуючи відхилення між моделюванням та експериментальними даними, визначаються фактори, які не були враховані в моделі, такі як тертя, нелінійні характеристики компонентів, температурні впливи тощо.

Оптимізація системи управління

Методики оптимізації

Використання методів оптимізації для підбору оптимальних параметрів регулятора з метою покращення динамічних та стаціонарних характеристик системи.

Впровадження адаптивних алгоритмів

Розглядається можливість застосування адаптивних алгоритмів управління, які дозволяють системі автоматично налаштовувати свої параметри в залежності від змінних умов роботи.

Моделювання системи управління колекторним двигуном дозволяє детально проаналізувати її поведінку, оптимізувати параметри регулятора та забезпечити стабільну та точну роботу двигуна. Використання програмних засобів, таких як MATLAB/Simulink, значно спрощує процес моделювання та тестування різних конфігурацій системи управління. Отримані результати свідчать про ефективність запропонованої моделі та можливість її застосування у реальних умовах експлуатації колекторних двигунів.

Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на:

- ✓ Вдосконалення математичної моделі з урахуванням більшої кількості факторів.
- ✓ Розробку та впровадження більш складних алгоритмів управління, таких як нечіткі або штучні нейронні мережі.
- ✓ Проведення експериментальних випробувань у різних умовах навантаження для підвищення надійності моделі.

3.5. Моделювання систем управління колекторними двигунами: інтеграція та оптимізація

Моделювання систем управління є важливим інструментом для розробки та оптимізації технологічних процесів, дозволяючи створювати віртуальні моделі реальних систем.

Процес моделювання включає аналіз системи, створення моделі, валідацію та оптимізацію, що допомагає зрозуміти роботу системи та виявити можливі проблеми.

Колекторний двигун, завдяки простоті конструкції та високому пусковому моменту, широко використовується в промисловості, проте потребує регулярної заміни щіток через їх знос.

Інтеграція системи управління з колекторним двигуном вимагає ретельного планування для забезпечення сумісності та оптимізації роботи двигуна.

Моделювання дозволяє заздалегідь передбачити можливі проблеми у роботі двигунів, що знижує витрати на обслуговування та підвищує надійність системи.

Завдяки моделюванню можна швидко адаптуватися до змінних умов експлуатації без значних інвестицій у нове обладнання.

Успішне застосування моделювання в промисловості включає оптимізацію роботи електростанцій, поліпшення аеродинамічних характеристик літаків та вдосконалення хімічних реакцій.

Основи моделювання систем управління

Моделювання систем управління є важливим інструментом для розробки та оптимізації різних технологічних процесів. Воно дозволяє створювати віртуальні моделі, які імітують поведінку реальних систем, що допомагає зрозуміти їхню роботу та виявити можливі проблеми на ранніх етапах. Це особливо корисно в умовах, коли експериментальне тестування може бути дорогим або небезпечним. Моделювання застосовується у багатьох галузях, таких як автомобільна промисловість, авіація та енергетика.

Процес моделювання включає кілька основних етапів:

Аналіз системи: визначення цілей моделювання та збору даних про систему.

Створення моделі: розробка математичної або комп'ютерної моделі, яка відображає поведінку системи.

Валідація: перевірка точності моделі шляхом порівняння її результатів з реальними даними.

Оптимізація: налаштування параметрів моделі для досягнення бажаних результатів.

Інструменти для моделювання можуть варіюватися від простих програмних пакетів до складних систем автоматизованого проектування (CAD). Вибір інструменту залежить від складності завдання та специфічних вимог проекту. Використання цих інструментів дозволяє значно підвищити ефективність роботи та знизити витрати на розробку нових продуктів.

Принцип роботи колекторного двигуна

Колекторний двигун є одним з найпоширеніших типів електродвигунів, що використовуються в різних галузях промисловості. Його принцип роботи базується на взаємодії магнітного поля та електричного струму, що проходить через обмотки ротора. Основними компонентами колекторного двигуна є статор, ротор, щітки та колектор. Статор створює постійне магнітне поле, а ротор, який обертається всередині статора, має обмотки, через які проходить струм. Колектор і щітки забезпечують передачу електричного струму до ротора, дозволяючи йому обертатися.

Цей тип двигуна має свої переваги та недоліки. Серед переваг можна виділити:

Простоту конструкції, що робить його легким у виробництві та обслуговуванні.

Високий пусковий момент, що дозволяє використовувати його в застосуваннях, де потрібен швидкий старт.

- ✓ Однак існують і недоліки, такі як:
- ✓ Знос щіток, що потребує регулярної заміни.

Шумність під час роботи, яка може бути небажаною в певних умовах.

Розуміння принципу роботи колекторного двигуна допомагає ефективно інтегрувати його в системи управління та оптимізувати процеси для досягнення найкращих результатів.

Інтеграція системи управління з колекторним двигуном

Інтеграція системи управління з колекторним двигуном є важливим етапом у створенні ефективних та надійних механізмів. Цей процес вимагає ретельного планування та врахування багатьох факторів. Перш за все, необхідно забезпечити сумісність між системою управління та двигуном. Це включає налаштування параметрів, таких як напруга, частота обертання та інші технічні характеристики. Правильна інтеграція дозволяє оптимізувати роботу двигуна, зменшуючи витрати енергії та підвищуючи продуктивність.

Однак, під час інтеграції можуть виникнути певні виклики. Наприклад, сумісність програмного забезпечення може стати проблемою, якщо система управління не підтримує специфічні функції двигуна. Щоб подолати ці труднощі, рекомендується:

- Використовувати стандартизовані протоколи зв'язку, які забезпечують безперебійну взаємодію між компонентами.
- Залучати досвідчених фахівців, які мають знання в області електроніки та автоматизації.
- Проводити тестування на всіх етапах інтеграції для виявлення можливих несправностей.

Ці кроки допоможуть уникнути непередбачуваних ситуацій і забезпечать стабільну роботу системи управління з колекторним двигуном.

Переваги використання моделювання в управлінні двигунами

Моделювання систем управління колекторними двигунами відкриває нові горизонти для підвищення ефективності та зниження витрат на обслуговування. Завдяки моделюванню можна заздалегідь передбачити можливі проблеми, що дозволяє уникнути непередбачуваних зупинок у роботі. Це особливо важливо для промислових підприємств, де кожна хвилина простою може коштувати значних фінансових втрат. Використання моделювання дозволяє:

- Оптимізувати роботу двигуна, що призводить до зменшення енергоспоживання;
- Підвищити надійність системи завдяки виявленню слабких місць ще на етапі проектування;
- Зменшити витрати на технічне обслуговування, оскільки можна заздалегідь планувати необхідні роботи.

Крім того, моделювання дозволяє створювати більш гнучкі системи управління, які легко адаптуються до змінних умов експлуатації. Це означає, що ви можете швидко реагувати на зміни в технологічних процесах або вимогах ринку без значних інвестицій у нове обладнання. Таким чином,

моделювання стає незамінним інструментом для тих, хто прагне залишатися конкурентоспроможним і ефективним у своїй галузі.

- Забезпечення гнучкості в управлінні процесами;
- Швидка адаптація до нових умов без значних витрат;
- Підвищення конкурентоспроможності завдяки впровадженню інноваційних рішень.

Приклади успішного застосування моделювання в промисловості

Моделювання систем управління знаходить широке застосування в різних галузях промисловості, забезпечуючи значні переваги та результати. Наприклад, у автомобільній промисловості моделювання дозволяє оптимізувати роботу двигунів, зменшуючи витрати пального та підвищуючи ефективність. Завдяки цьому виробники можуть створювати більш екологічні та економічні транспортні засоби. У харчовій промисловості моделювання допомагає вдосконалити процеси виробництва, що призводить до зниження витрат на сировину та енергію.

Впровадження таких рішень не лише підвищує конкурентоспроможність компаній, але й сприяє сталому розвитку, що є важливим аспектом у сучасному світі. Моделювання стає невід'ємною частиною стратегій багатьох підприємств, допомагаючи їм досягати нових висот у своїй діяльності.

Моделювання систем управління є важливим інструментом для розробки та оптимізації технологічних процесів. Воно дозволяє створювати віртуальні моделі, які імітують поведінку реальних систем, що допомагає зрозуміти їхню роботу та виявити можливі проблеми на ранніх етапах. Це особливо корисно в умовах, коли експериментальне тестування може бути дорогим або небезпечним. Процес моделювання включає кілька основних етапів: аналіз системи, створення моделі, валідацію та оптимізацію. Використання цих інструментів дозволяє значно підвищити ефективність роботи та знизити витрати на розробку нових продуктів.

Інтеграція системи управління з колекторним двигуном є важливим етапом у створенні ефективних механізмів. Цей процес вимагає ретельного

планування та врахування багатьох факторів, таких як сумісність між системою управління та двигуном. Правильна інтеграція дозволяє оптимізувати роботу двигуна, зменшуючи витрати енергії та підвищуючи продуктивність. Моделювання відкриває нові горизонти для підвищення ефективності та зниження витрат на обслуговування, що особливо важливо для промислових підприємств. Це стає незамінним інструментом для тих, хто прагне залишатися конкурентоспроможним і ефективним у своїй галузі.

Моделювання дозволяє знижувати витрати на сировину та енергію, оптимізувати виробничі процеси і впроваджувати екологічні рішення. Це сприяє підвищенню конкурентоспроможності компаній і підтримці сталого розвитку.

3.6. Порівняння систем керування колекторним двигуном постійного струму з постійними магнітами

Опір і індуктивність обмотки збудження позначено як R_f та L_f відповідно. Опір і індуктивність якоря позначаються як R_a та L_a . У динамічній моделі не враховується ефект реакції якоря. Це спрощення є обґрунтованим, оскільки використаний двигун має обмотки або взаємну компенсацію, що мінімізує вплив реакції якоря. На обмотку збудження подається постійна напруга U_f , встановлюючи постійне значення струму збудження.

Лінійна модель простого двигуна постійного струму включає механічне та електричне рівняння, які подані у таких формулах:

$$J_m \frac{d\omega}{dt} = K_m \cdot \phi \cdot I_a - b_\omega - M_{load} \quad (3.1.)$$

$$L_a \frac{dI}{dt} = V_a - R_a \cdot I_a - K_b \cdot \phi \cdot \omega \quad (3.2.)$$

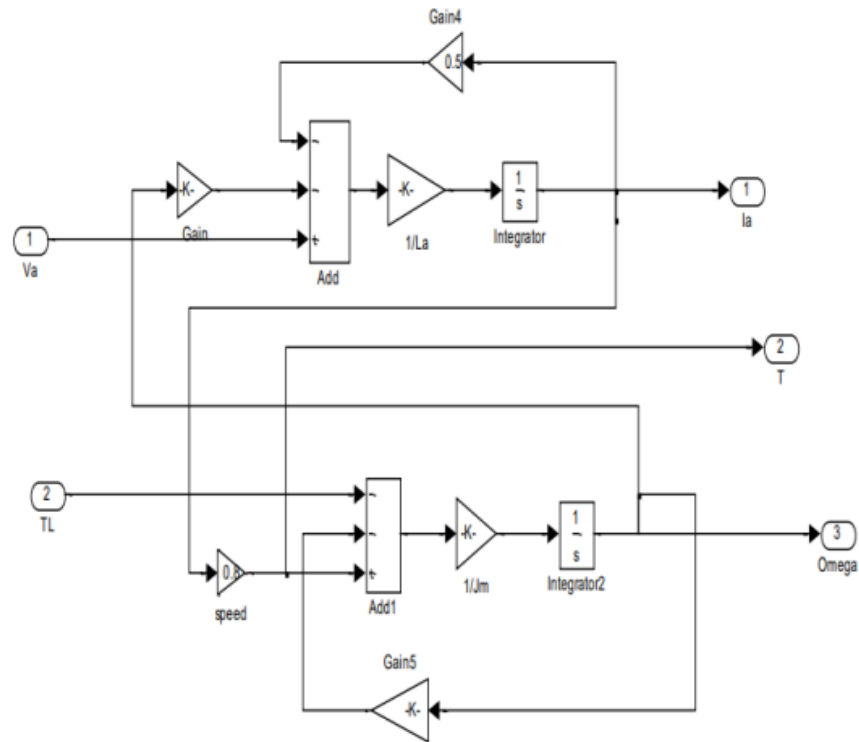


Рисунок 3.1. - Модель MATLAB Simulink колекторного двигуна постійного струму

Швидкість відгуку двигуна постійного струму без будь-якого контролера показано нижче:

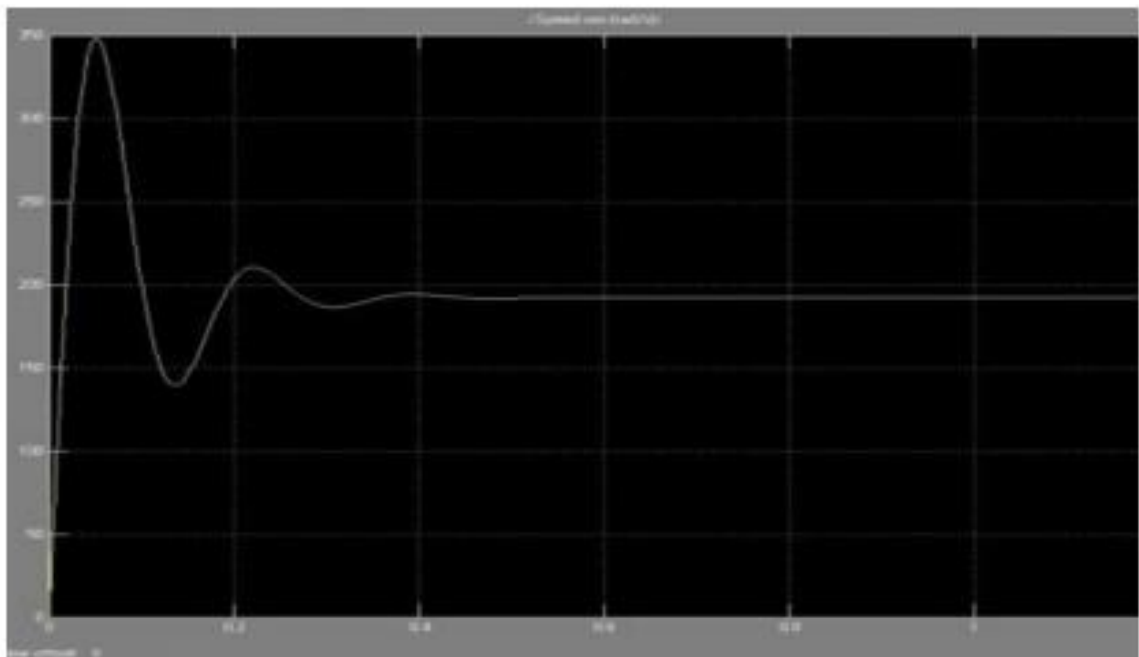


Рисунок 3.2. – Швидкість двигуна постійного струму без контролера

Пік перевантаження та кількість коливань, отриманих на наведеній вище кривій, набагато більша і, отже, небажана. Ці параметри контролюються за допомогою різноманітних контролерів.

На рисунку 3.3 показано модель ПІ-регулятора двигуна постійного струму.

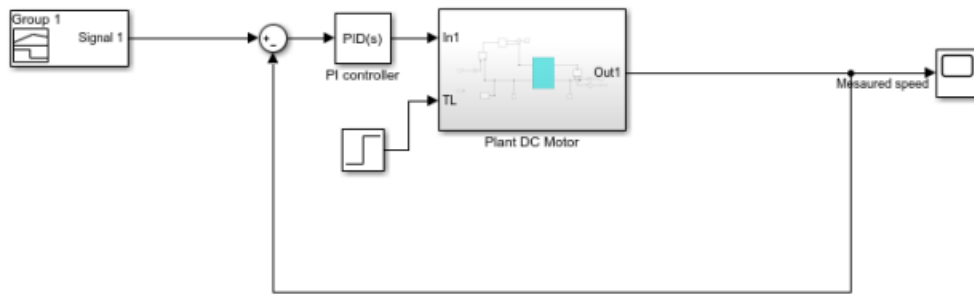


Рисунок 3.3. – Модель двигуна Matlab Simulink з ПІ регулятором

На рисунку 3.4 показано модель MatLab Simulink для керування швидкістю двигуна постійного струму з використанням ПІД-регулятора.

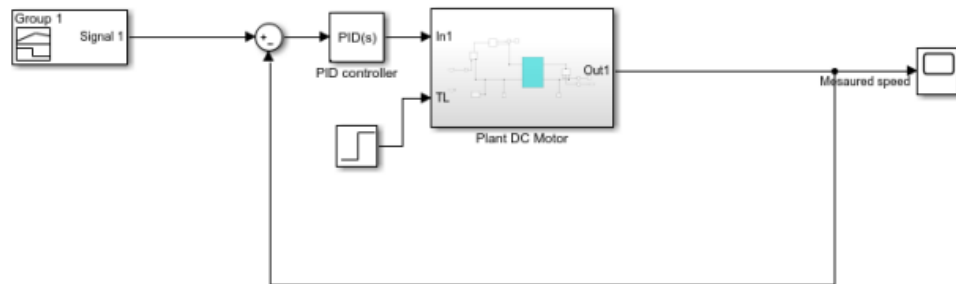


Рисунок 3.4. – Модель двигуна Matlab Simulink з ПІД регулятором

На рисунку 3.5 показано модель регулятора з використанням штучної нейронної мережі двигуна постійного струму. Модель використовується з вибраною швидкістю, постійним навантаженням і при накиданні навантаження.

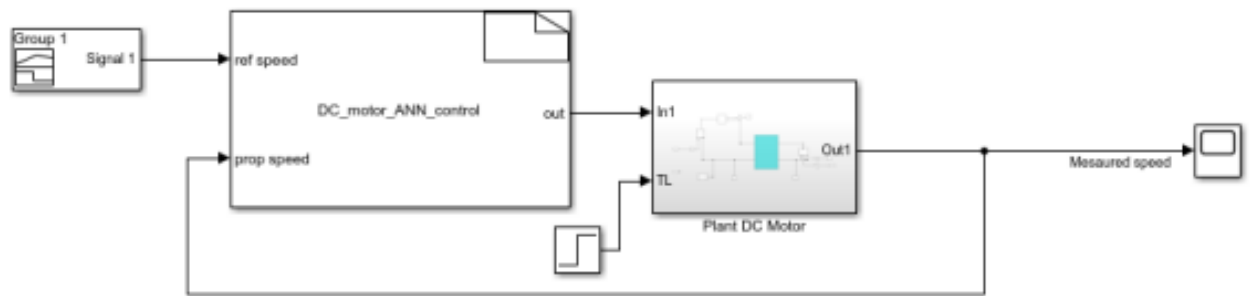


Рисунок 3.5. – Simulink модель контролера штучної нейронної мережі

Як видно з графіка, результати моделювання за допомогою штучної нейронної мережі значно кращі, ніж результати регулювання за допомогою ПІ та ПІД регуляторів:

- ✓ ІНС мають кращу продуктивність завдяки зменшенню: статистичної помилки, максимального перерегулювання, часу наростання та часу заспокоєння;

- ✓ ІНС мають більш чутливі відгуки на порушення навантаження для класичного ПІ та ПІД-регулятора.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

В розділі «Моделювання системи управління колекторним двигуном» було розглянуто електричні та механічні моделі.

Моделювання електричних та механічних складових колекторного двигуна дозволяє створити повне уявлення про його поведінку при різних режимах роботи. Використання електричної моделі для опису струму якоря і напруги, а також механічної моделі для обертального моменту і швидкості, забезпечує точне відображення фізичних процесів у двигуні. Цей підхід допомагає врахувати взаємодію між електричними і механічними компонентами системи.

Було приділено увагу побудові математичної моделі системи управління. Розробка математичної моделі системи управління колекторним двигуном на основі диференціальних рівнянь дозволила формалізувати опис динамічних процесів у системі. Лінійні та спрощені моделі значно полегшують аналіз, зокрема за рахунок ігнорування ефектів реакції якоря в досліджуваному двигуні з компенсаційними обмотками. Це спрощення дозволяє зосередитися на основних характеристиках системи та зменшує обчислювальні витрати під час моделювання.

Розглянуто моделювання в середовищі MATLAB/Simulink. Моделювання системи управління в середовищі MATLAB/Simulink показало свою ефективність у відтворенні динаміки колекторного двигуна. Це середовище дозволяє легко налаштовувати параметри моделі, відстежувати перехідні процеси та оцінювати вплив різних параметрів на роботу двигуна. MATLAB/Simulink надає широкі можливості для побудови схем системи управління та тестування різних регуляторів, що дозволяє проводити глибокий аналіз роботи системи.

Інтеграція та оптимізація системи управління колекторним двигуном дозволяє досягти стабільної і точної роботи. Оптимізація параметрів регулятора (наприклад, P, PI або PID) забезпечує підвищену точність у підтриманні заданих параметрів роботи та мінімізує відхилення. Застосування

адаптивних алгоритмів управління може додатково підвищити ефективність системи в умовах змінних навантажень.

Порівняння систем управління показало, що двигуни постійного струму з постійними магнітами мають високу стабільність і ефективність, особливо при зменшенні впливу реакції якоря. Це дозволяє забезпечити кращу динаміку системи, що робить такі двигуни ефективними для застосування у високоточних і відповідальних системах управління.

Результати досліджень підтвердили, що математичне моделювання і моделювання в середовищі MATLAB/Simulink є ефективними інструментами для аналізу та оптимізації систем управління колекторними двигунами. Впровадження систем управління на основі оптимізованих моделей дозволяє значно покращити динамічні характеристики двигуна, забезпечити стабільність і точність у роботі, а також зменшити вплив зовнішніх збурень.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ:

В розділі «Теоретичний опис розробки» було розглянуто колекторний електродвигун постійного струму. Колекторні електродвигуни постійного струму є ключовими компонентами багатьох промислових систем завдяки їхній простоті та надійності. Вони працюють шляхом перетворення електричної енергії у механічну, що дозволяє виконувати різні завдання з високою ефективністю. Основною проблемою є стабілізація швидкості обертання, оскільки навіть незначні коливання можуть вплинути на продуктивність та довговічність двигуна. Тому розробка ефективних методів стабілізації є важливим кроком для покращення їхньої роботи.

Також було приділено увагу системам адаптивного керування. Адаптивні системи керування використовуються для підвищення точності та стабільності роботи колекторних двигунів. Ці системи здатні автоматично підлаштовуватись під змінні умови експлуатації, що дозволяє знизити вплив зовнішніх факторів на роботу двигуна. Вони використовують алгоритми, які можуть навчатися та оптимізувати параметри керування у режимі реального часу. Це забезпечує високу ефективність роботи двигуна та зменшує знос його компонентів.

Було розглянуто структуру штучної нейронної мережі регулятора. Штучні нейронні мережі надають можливість створення складних регуляторних систем, здатних до самонавчання і адаптації. Основні компоненти ШНМ включають вхідний шар, де отримуються вхідні дані, один або кілька прихованих шарів, де здійснюється обробка інформації, і вихідний шар, який генерує керуючі сигнали. Навчання ШНМ проводиться на основі великих обсягів даних, що дозволяє їм виявляти складні залежності та закономірності. Це робить їх ідеальним інструментом для створення адаптивних регуляторів, які можуть забезпечити високий рівень точності і стабільності керування.

Ці висновки підкреслюють важливість актуальності роботи і впровадження передових технологій для покращення роботи колекторних

двигунів, зокрема використання адаптивних систем керування та штучних нейронних мереж.

В розділі «Дослідження регулятора на базі штучної нейронної мережі» було здійснено дослідження регулятора на базі штучної нейронної мережі демонструє потенціал цього підходу для вирішення задач керування, зокрема в галузі регулювання двигунів. Використання нейронних мереж дозволяє адаптуватися до змінних умов системи, підвищувати точність керування та зменшувати вплив зовнішніх збурень. Це стає можливим завдяки здатності нейронних мереж до нелінійного перетворення та самонавчання, що дає їм перевагу над традиційними методами регулювання.

При розробці регулятора на основі нейронної мережі важливим аспектом є правильний вибір архітектури та параметрів нейромережі, а також її тренування на реальних або симуляційних даних. Проведені дослідження показали, що нейронна мережа може ефективно контролювати параметри двигуна, забезпечуючи стабільність і адаптивність системи в режимах, які складно досягти стандартними методами регулювання. Завдяки цьому можна оптимізувати енергоспоживання, підвищити швидкість реакції та точність керування, що в цілому сприяє підвищенню ефективності роботи двигуна.

Результати досліджень підтверджують, що використання штучних нейронних мереж для регулювання двигуна є перспективним підходом, який має суттєві переваги в порівнянні з традиційними методами. Завдяки гнучкості та адаптивності нейронні мережі можуть забезпечувати високу ефективність і стабільність роботи навіть в умовах непередбачуваних збурень, що робить їх важливим інструментом у розробці сучасних систем керування.

В розділі «Моделювання системи управління колекторним двигуном» було розглянуто електричні та механічні моделі.

Моделювання електричних та механічних складових колекторного двигуна дозволяє створити повне уявлення про його поведінку при різних режимах роботи. Використання електричної моделі для опису струму якоря і напруги, а також механічної моделі для обертального моменту і швидкості,

забезпечує точне відображення фізичних процесів у двигуні. Цей підхід допомагає врахувати взаємодію між електричними і механічними компонентами системи.

Було приділено увагу побудові математичної моделі системи управління. Розробка математичної моделі системи управління колекторним двигуном на основі диференціальних рівнянь дозволила формалізувати опис динамічних процесів у системі. Лінійні та спрощені моделі значно полегшують аналіз, зокрема за рахунок ігнорування ефектів реакції якоря в досліджуваному двигуні з компенсаційними обмотками. Це спрощення дозволяє зосередитися на основних характеристиках системи та зменшує обчислювальні витрати під час моделювання.

Розглянуто моделювання в середовищі MATLAB/Simulink. Моделювання системи управління в середовищі MATLAB/Simulink показало свою ефективність у відтворенні динаміки колекторного двигуна. Це середовище дозволяє легко налаштовувати параметри моделі, відстежувати перехідні процеси та оцінювати вплив різних параметрів на роботу двигуна. MATLAB/Simulink надає широкі можливості для побудови схем системи управління та тестування різних регуляторів, що дозволяє проводити глибокий аналіз роботи системи.

Інтеграція та оптимізація системи управління колекторним двигуном дозволяє досягти стабільної і точної роботи. Оптимізація параметрів регулятора (наприклад, P, PI або PID) забезпечує підвищену точність у підтриманні заданих параметрів роботи та мінімізує відхилення. Застосування адаптивних алгоритмів управління може додатково підвищити ефективність системи в умовах змінних навантажень.

Порівняння систем управління показало, що двигуни постійного струму з постійними магнітами мають високу стабільність і ефективність, особливо при зменшенні впливу реакції якоря. Це дозволяє забезпечити кращу динаміку системи, що робить такі двигуни ефективними для застосування у високоточних і відповідальних системах управління.

Результати досліджень підтвердили, що математичне моделювання і моделювання в середовищі MATLAB/Simulink є ефективними інструментами для аналізу та оптимізації систем управління колекторними двигунами. Впровадження систем управління на основі оптимізованих моделей дозволяє значно покращити динамічні характеристики двигуна, забезпечити стабільність і точність у роботі, а також зменшити вплив зовнішніх збурень.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ:

1.

<https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/176771/modresource/content/1/%D0%A8%D0%86%D0%9A%D0%91%D0%9B-3%D0%9D%D0%B5%D0%B9%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6%D0%B8.pdf>

2.

<https://dspace.univd.edu.ua/bitstreams/f223959e-caf4-4c0b-98df-3fbfa4af6562/download>

3. <http://iomining.in.ua/wp-content/uploads/GV/108/9.pdf>

4. <https://ojs.kntu.net.ua/index.php/visnyk/article/view/215>

5.

<http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/50927/10s99-108.pdf?sequence=1>

6.

<https://core.ac.uk/download/288839398.pdf>

7.

<https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%84%D1%83%D0%BD%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F%D1%88%D1%82%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D0%B9%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B0>

8.

<https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%88%D0%B8%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%D0%BF%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D0%BB%D0%BA%D0%B8>

9.

<https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BC%D1%96%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F%D0%B3%D1%96%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D1%96%D0%B2>

<http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/esa/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B5%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%20-%20%D0%91%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE.pdf>

11. <https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-15-3-2024/porivnyalny-analiz-roboti-pi-regulyatoriv-ta-neyroregulyatoriv-u-zadachakh-optimalnogo-zashchidkodiyeu-regulyuvannya>

12. <http://csw.kart.edu.ua/article/view/308623/300178>

13.

https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%81%D1%82%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B7%D0%B0%D0%B1%D0%B5%D0%B7%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8

14. <https://dspace.khadi.kharkov.ua/bitstreams/157c0083-73d2-4620-a7e6-4e6a4f249c1b/download>

15. [Регулятори обертів електродвигунів – «Кладова Майстра Україна»](#)

16. [✓ Колекторний двигун: принцип дії і пристрій, регулятори обертів, контролер управління на ШІМ tda1085](#)

17. Шарейко Д. Ю., Шведененко І. О., 2014 Адаптивний регулятор у структурі сучасного комплектного електроприводу Вісник аграрної науки Причорномор'я. – 2014. – Вип. 2. - с. 192-199