

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: **Розробка системи стабілізації швидкості обертання колекторного двигуна**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕТ-42
спеціальнос
ті 141

електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Жулавський В. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник

Філюк Я.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Мовчан Л.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач
кафедри

Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент

Габрусєв Г.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Гурик О. Я. к.т.н., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Мовчан Л.Т., к.т.н., доц		

7. Дата видачі завдання 2 січня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	20.01.2026	
2	Аналітичний розділ	03.02.2026	
3	Проектно-конструкторський розділ	10.03.2026	
4	Розрахунковий розділ	14.04.2026	
5	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	05.05.2026	
6	Висновки	31.05.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки	26.05.2026	
8	Оформлення графічної частини	10.06.2026	

Студент

_____ (підпис)

Жулавський В. В.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Філюк Я.О.

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–42.
- Т. : ТНТУ, 2026.

Стор.57; рис.37 ; табл.0 ; джерел 13; додатків 2.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Розробка системи стабілізації швидкості обертання колекторного двигуна».

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження адаптивної системи керування швидкістю колекторного двигуна постійного струму з постійними магнітами на основі штучної нейронної мережі.

У першому розділі проведено аналіз колекторних двигунів постійного струму, принципів їх роботи та характеристик, а також огляду адаптивних систем керування і застосування штучних нейронних мереж у задачах регулювання електроприводів.

У другому розділі розроблено структуру нейромережевого регулятора, побудовано математичну та імітаційну модель двигуна, а також реалізовано алгоритм автономного й онлайн-навчання та порівняння з класичними ПІ і ПІД системами керування.

У третьому розділі виконано експериментальні дослідження та перевірка роботи системи керування, аналіз перехідних процесів і порівняння якості регулювання нейромережевого контролера з ПІ та ПІД регуляторами за різних режимів навантаження і збурень.

Ключові слова: колекторний двигун постійного струму, адаптивне керування, штучна нейронна мережа, електропривод, моделювання MATLAB Simulink.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Характеристики колекторного електродвигуна постійного струму	8
1.2 Системи адаптивного управління	9
1.2.1 Адаптивні регулятори з прямим зв'язком	10
1.2.2. Адаптивні регулятори із зворотним зв'язком	11
1.3 Адаптивний контролер зі штучними нейронними мережами	11
1.3.1 Рівняння руху системи колекторного приводу постійного струму	12
1.4 Штучна нейронна мережа з прямим зв'язком	14
1.5 Структура штучних нейронних мереж для електродвигуна	16
1.6 Висновки до розділу	18
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	19
2.1 Штучна нейронна мережа для системи ідентифікації та контролю	19
2.2 Автономне навчання для формування початкового набору вагових коефіцієнтів і затримок штучної нейронної мережі	22
2.3 Структура навчання штучної нейронної мережі для знаходження затримок і вагових коефіцієнтів	23
2.4 Порівняння систем управління колекторним двигуном постійного струму з постійними магнітами	26
2.5 Моделювання системи управління колекторного двигуна постійного струму на постійних магнітах	29
2.6 Висновки до розділу	36
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	37
3.1 Моделювання та перевірка моделі двигуна з керуванням штучною нейронною мережею	37

3.2 Відгук систем на різні ступені еталонної швидкості при повному навантаженні	38
3.3 Дослідження реакції системи керування на синусоїдальний сигнал задання швидкості	41
3.4 Дослідження впливу шуму на роботу системи керування	43
3.5 Аналіз роботи системи керування за умов навантаження	45
3.5 Висновки до розділу	47
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	49
4.1 Інструктажі з охорони праці	49
4.2 Захист від статичної електрики	51
4.3 Запобігання виникненню та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного походження на об'єктах електроенергетики	52
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	55
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	56

ВСТУП

Сучасний розвиток промислової автоматизації та електроприводної техніки характеризується постійним підвищенням вимог до точності, швидкодії та енергоефективності систем керування електричними двигунами. Особливої уваги потребують системи керування колекторними двигунами постійного струму з постійними магнітами, які широко використовуються в промисловості, робототехніці, транспортних системах, медичному обладнанні та сервоприводах завдяки високим динамічним властивостям і відносній простоті реалізації керування.

Разом із тим, зазначені двигуни є суттєво нелінійними об'єктами керування, параметри яких можуть змінюватися під впливом температури, навантаження, зносу механічних елементів та зовнішніх збурень. Це ускладнює забезпечення стабільної роботи системи при використанні класичних регуляторів типу ПІ та ПІД, які потребують точного налаштування параметрів і часто демонструють недостатню ефективність при змінних умовах експлуатації.

Зростає інтерес до інтелектуальних та адаптивних методів керування, які здатні автоматично підлаштовуватися до змінних характеристик об'єкта керування без необхідності точного математичного опису його моделі. Одним із найбільш перспективних підходів є використання штучних нейронних мереж, які володіють властивістю апроксимації складних нелінійних залежностей та здатні забезпечувати високу якість керування в умовах невизначеності.

Застосування нейромережевих технологій у системах електроприводу дозволяє реалізувати адаптивні алгоритми керування, що забезпечують підвищену точність відпрацювання заданих траєкторій, зменшення перерегулювання, покращення динамічних характеристик та підвищення стійкості до зовнішніх впливів. Окремо слід відзначити можливість онлайн-навчання, яке дозволяє системі адаптуватися до змін.

Актуальність роботи представляє необхідність розробки ефективних адаптивних систем керування електроприводами постійного струму, що базуються

на сучасних методах штучного інтелекту та здатні забезпечити високу якість регулювання в умовах невизначеності та змінних навантажень.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження адаптивної системи керування швидкістю колекторного двигуна постійного струму з постійними магнітами на основі штучної нейронної мережі.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання:

- Провести аналіз сучасні методи побудови адаптивних систем керування, зокрема регуляторів із прямим та зворотним зв'язком;
- дослідити принципи функціонування штучних нейронних мереж та можливості їх застосування в задачах керування електроприводами;
- розробити структуру нейромережевого регулятора для керування швидкістю двигуна;
- побудувати математичну та імітаційну модель електропривода в середовищі MATLAB Simulink/Simscape;
- реалізувати алгоритми автономного та онлайн-навчання нейронної мережі;
- провести моделювання роботи системи керування при різних режимах навантаження та заданих траєкторіях швидкості;
- виконати порівняльний аналіз роботи нейромережевого регулятора з класичними ПІ та ПІД регуляторами;

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Характеристики колекторного електродвигуна постійного струму

Експлуатаційні властивості двигунів постійного струму визначаються сукупністю їхніх електричних і механічних параметрів, які характеризують роботу машини в різних режимах. До основних показників належать робочі характеристики, електромеханічні та механічні характеристики, а також регульовальні властивості двигуна. Саме ці параметри дають змогу оцінити ефективність роботи електродвигуна, його надійність, економічність та можливість використання в конкретних умовах експлуатації.

Робочі характеристики відображають залежність основних експлуатаційних величин, таких як частота обертання, момент, струм якоря та коефіцієнт корисної дії, від навантаження на валу. Електромеханічні характеристики показують взаємозв'язок між швидкістю обертання та електричними параметрами машини, а механічні характеристики характеризують залежність частоти обертання ротора від електромагнітного моменту.

Механічні характеристики мають важливе значення для аналізу режимів роботи двигуна, оскільки вони визначають стійкість роботи електропривода, здатність двигуна витримувати зміну навантаження та забезпечувати необхідну швидкість обертання. Для різних типів колекторних двигунів постійного струму форма механічних характеристик відрізняється залежно від способу збудження. Порівняльні механічні характеристики колекторних двигунів постійного струму наведені на рисунку 1.1.

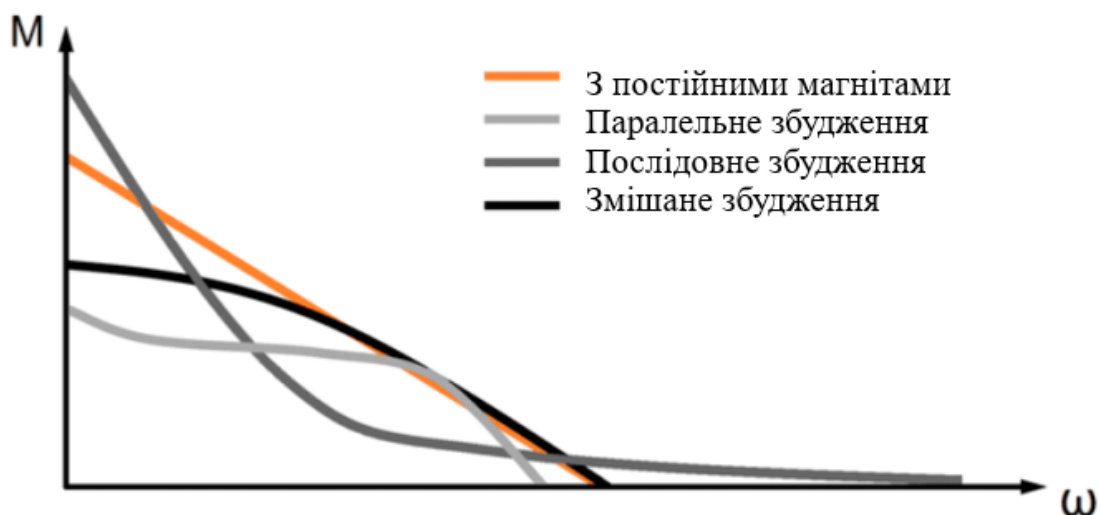


Рисунок 1.1 - Механічні характеристики колекторних двигунів постійного струму

1.2 Системи адаптивного управління

З самого початку проектування систем автоматичного управління існувала проблема пошуку правильної структури регулятора і його параметрів для обраного процесу. Основна складність, з якою доводиться стикатися, полягає в необхідності налаштування контролера, щоб він був предатний для всього діапазону його робочих точок, а не для однієї конкретної робочої точки. Для подолання цих труднощів на початку 1940-х були розроблені адаптивні контролери. У проміжку між 1960 і 1990 роками було розроблено багато фундаментальних знань теорії управління, таких як: теорія стійкості і простір станів, які пізніше добре зарекомендували себе.

Адаптивні регулятори характеризуються здатністю збирати інформацію про параметри поточного процесу безпосередньо під час управління системою, а також їх здатністю вносити зміни в закони управління на основі зібраної інформації. Більшість адаптивних контролерів можна розділити на: адаптивні контролери з прямим зв'язком і адаптивні контролери із зворотним зв'язком.

1.2.1 Адаптивні регулятори з прямим зв'язком

Ці системи базуються на тому факті, що зміна властивостей органу управління може сприйматися і впливати на процес управління. Реалізація адаптивної системи з прямим зв'язком представлена на рис. 1.2.

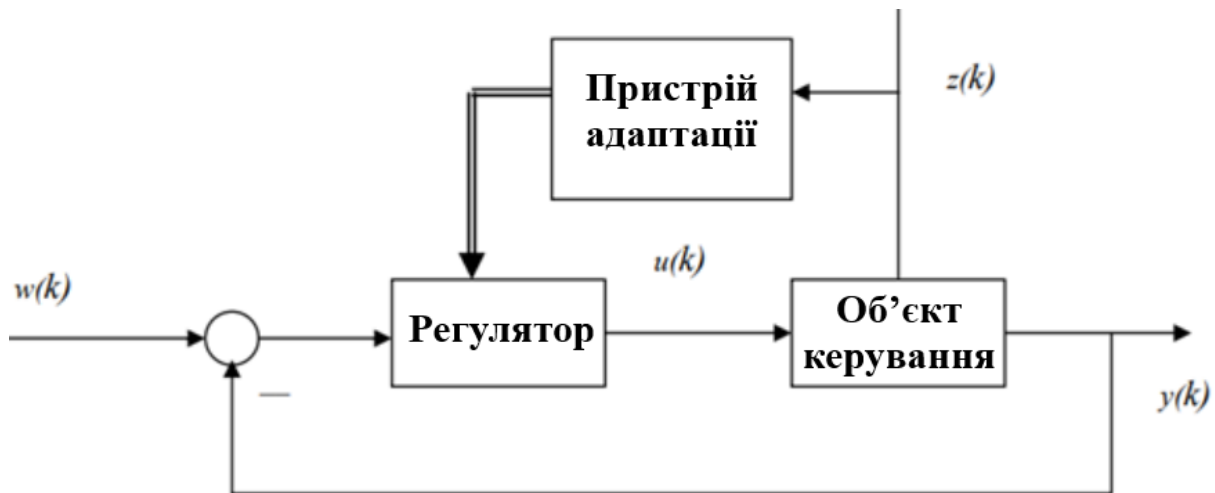


Рисунок 1.2 - Адаптивний регулятор з прямим зв'язком

Характерною ознакою сучасного рівня автоматизації є керування об'єктами в умовах апріорної невизначеності. Для систем прямого адаптивного керування типовими є багатовимірність, багатозв'язність, нелінійність і нестационарність процесів. Водночас основною проблемою таких систем залишається невизначеність, яка значною мірою ускладнює синтез керуючих впливів через недостатність інформації, необхідної для прийняття ефективних рішень.

Також особливістю цього регулятора є відсутність зворотного зв'язку з внутрішніми замкнутими сигналами для адаптації параметрів контролера. На рис. 1.2. вимірюється вхід збурюючого впливу $z(k)$ і адаптивний механізм змінює параметри контролера, в такій мірі, як це потрібно для збереження хорошої продуктивності. Однією з переваг адаптивних контролерів з прямим зв'язком є швидка реакція на зміни в об'єкті управління, завдяки сигналам з входу збурення і вихідним сигналам об'єкта управління.

У цього типу управління також є і недоліки, такі як: нехтування змінами, заснованими на невимірюваних сигналах або перешкодах, які можуть призводити до

непередбачуваних змін в поведінці об'єкта управління і уповільнити процеси і зміни параметрів.

1.2.2. Адаптивні регулятори із зворотним зв'язком

Адаптивні регулятори із зворотним зв'язком використовуються в тих випадках, коли зміну поведінки процесу неможливо визначити безпосередньо шляхом вимірювання зовнішніх сигналів. Основна структура адаптивного регулятора із зворотним зв'язком показана на рис. 1.3. Ці регулятори характеризуються наступними трьома факторами. По-перше, зміну властивостей процесу або його сигналів можна спостерігати шляхом вимірювання різних сигналів внутрішнього контуру управління. По-друге, на додаток до базового зворотного зв'язку контуру управління механізм адаптації призводить до додаткового рівня зворотного зв'язку. По-третє, замкнутий контур потоку сигналу дає другий рівень нелінійного зворотного зв'язку.

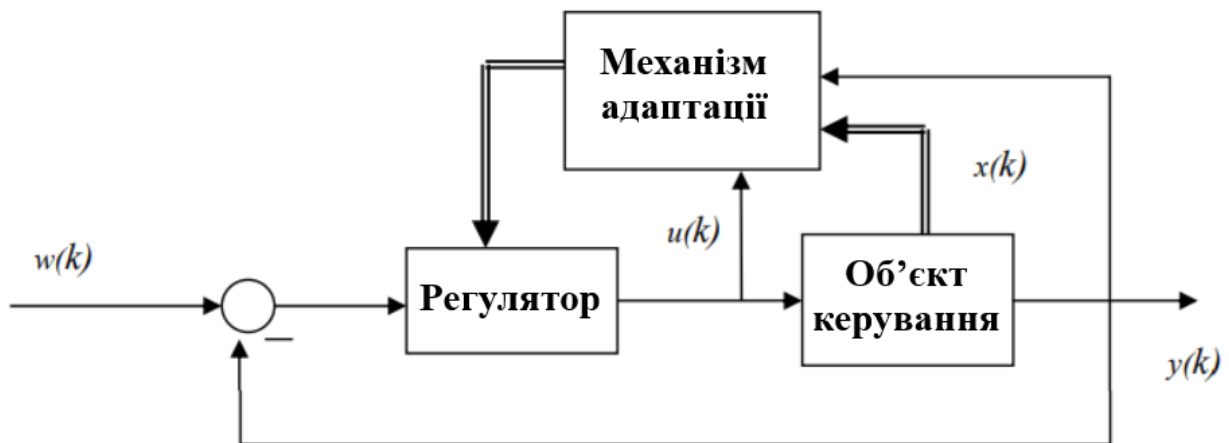


Рисунок 1.3 - Адаптивний регулятор із зворотним зв'язком

1.3 Адаптивний контролер зі штучними нейронними мережами

Людське мислення має як логічні, так і інтуїтивні або суб'єктивні сторони. Логічна сторона була розроблена і використана, в результаті чого з'явилися сучасні передові комп'ютери. Однак з'ясувалося, що жорсткі обчислення не можуть дати рішення для реальних, дуже складних і нелінійних систем. Для того щоб впоратися з

цією складністю, було використано інтуїтивне і суб'єктивне мислення людського розуму, що призвело до «м'яких» обчислень, що включають нейронні мережі.

Нещодавно розроблені додатки в різних областях довели, що чудові результати можна отримати за допомогою ШНМ. ШНМ забезпечує нелінійне відображення між входами і виходами системи електроприводу, без знання заздалегідь заданої моделі. Тому використання ШНМ в адаптивному управлінні може зробити системи надійними і ефективними.

У запропонованій роботі використовується адаптивна стратегія регулювання швидкості для колекторного двигуна з постійними магнітами, що передбачає онлайн оновлення коефіцієнтів та змін контролера ШНМ. Будова ШНМ заснована на зворотній динамічній моделі нелінійної приводної системи. Для підвищення надійності, яка є важливим критерієм високопродуктивного приводу, також використовується унікальна особливість адаптивної швидкості навчання.

1.3.1 Рівняння руху системи колекторного приводу постійного струму

Хоча в разі використання ШНМ в схемі управління двигуном немає необхідності в отриманні моделі двигуна, важливо зробити це з аналітичної точки зору, щоб закласти основу структури ШНМ для порівняння з ідеальною лінійною системою.

Рівняння руху колекторного двигуна з постійними магнітами описується наступними формулами:

$$v_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad (1.1)$$

$$e_b(t) = K_E \omega_r(t) \quad (1.2)$$

$$T_e(t) = K_T i_a(t) \quad (1.3)$$

$$T_e(t) = J \frac{d\omega_r(t)}{dt} + B\omega_r(t) + T_l(t) + T_F \quad (1.4)$$

де $v_a(t)$ - напруга на клеммах двигуна, $e_b(t)$ проти-ЕРС, i_a - струм якоря, $\omega_r(t)$ - швидкість обертання двигуна.

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

$$T_l(t) = \Psi(\omega_r(t)) \quad (1.5)$$

де функція $\Psi(\omega_r(t))$ залежить від характеру навантаження. Передбачається, що точне функціональне $\Psi(\omega_r(t))$ вважається невідомим.

Для отримання навчальних даних для ШНМ та застосування алгоритмів управління потрібна дискретна тимчасова модель двигуна постійного струму. Навантажувальний момент $T_l(t)$ рівняння (1.5) нелінійний і має форму:

$$T_l(t) = v\omega_r^2(t) \left[\text{sign}\{\omega_r(t)\} \right] \quad (1.6)$$

де v є константою, що використовується для моделювання нелінійного механічного навантаження. Хоча навантаження, виражене в (1.6), передбачається як тип вентилятора або пропелера для цілей моделювання, в реальному житті воно невизначене і зазвичай має невідомі нелінійні механічні характеристики. Для полегшення завдання управління система приводу двигуна постійного струму на постійних магнітах може бути виражена як система з одним входом і одним виходом (1.1 - 1.4), що дає можливість класифікувати регулятори за реалізованим законом регулювання.

$$\begin{aligned} L_a J \frac{d\omega_r^2(t)}{dt^2} + (R_a J + L_a B) \frac{d\omega_r(t)}{dt} + (R_a B + K_E K_T) \omega_r(t) + \\ + L_a \frac{dT_l(t)}{dt} + R_a \{T_l(t) + T_F\} - K_T v_a(t) = 0 \end{aligned} \quad (1.7)$$

Дискретно-часова модель отримується шляхом об'єднання рівнянь (1.6) і (1.7), а потім заміни всіх безперервних диференціалів на кінцеві різниці. Результуюче рівняння простору станів:

$$\begin{aligned} \omega_r(n+1) = & K_1\omega_r(n) + K_2\omega_r(n-1) + K_3[\text{sign}\{\omega_r(n)\}]\omega_r^2(n) + \\ & + K_4[\text{sign}\{\omega_r(n)\}]\omega_r^2(n-1) + K_5v_a(n) + K_6 \end{aligned} \quad (1.8)$$

де K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 і K_6 — це константи, які можуть бути виражені в термінах параметрів двигуна. Рівняння (1.8) може бути додатково змінено для отримання зворотної динамічної моделі приводної системи і буде виглядати як:

$$v_c(n) = f[\omega_r(n+1), \omega_r(n), \omega_r(n-1)] \quad (1.9)$$

де $v_c(n)$ керуюча напруга силового перетворювача, яка лінійно пропорційна напрузі на клеммах $v_a(n)$. Права частина рівняння (1.9) – це нелінійна функція швидкості ω_r /

Метою використання штучної нейронної мережі є відображення нелінійного зв'язку між напругою на клеммах $v_c(n)$ і швидкістю $\omega_r(n)$ колекторного двигуна в відповідності з (1.9). Похідна (1.9) дозволяє оцінити структуру штучної нейронної мережі, необхідну для управління швидкістю колекторного двигуна постійного струму на магнітах.

1.4 Штучна нейронна мережа з прямим зв'язком

Загальна архітектура штучної нейронної мережі з прямим зв'язком показана на рис. 1.4. Мережа складається з одного вхідного шару і одного або декількох прихованих шарів, за якими слідує вихідний шар. Кожен шар складається з декількох нейронів, а кожен нейрон має дві функції. Перша полягає в

підсумовуванні всіх виходів з попередніх шарів, помножених на відповідні коефіцієнти. Друга функція полягає в застосуванні лінійної або нелінійної (наприклад, сигмоїдальної) функції до цієї суми.

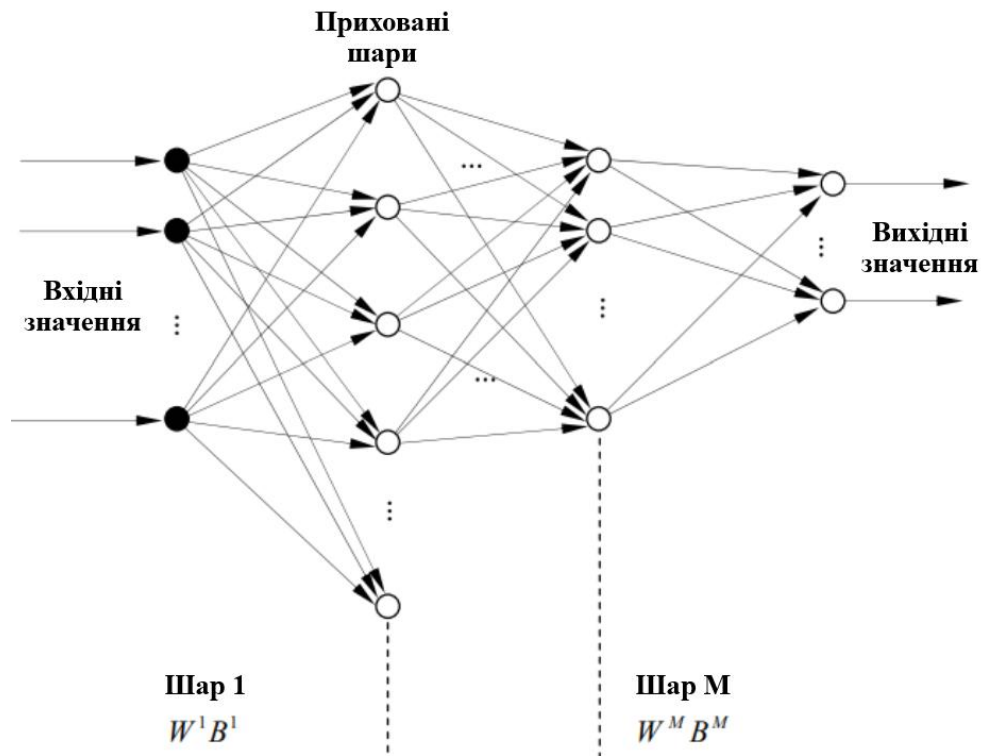


Рисунок 1.4 - Загальний графік структури FFNN

Фундаментальні рівняння, які описують входи і виходи мережі, можуть бути виражені наступним чином.

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

$$S_j^h(n) = \sum_{i=1}^N W_{ij}^h(n) I_i(n) \quad (1.10)$$

де W_{ij}^h це зв'язуюча вага між i -м нейроном вхідного шару і j -м нейроном прихованого шару, I_i це i -й вхід і N це кількість входів.

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

$$O_j^h(n) = f^h [S_j^h(n) + B_j^h(n)] \quad (1.11)$$

де B_j^h – це зміщення j -го нейрона, а f^h – це нелінійна функція активації, що виконується для кожного виходу нейрона прихованого шару. В основному використовуються тангенс сигмоїдальні або логарифмічно сигмоїдальні функції активації.

1.5 Структура штучних нейронних мереж для електродвигуна

Найбільш важливою задачею при проектуванні контролера з використанням штучної нейронної мережі є визначення кількості входів і виходів. Відповідно до рівняння руху (1.9) визначаються вхідні та вихідні значення для нейронної мережі. Величина прихованих шарів і кількість нейронів у прихованому шарі вибирається методом проб і помилок. При прийнятті рішення про кількість нейронів зазначається, що чим менше їх кількість, тим вона краща з точки зору як необхідного обсягу пам'яті, так і обчислювального навантаження. З іншого боку, занадто мала кількість може призвести до того, що штучна нейронна мережа не зможе точно відобразити необхідну функцію. Структура ШНМ, яка використовується для КДПМ, представлена на рис. 1.5.

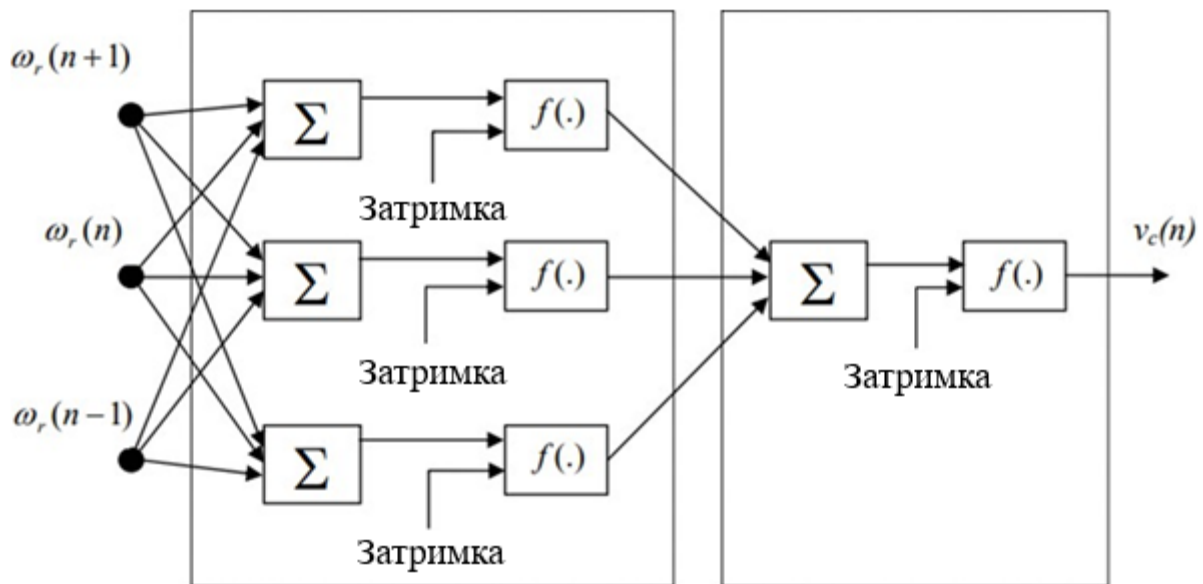


Рисунок 1.5 - Структура ШНМ для колекторного двигуна постійного струму на постійних магнітах

Функції активації, що використовуються в прихованому і вихідному шарах - це логарифмічна і тангенціальна сигмоїди, відповідно. Після того,

як буде виконано базове проектування структури штучної нейронної мережі, наступним кроком є встановлення ваг і затримок, шляхом навчання для отримання конкретної мети із заданими вхідними даними. Для цього використовується алгоритм зворотного поширення помилки, заснований на принципі мінімізації функції втрат між виходами і цільовим значенням штучної нейронної мережі з прямим зв'язком.

Навчання роботи штучної нейронної мережі може проводитися як в автономному режимі, так і в режимі онлайн, залежно від необхідних умов. Якщо коефіцієнти і затримки штучної нейронної мережі визначаються тільки за допомогою навчання в автономному режимі, то необхідно провести велике навчання з урахуванням практично всіх умов експлуатації системи, що практично неможливо для управління колекторним двигуном з постійними магнітами. Тому в цій роботі використовується поєднання офлайн і онлайн навчання.

1.6 Висновки до розділу

У даному розділі було розглянуто основні характеристики КДПС та особливості їх роботи залежно від способу збудження. Встановлено, що механічні та електромеханічні характеристики двигуна суттєво впливають на стабільність роботи електропривода, його швидкодію та ефективність у різних режимах навантаження.

Також було проаналізовано принципи побудови адаптивних систем керування, зокрема регуляторів із прямим та зворотним зв'язком. Встановлено, що використання адаптивного керування забезпечує ефективну роботу системи за умов зміни параметрів об'єкта керування та впливу зовнішніх збурень.

Окрему увагу приділено застосуванню штучних нейронних мереж у системах керування колекторними двигунами постійного струму з постійними магнітами. Розглянуто математичну модель двигуна та структуру нейронної мережі прямого поширення. Проведений аналіз підтверджує доцільність використання адаптивного нейромережевого регулятора для підвищення точності, надійності та ефективності роботи електропривода.

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Штучна нейронна мережа для системи ідентифікації та контролю

Як згадувалося в попередньому розділі, однією з відмінних рис штучної нейронної мережі є її здатність відображати будь-який нелінійний зв'язок між входом і виходом через навчання і без необхідності знання будь-якої заздалегідь визначеної моделі. Використовуючи цю властивість, було застосовано багат шарову структуру нейромережі. Ця структура, яка має адаптивну здатність, використовується для управління швидкістю колекторного двигуна на постійних магнітах (КДПС). Метою системи управління швидкістю двигуна постійного струму є отримання відповідного керуючого сигналу – напруги на клеммах двигуна постійного струму, так, щоб двигун міг відстежувати початкову швидкість $\omega_{ref}(n)$. При кожній вибірці миттєво знаходиться напруга керування $v_c^*(n)$ для колекторного двигуна постійного струму, яке генерується структурою ШНМ, яка поступає в коло підсилювача потужності, як представлено на рис. 2.1. ШНМ1 і ШНМ2, показані на рис. 2.1, мають однаковий набір коефіцієнтів і затримок, але різні набори вхідних і вихідних даних. У роботі структура ШНМ, що складається з одного прихованого шару, що має три нейрони з одним нейроном у вихідному шарі, дає задовільні результати.

Траєкторія завдання швидкості вибирається з використанням еталонної моделі другого порядку, що робить систему асимптотично стабільною. Еталонна модель описується за наступним рівнянням:

$$\omega_{ref}(n+1) = a_1\omega_{ref}(n) + a_2\omega_{ref}(n-1) + r(n) \quad (2.1)$$

де a_1 і a_2 – константи, обрані для еталонної траєкторії із заданою динамічною реакцією, а $r(n)$ – це обмежений вхідний сигнал еталонної моделі. Якщо передбачається, що помилка відстеження мала, а обрана еталонна модель

асимптотично стійка, то швидкість двигуна в $(n+1)$ момент часу може бути виражена з (2.1)

$$\omega_{ref}^*(n+1) = a_1\omega_{ref}(n) + a_2\omega_r(n-1) + r(n) \quad (2.2)$$

Отже, з однією вибіркою прогнозованої швидкості і двома вибірками фактичної швидкості, вхідна послідовність:

$$\{\omega_{ref}^*(n+1), \omega_r(n), \omega_r(n-1)\}$$

формується і використовується як вхід в ШНМ 2, як представлено на рис. 2.1.

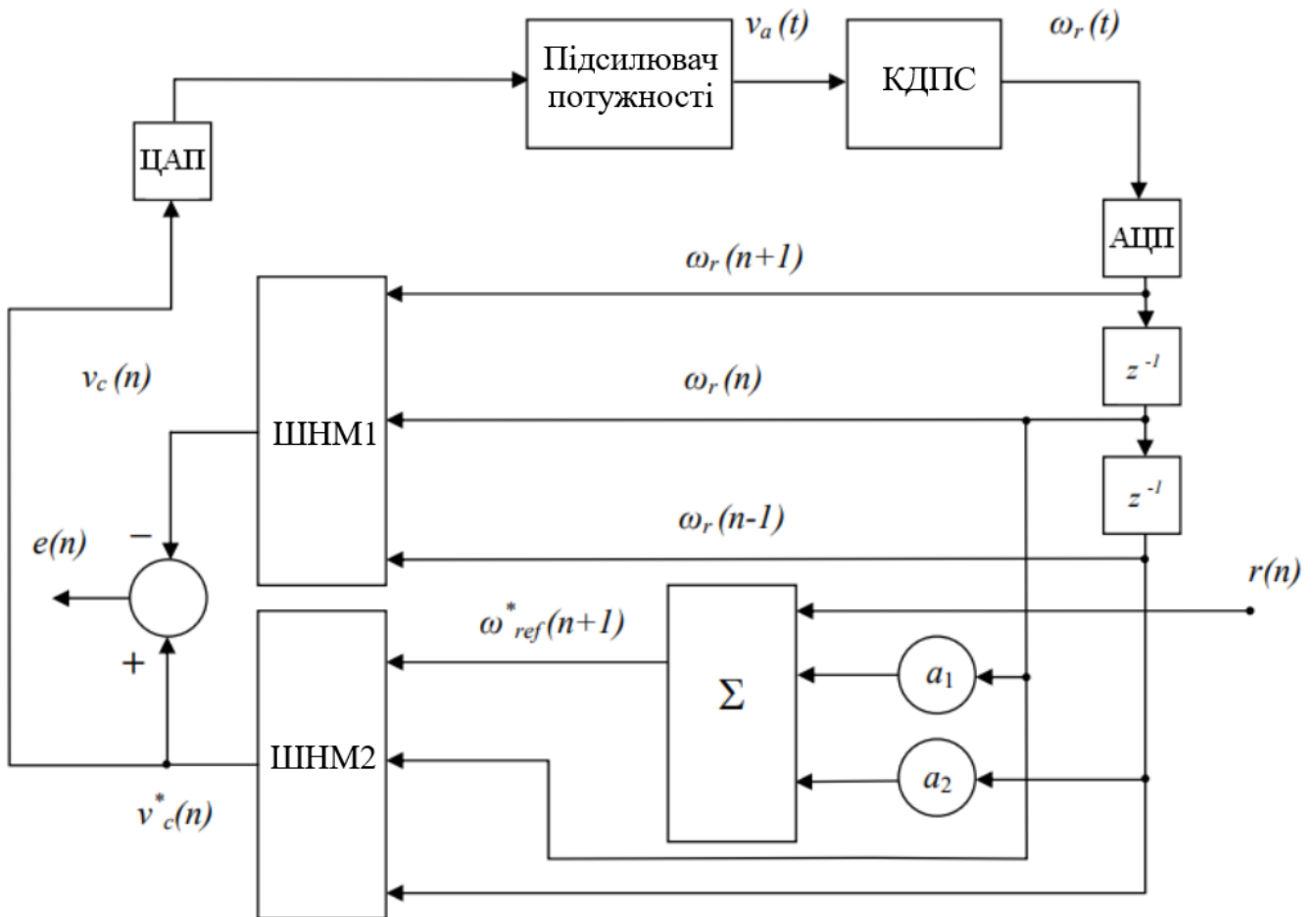


Рисунок 2.1. Блок-схема адаптивного контролера на основі ШНМ

Робота системи управління, показаної на рис. 2.1, відбувається наступним чином. Під час кожного екземпляра вибірки виконуються наступні кроки:

1. Набір вхідних даних $\{\omega_r(n+1), \omega_r(n), \omega_r(n-1)\}$ застосовується до контролера ШНМ 2 для генерації керуючого вихідного напруги $v_c^*(n)$.
2. $v_c^*(n)$ потім застосовується до системи двигуна / приводу через цифро-аналоговий перетворювач.
3. Система управління чекає переривання циклу контролера, що означає початок наступного періоду вибірки.
4. Вимірюється нова швидкість для конкретної вибірки.
5. Набір вхідних даних $\{\omega_r(n+1), \omega_r(n), \omega_r(n-1)\}$ застосовується до контролера ШНМ 1 для отримання вихідної напруги $v_c^*(n)$.
6. Вираховується помилка $e(n) = v_c^*(n) - v_c(n)$, де $v_c^*(n)$ – результат ШНМ2, а $v_c(n)$ – результат ШНМ 1.
7. Виконується зворотне поширення помилки через ШНМ2, коефіцієнти якої були оновлені.
8. Ті ж коригування коефіцієнта передаються і для ШНМ1.
9. Процедура повторюється з першого кроку з новим набором вхідних даних.

Модель навантаження задається формулою (1.6), проте в реальних практичних умовах це припущення виконується не завжди. Унаслідок цього виникає потреба в оперативному (адаптивному) оновленні вагових коефіцієнтів і зміщень штучної нейронної мережі. Проте завдання навчання в режимі онлайн може бути реалізоване без значних труднощів, а система може працювати стабільніше, якщо початкові вагові коефіцієнти та зміщення формуються за результатами автономного навчання. Початковий набір коефіцієнтів і затримок було отримано саме шляхом автономного навчання. Подальше оновлення вагових коефіцієнтів і затримок виконується лише тоді, коли похибка між фактичним вихідним сигналом і цільовим значенням штучної нейронної мережі перевищує заздалегідь встановлений поріг.

2.2 Автономне навчання для формування початкового набору вагових коефіцієнтів і затримок штучної нейронної мережі

Дані для навчання в автономному режимі можуть бути отримані за допомогою моделювання або експерименту. Якщо параметри двигуна доступні, то за рівнянням (1.8) може бути отримана випадкова генерація вхідних даних моделі $\{\omega_r(n+1), \omega_r(n), \omega_r(n-1)\}$. Відповідні цільові значення можуть бути згенеровані з використанням цих значень швидкості і констант K1, K2, K3, K4, K5, K6. Тому дані автономного тренування можуть бути отримані шляхом моделювання з використанням SIMULINK або будь-якого іншого подібного програмного забезпечення в схемі управління двигуном постійного струму з урахуванням навантаження.

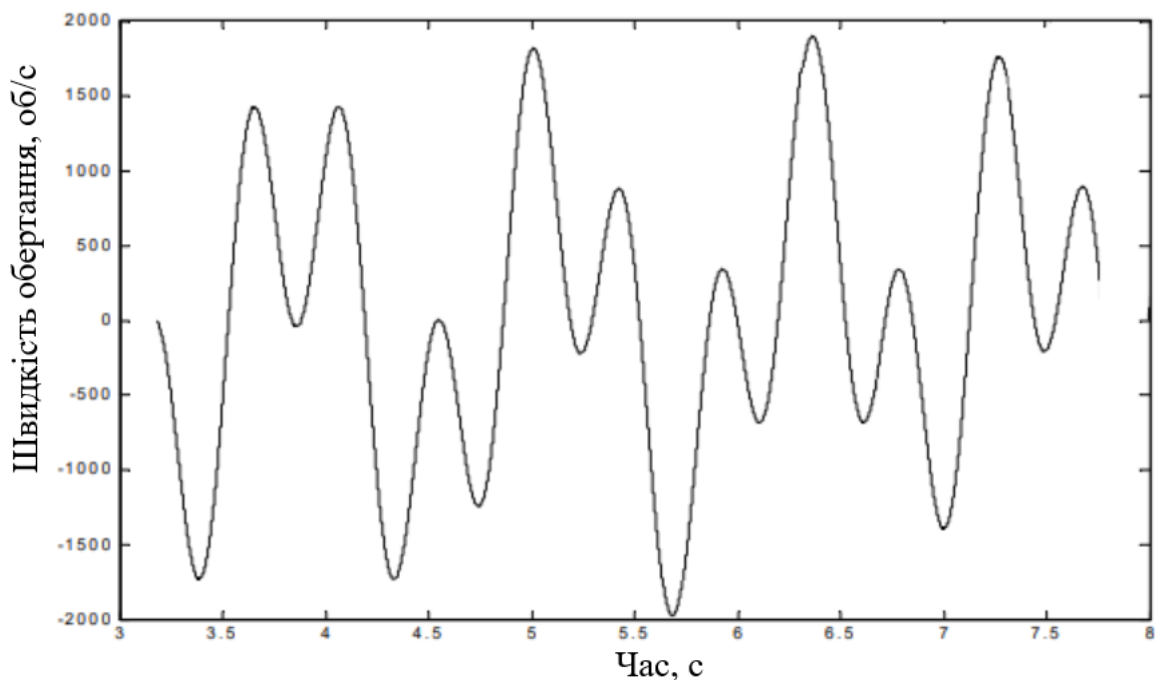


Рисунок 2.2 Траєкторія, згенерована для двигуна постійного струму для навчання ШНМ

Використовуючи метод моделювання, ми можемо отримати кращі результати, тому що в цьому випадку в ідеальній системі буде відсутня нелінійність в підсилювачі потужності. В експерименті колекторний двигун постійного струму

працював у розімкненому контурі по заданій довільній траєкторії. Траєкторія, яка була згенерована в MATLAB, представлена на рис. 2.2. Швидкість двигуна постійного струму і напруга живлення U_c для підсилювача вимірювалися з частотою 1 мс. Для запису даних було зроблено налаштування в Simulink. З запису даних були отримані ідеальні швидкості і напруги живлення для них для тренування ШНМ.

2.3 Структура навчання штучної нейронної мережі для знаходження затримок і вагових коефіцієнтів

Коефіцієнти і затримки двох штучних нейронних мереж оновлюються в кожен момент з використанням алгоритму зворотнього поширення помилки. Функція помилки, яка мінімізується, визначається як:

$$E(n) = \frac{1}{2} e^2(n) \quad (2.3)$$

$$e(n) = error = v_c^*(n) - v_c(n) \quad (2.4)$$

Дана траєкторія була отримана за допомогою блоків: Chirp Signal, Signal Generator і суматора. Коефіцієнти і зміщення вихідного шару оновлюються відповідно до наступних виразів:

$$W_{jk}^0(n+1) = W_{jk}^0(n) + \eta \delta_k^0(n) O_j^h(n) \quad (2.5)$$

$$B_{jk}^0(n+1) = B_{jk}^0(n) + \eta \delta_k^0(n) \quad (2.6)$$

де η – швидкість навчання, $\delta_k^0(n)$ – локальний градієнт на вихідному шарі, який може бути виражений як:

$$\delta_k^o(n) = e(n) \frac{\delta e(n)}{\delta O_k^o(n)} S_k^o(n) (1 - S_k^o(n)) O_j^h(n) \quad (2.7)$$

Вагові коефіцієнти та затримки прихованого шару оновлюються відповідно до такого виразу:

$$W_{ij}^h(n+1) = W_{ij}^h(n) + \eta \delta_j^h(n) I_i(n) \quad (2.8)$$

$$B_j^h(n+1) = B_j^h(n) + \eta \delta_j^h(n) \quad (2.9)$$

де $\delta_j^h(n)$ – локальний градієнт прихованого шару, який може бути виражений як:

$$\delta_j^h(n) = \delta_k^o(n) W_{jk}^o(n) [1 - S_j^h(n)]^2 \quad (2.10)$$

При впровадженні цієї установки помилка розраховується в кожен момент з певною частотою дискретизації, і, коли вона перевищує попередньо визначений рівень, вагові коефіцієнти і затримки оновлюються. Якщо похибка перебуває в межах заданого рівня, попередній набір вагових коефіцієнтів і зміщень зберігається для обчислення керуючої напруги $U_c(n)$. Деякі з основних проблем, з якими стикаються високопродуктивні моторні приводи, — це перевищення швидкості і час відгуку. Було помічено, що швидкість навчання ШНМ є ключовим фактором, що впливає на перевищення швидкості та час відгуку. Більш висока швидкість навчання призводить до перевищення швидкості, а повільна швидкість навчання робить час відгуку занадто повільним.

Тому для оперативного оновлення вагових коефіцієнтів і затримок штучної нейронної мережі в нашому контролері застосовується адаптивна швидкість навчання. Початкова швидкість навчання 0,0003 була отримана для реалізації

контролера з використанням ШНМ в режимі реального часу на основі остаточного значення швидкості навчання, що застосовується при навчанні в автономному режимі.

Були враховані наступні факти при виведенні адаптивної швидкості навчання η . Якщо різниця між заданою та фактичною швидкістю є значною, швидкість навчання поступово збільшується доти, доки фактична швидкість не наблизиться до заданого значення. Через більш високу швидкість навчання фактична швидкість може перевищувати розрахункову швидкість, що призводить до перерегулювання. Якщо відбувається перевищення швидкості двигуна – швидкість навчання знижується. Коли швидкість двигуна починає зменшуватися від перерегулювання, швидкість навчання знову збільшується, так, що фактична швидкість швидко досягає значень розрахункової швидкості. Деталі адаптивної швидкості навчання показані на блок-схемі рис. 2.3.

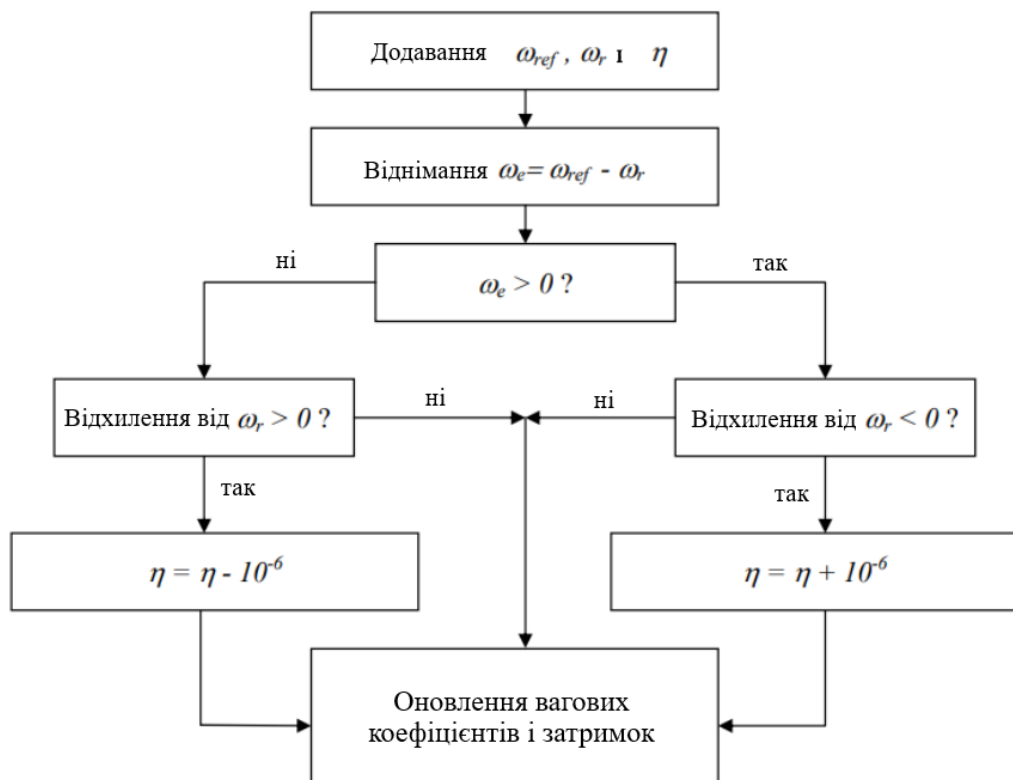


Рисунок 2.3 - Блок-схема для адаптивної швидкості навчання η

2.4 Порівняння систем управління колекторним двигуном постійного струму з постійними магнітами

Опір обмотки збудження та її індуктивність, використані в цьому дослідженні, представлені R_f та L_f відповідно. Опір якоря та його індуктивність показані R_a та L_a відповідно в динамічній моделі. Ефекти реакції якоря ігноруються при описі двигуна. Ця неточність виправдана, щоб зменшити наслідки реакції якоря, оскільки використовуваний двигун має обмотки або взаємну компенсацію. Фіксована напруга U_f подається на поле, а струм поля встановлюється на постійне значення. Лінійна модель простого двигуна постійного струму складається з механічного рівняння та електричного рівняння, які визначені в наступних рівняннях:

$$J_m \frac{d\omega}{dt} = K_m \cdot \phi \cdot I_a - b \cdot \omega - K_{load} \quad (2.11)$$

$$J_a \frac{dI}{dt} = V_a - R_a \cdot I_a - K_b \cdot \phi \cdot \omega \quad (2.12)$$

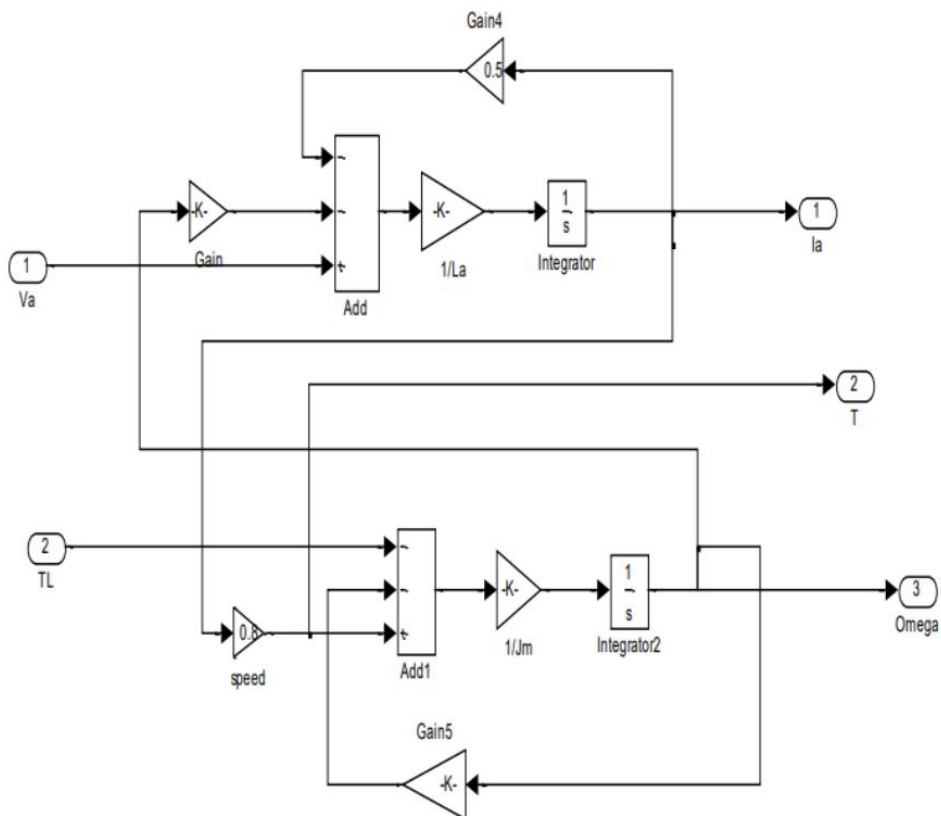


Рисунок 2.4 - Модель MATLAB Simulink колекторного двигуна постійного струму

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

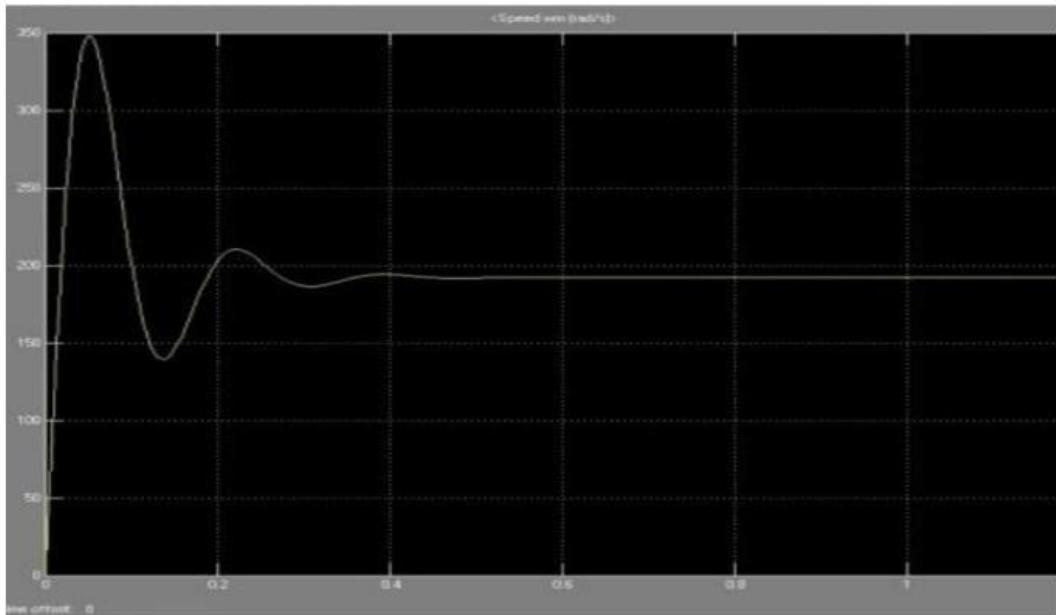


Рисунок 2.5 Швидкість двигуна постійного струму без контролера

Пік перевантаження і число коливань, отриманих на наведеній вище кривій, набагато більші і, отже, небажані. Ці параметри контролюються за допомогою різного роду контролерів.

На рис. 2.6 показана модель ПІ-регулятора для двигуна постійного струму.

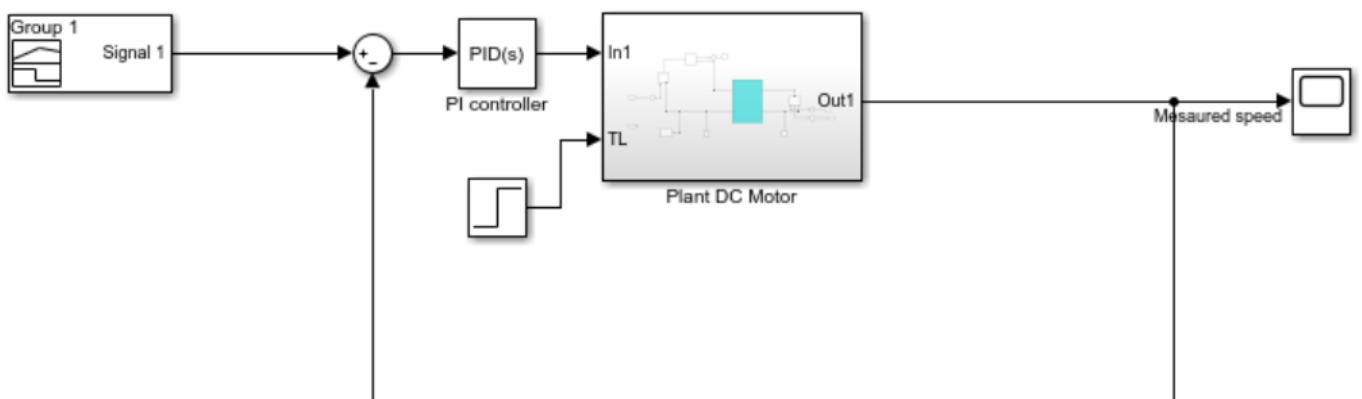


Рисунок 2.6 - Модель двигуна Matlab Simulink з ПІ-регулятором

На рис. 2.7 показана модель MatLab Simulink для управління швидкістю двигуна постійного струму з використанням ПІД-регулятора.

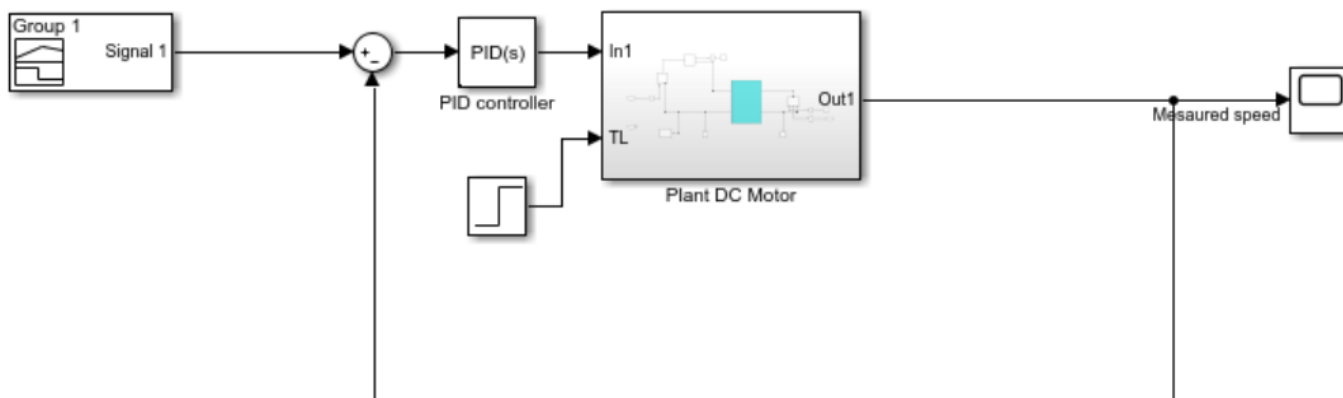


Рисунок 2.7 Модель двигуна Matlab Simulink з ПІД-регулятором

На рис. 2.8 показано модель регулятора з ШНМ для двигуна постійного струму. Модель застосовується для заданої швидкості, постійного навантаження та при раптовому навантаженні.

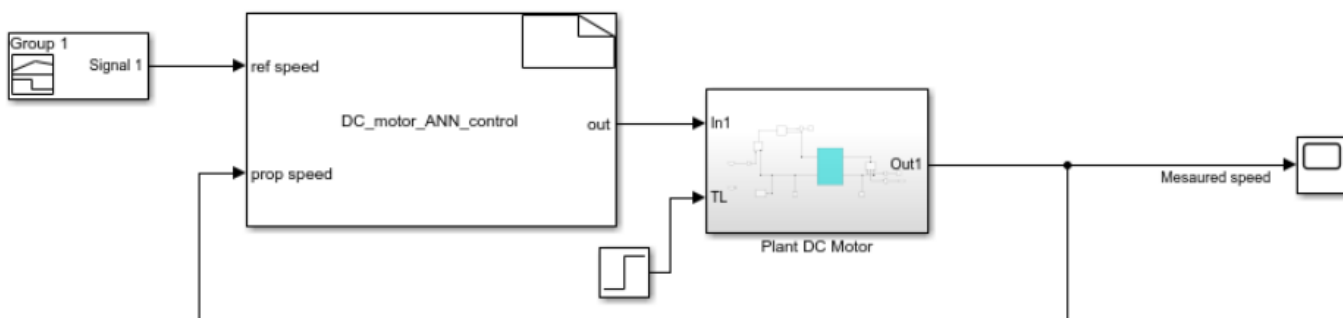


Рисунок 2.8 - Модель контролера штучної нейронної мережі

Результат моделювання двигуна постійного струму без використання контролера показаний на рис. 2.5. Цей рисунок можна порівняти з рис. 2.9.

На рис. 2.9 наведені осцилограми швидкості двигуна для всіх видів використаних контролерів.

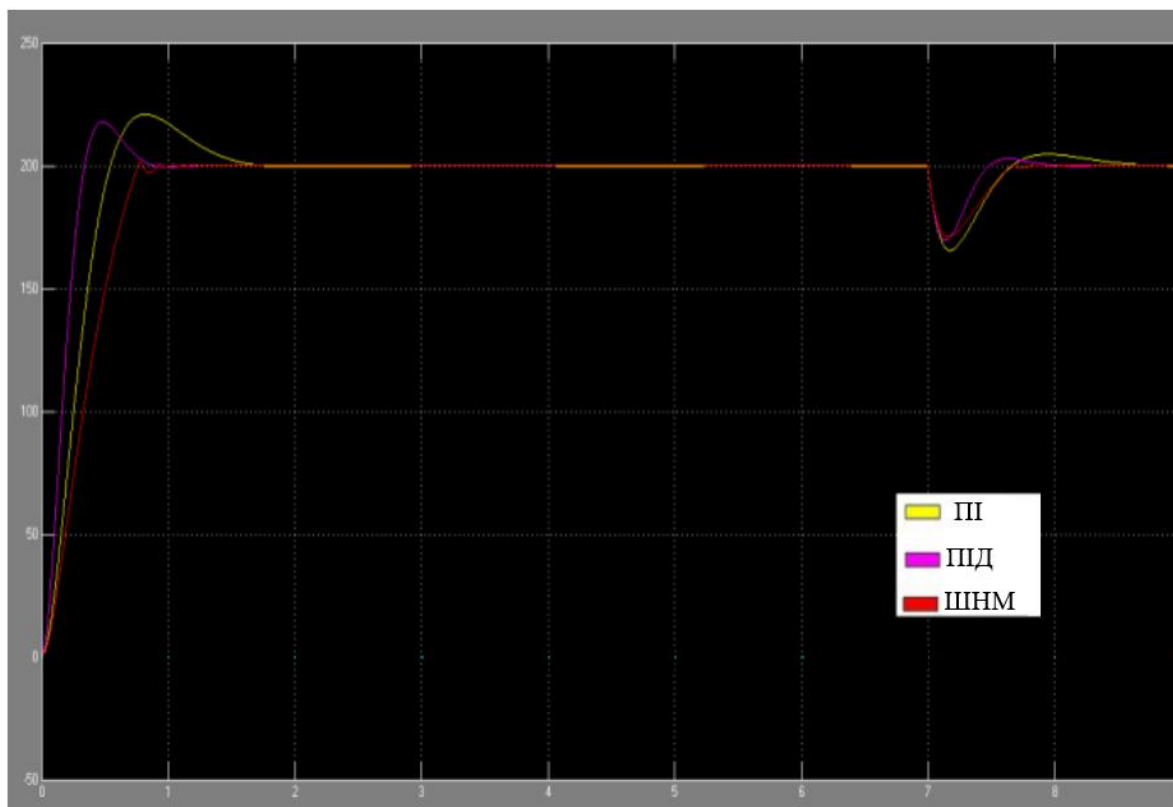


Рисунок 2.9 - Результат моделювання для двигуна постійного струму з використанням ПІ, ПІД і ШНМ контролера

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

- ШНМ мають кращу продуктивність завдяки зменшенню: статистичної помилки, максимального перерегулювання, часу наростання і часу заспокоєння
- ШНМ мають більш чутливі відгуки на порушення навантаження для класичного ПІ та ПІД-регулятора

2.5 Моделювання системи управління колекторного двигуна постійного струму на постійних магнітах

В якості досліджуваного об'єкта була розроблена і зібрана найпростіша модель колекторного двигуна постійного струму на постійних магнітах в середовищі MATLAB Simscape. Блоки в бібліотеці Simscape представляють реальні

фізичні компоненти. Отже, складні багатодоменні моделі можуть бути побудовані без необхідності виводити математичні рівняння з фізичних принципів.

Найпростіша електрична схема колекторного двигуна постійного струму на постійних магнітах представлена на рис. 2.10.

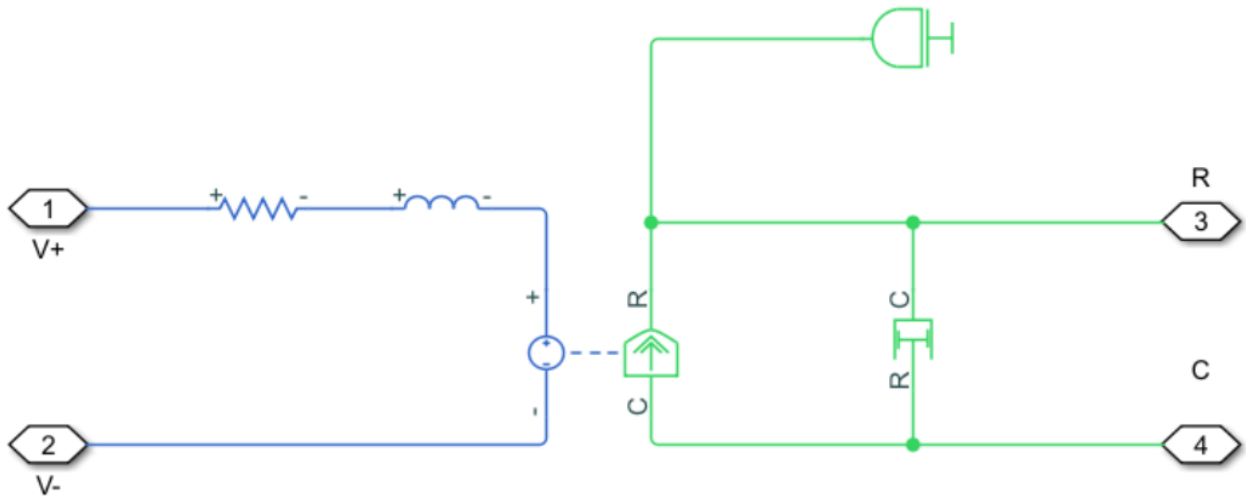


Рисунок 2.10 - Схема КДПС на постійних магнітах

Для даної моделі підставляємо розраховані раніше значення інерції, активного та індуктивного опорів, коефіцієнта пропорційності, а також коефіцієнта заспокоєння. Для додавання нелінійності в систему в схему був доданий нелінійний гасник коливань.

Для того щоб змоделювати реакцію цієї системи, необхідно додатково додати сенсорні блоки в модель для імітації вимірювання різних фізичних параметрів і джерело напруги для забезпечення збудження двигуна. Крім того, необхідні спеціальні блоки для взаємодії блоків Simscare з традиційними блоками Simulink, оскільки сигнали Simscare представляють фізичні величини з одиницями вимірювання, а сигнали Simulink є безрозмірними числами.

Схема двигуна з датчиками та елементами живлення показана на рис. 2.11.

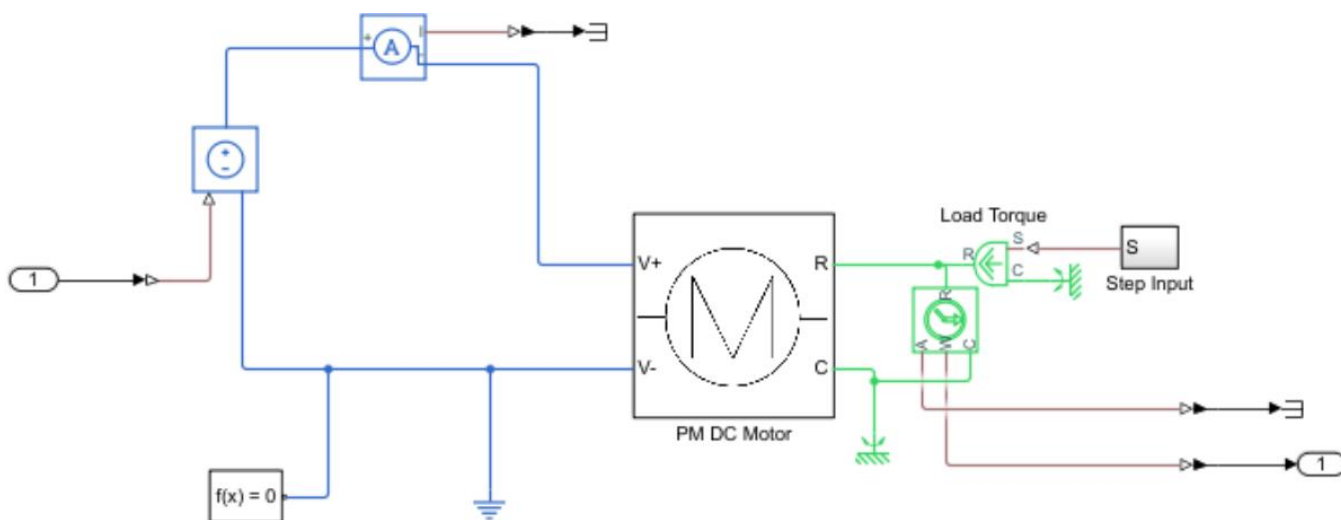


Рисунок 2.11 - Повна електрична схема КДПС на постійних магнітах

Блок ідеального датчика швидкості обертання являє собою пристрій, який вимірює різницю в кутовому положенні і кутовій швидкості між двома вузлами.

Блоки PS-Simulink перетворюють фізичні сигнали у вихідні сигнали Simulink, тоді як блок Simulink-PS, навпаки, перетворює вхідний сигнал Simulink у фізичний сигнал. Ці блоки можуть використовуватися для перетворення сигналів Simscape, які представляють фізичні величини з одиницями вимірювання, в сигнали Simulink, до яких явно не прив'язані одиниці вимірювання. Ці блоки, по суті, можуть виконувати перетворення одиниць вимірювання між фізичними сигналами і сигналами Simulink. Загалом, набір блоків Simscape використовується для моделювання фізичної установки, тоді як набір блоків Simulink використовується для моделювання контролера.

Далі в схему був доданий блок генерації сигналу, який можна налаштувати таким чином, щоб можна було налаштувати довільну траєкторію подачі напруги, блок завдання навантаження і блок з «білим шумом» – для того, щоб зробити систему більш нелінійною. Дана модель представлена на рис. 2.12.

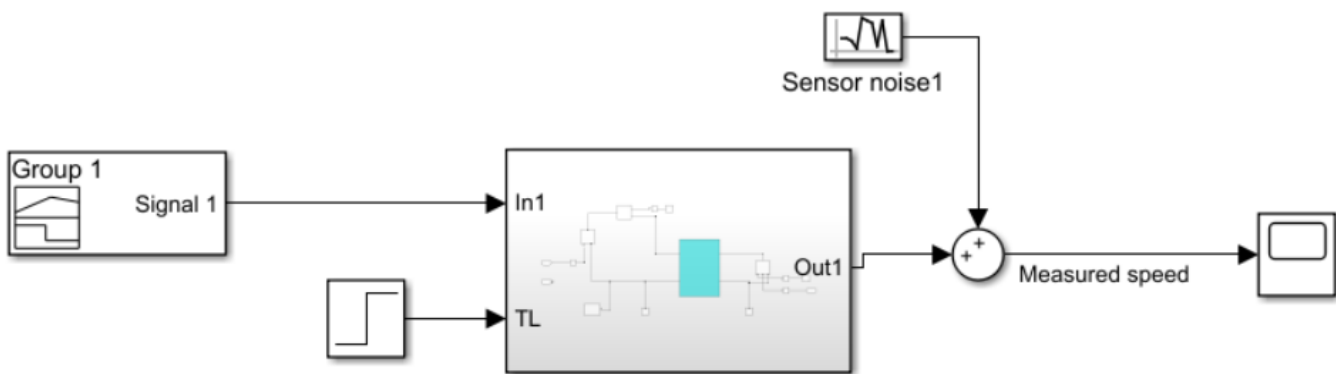


Рисунок 2.12 - Модель КДПС на постійних магнітах з блоками завдання сигналів

З метою навчання ШНМ необхідно вивести лінійну модель двигуна. Було зроблено двома різними способами для отримання більш достовірних даних програмою MATLAB.

Для отримання першої передавальної функції моделі був використаний інструмент «ідентифікація системи». У схему було додано два виводи в програмному середовищі для напруги і швидкості обертання відповідно, а також прибрані всі нелінійні елементи. Схема зображена на рис. 2.13.

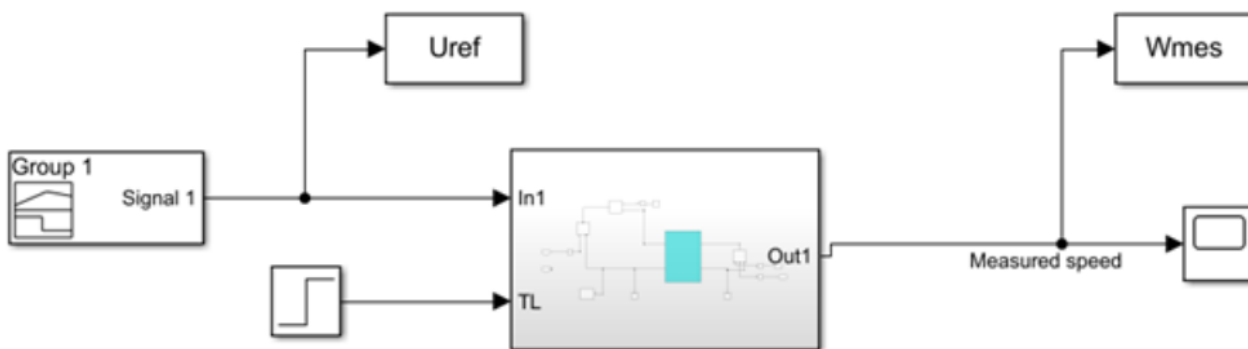


Рисунок 2.13 - Схема управління КДПС на постійних магнітах з висновками двома висновками в програмне середовище

Після чого за допомогою інструменту «ідентифікація системи» були отримані дані для побудови передавальної функції. Графічні результати ідентифікації системи показані на рис. 2.14.

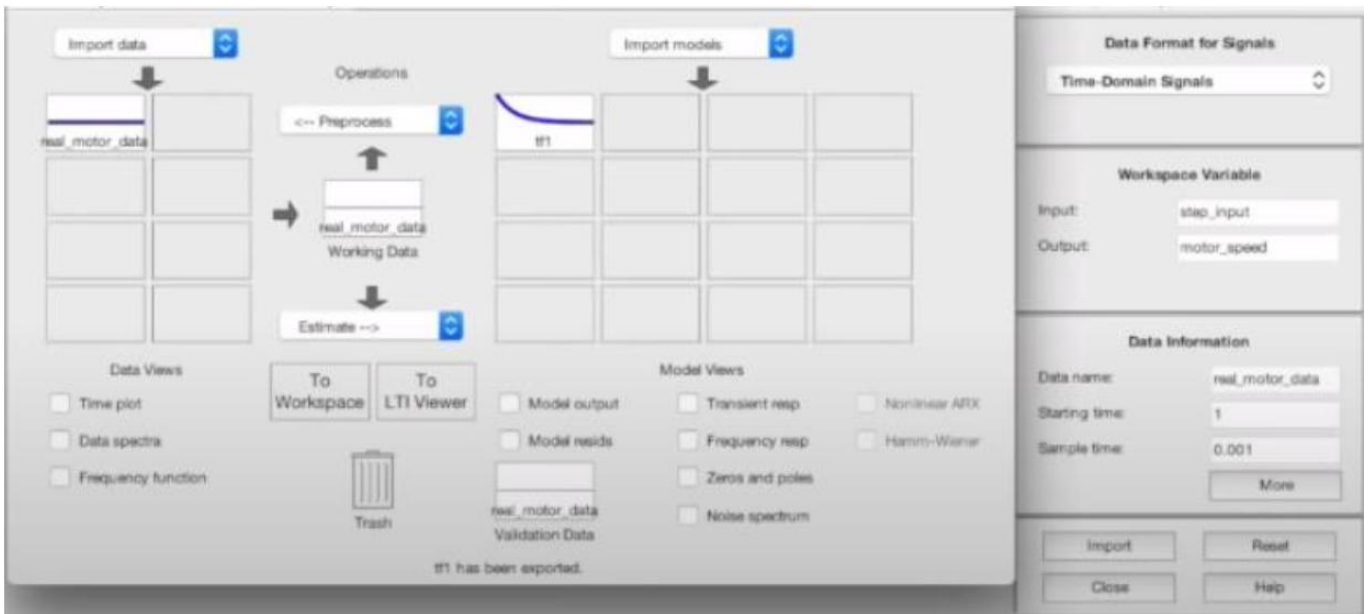


Рисунок 2.14 - Графічні результати ідентифікації системи

Передавальна функція була отримана за допомогою виведення в консоль MATLAB команди `tf1`, яка відображає дані, записані в файл `tf1`.

Другий спосіб полягає в безпосередній лінеаризації моделі за допомогою додавання входу і виходу відкритого контуру за допомогою точок лінійного аналізу і подальшого аналізу системи.

Оскільки дані для передавальних функцій були обчислені двома різними способами і дали не ідентичні результати, необхідно перевірити правильність лінійних передавальних функцій. Для цього необхідно порівняти вихідну швидкість для двох лінійних моделей і швидкість для побудованої раніше нелінійної моделі при однаковому входному сигналі, без навантаження. Схема для зняття цих даних наведена на рис. 2.15.

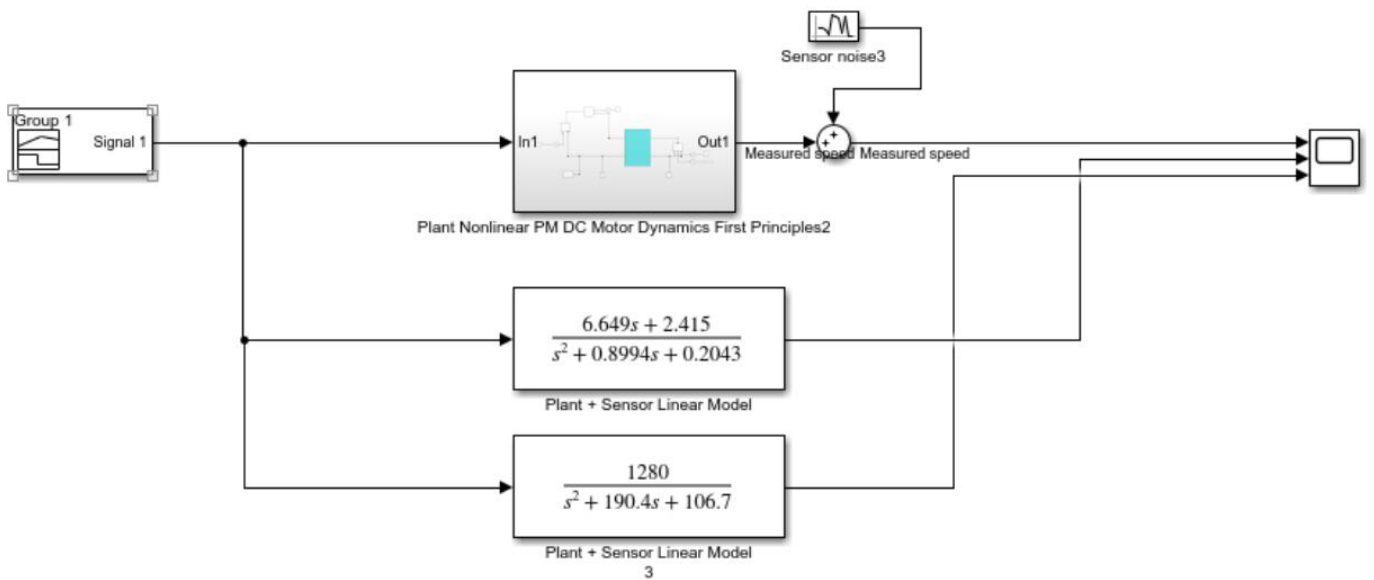


Рисунок 2.15 - Схема з двома лінеаризованими передавальними функціями і розробленою нелінійною моделлю двигуна

Дані, отримані з осцилограми, наведені на рис. 2.16.

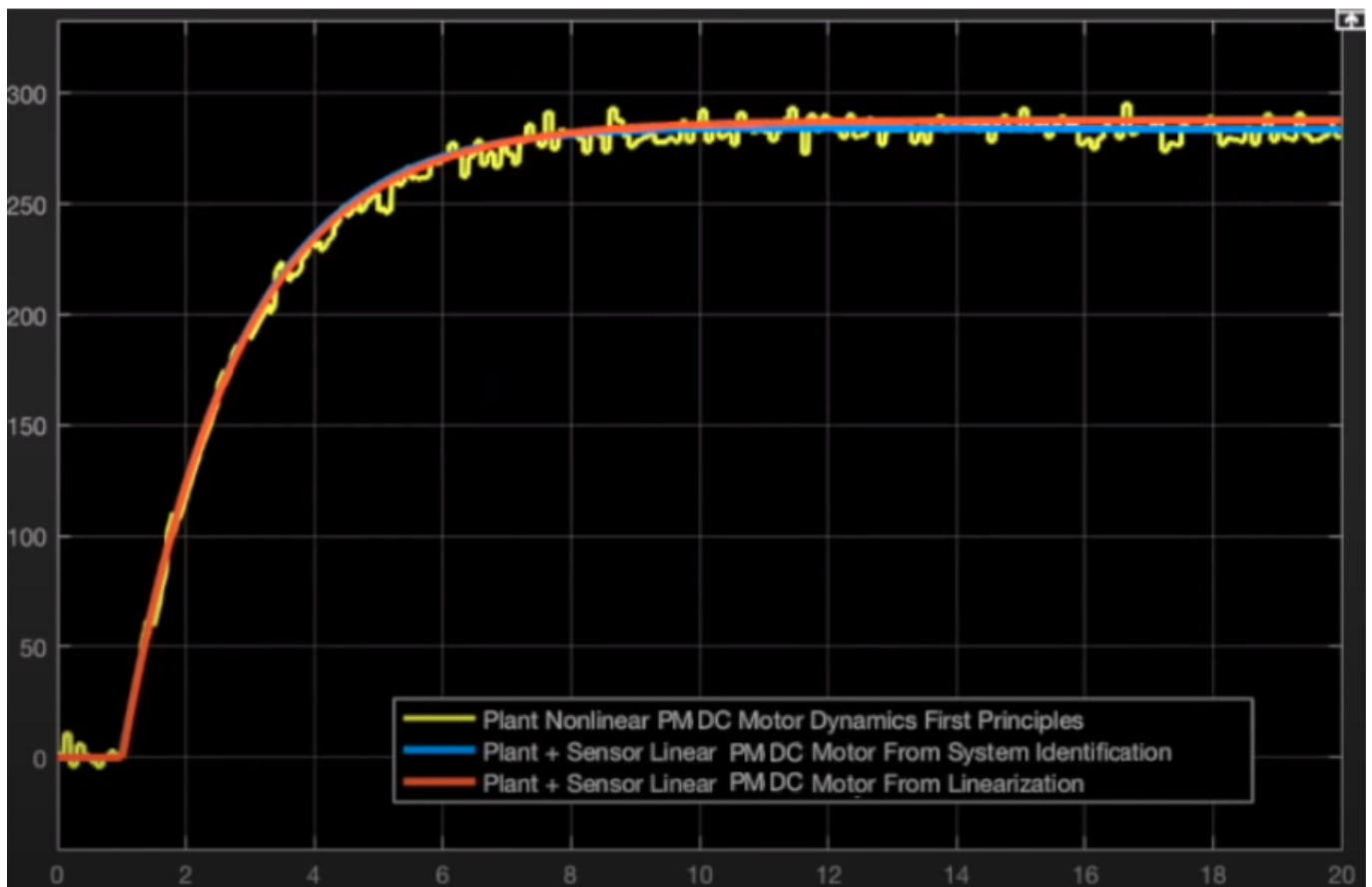


Рисунок 2.16 - Осцилограма вихідних швидкостей

За даними з рис. 2.16 видно, що обидві лінеаризовані моделі досить точно описують траєкторію нелінійної моделі, а значить обидві можуть використовуватися для навчання ШНМ.

Для обраної раніше траєкторії досліджуваного об'єкта управління за допомогою консолі робочого простору MATLAB були отримані початкові дані з першої лінеаризованої передавальної функції, оскільки вона показала найменшу похибку від нелінійної траєкторії.

Модель раніше розробленого регулятора з використанням ШНМ представлено на рис. 2.17.

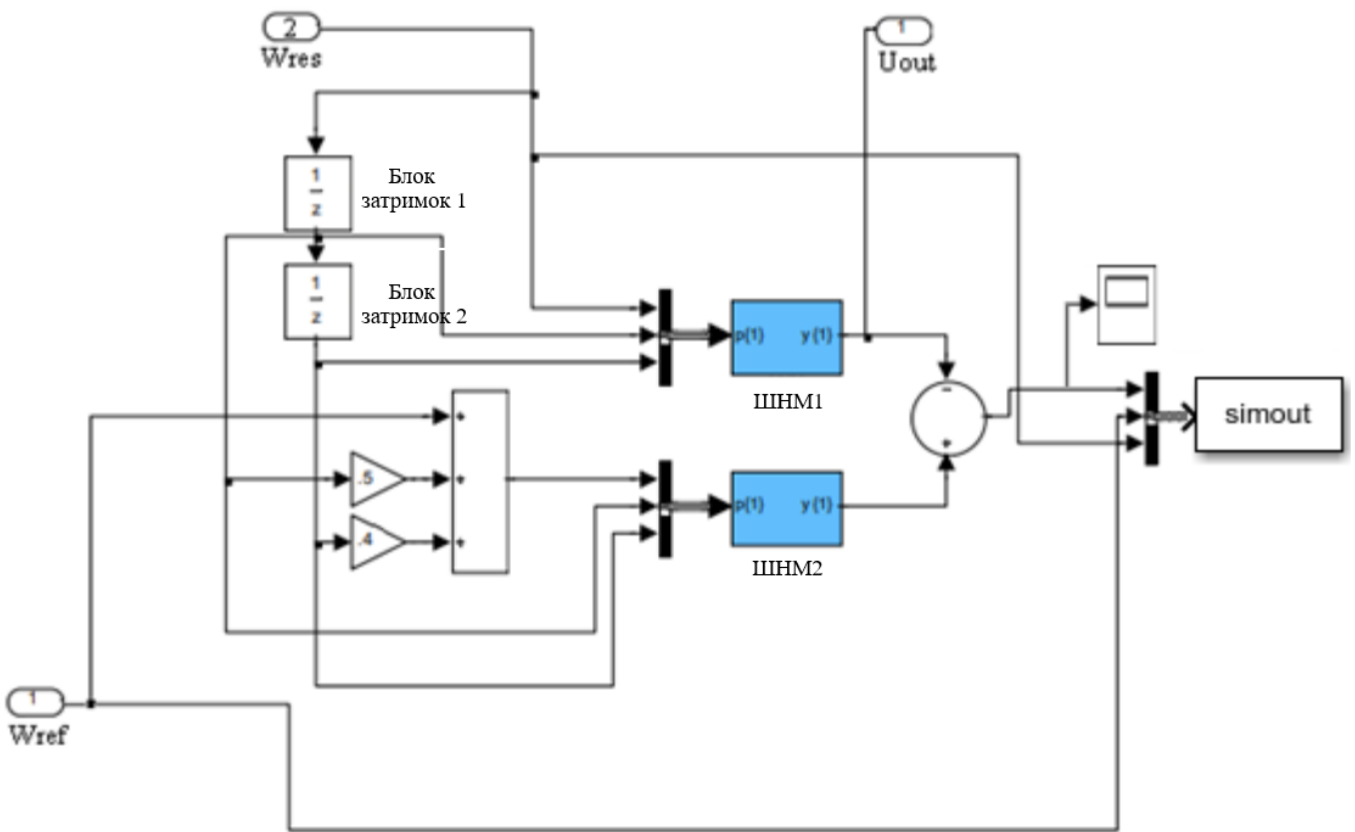


Рисунок 2.17 - Модель регулятора на ШНМ

Блоки ШНМ1 та ШНМ2 представлені у вигляді двох s-функцій. Фінальна схема управління колекторного двигуна постійного струму з постійними магнітами і оголошеною раніше траєкторією (рис. 2.2) представлена на рис. 2.18.

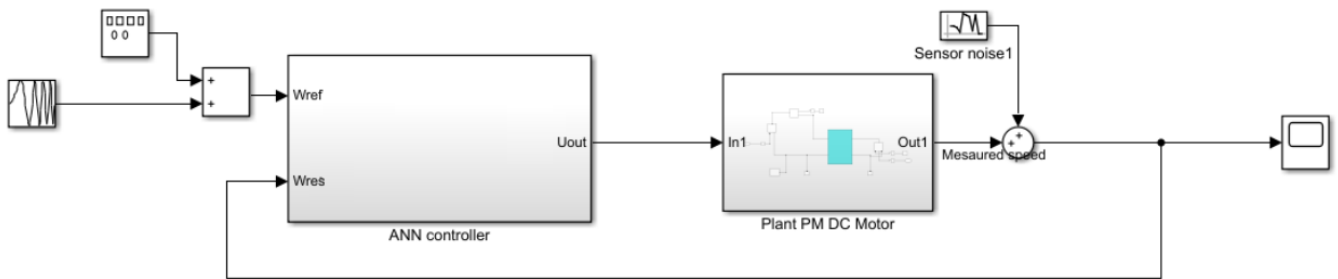


Рисунок 2.18 Схема управління КДПС з постійними магнітами

2.6 Висновки до розділу

У другому розділі У даному розділі було розроблено та досліджено адаптивну систему керування колекторним двигуном постійного струму з постійними магнітами на основі ШНМ. Розглянуто структуру нейромережевого контролера, принцип його роботи та алгоритми автономного й онлайн-навчання для оновлення вагових коефіцієнтів і затримок.

Проведено моделювання системи в середовищі MATLAB Simulink та Simscare, побудовано математичну та лінеаризовану моделі двигуна, а також здійснено їх порівняльний аналіз. Отримані результати підтвердили адекватність розроблених моделей і можливість їх подальшого використання для навчання штучної нейронної мережі.

Також виконано порівняння класичних ПІ- та ПІД-регуляторів із нейромережевим контролером. Встановлено, що застосування штучної нейронної мережі дає змогу зменшити перерегулювання, скоротити тривалість перехідного процесу та підвищити точність регулювання швидкості двигуна при зміні навантаження.

3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Моделювання та перевірка моделі двигуна з керуванням штучною нейронною мережею

Після проведення автономної підготовки даних для моделі зі штучною нейронною мережею із заданою траєкторією швидкості, показаною на рис. 2.2, були проведені деякі випробування для перевірки достовірності моделі двигуна зі штучною нейронною мережею. Щоб перевірити правильність системи управління і стабілізації, в Simulink була змінена і налаштована схема рис. 2.18. У цій схемі двигун і модель ШНМ одночасно працювали в розімкненому контурі, слідуючи відомій довільній траєкторії. Ця траєкторія відрізняється від траєкторії, використовуваної для навчання структури ШНМ. Реакція двигуна, і реакція ШНМ показані на рис. 3.1. Помилка між двома траєкторіями показана на рис. 3.2.

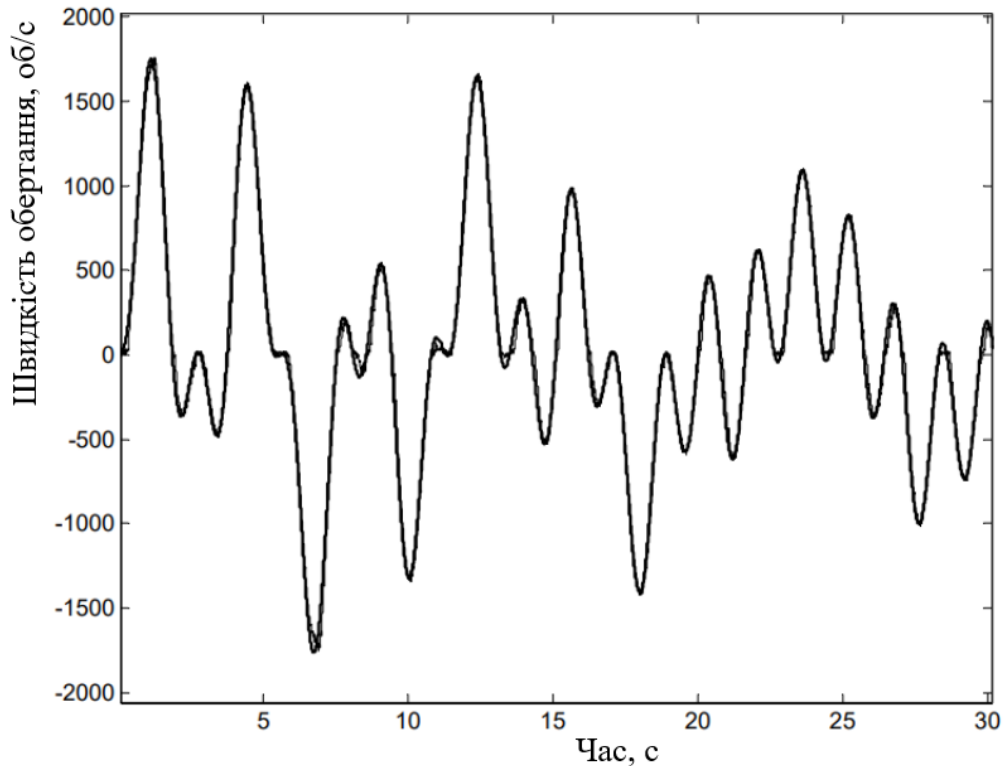


Рисунок 3.1 - Вихідна траєкторія швидкості двигуна і моделі ШНМ

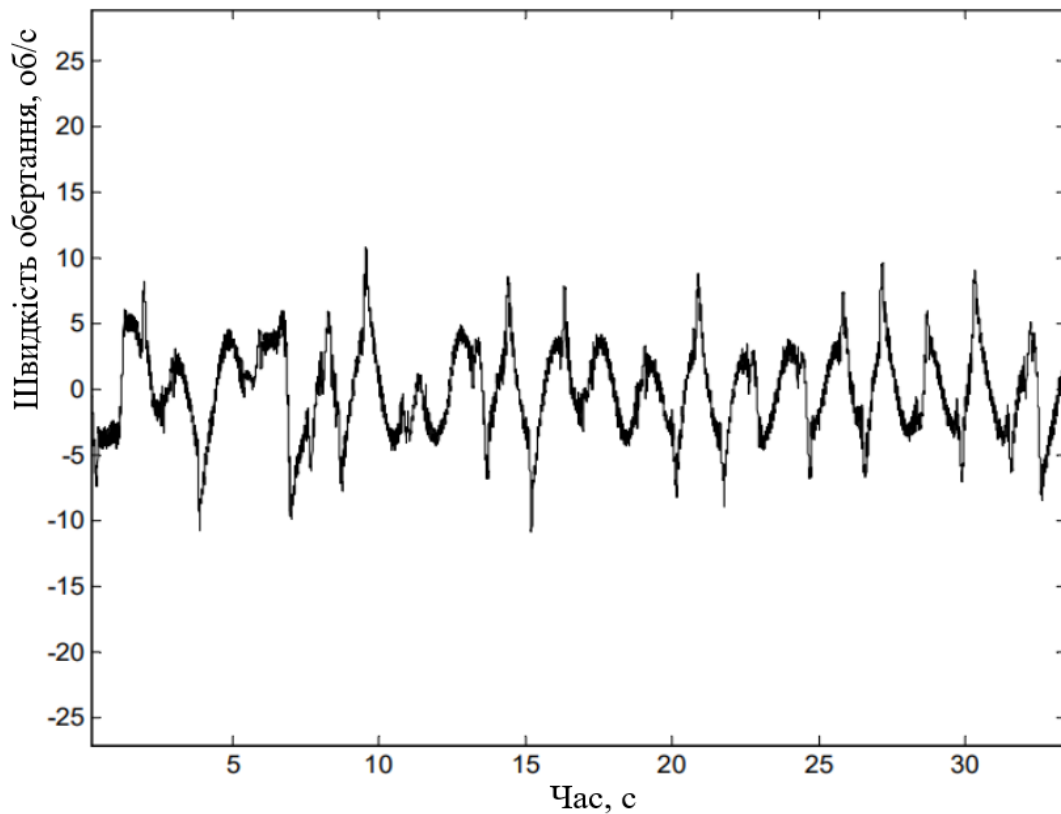


Рисунок 3.2 - Помилка між двома вихідними траєкторіями

При порівнянні двох траєкторій, траєкторії вихідної швидкості двигуна і траєкторії вихідної швидкості моделі приводу двигуна ШНМ, як показано на рисунку 3.1, видно, що дві траєкторії дуже близькі одна до одної. Це вказує на те, що модель приводу двигуна штучної нейронної мережі, яка була створена для імітації моделі двигуна, досить точно описує реальний двигун. Більш того, це можна перевірити, спостерігаючи помилку між двома траєкторіями. Ця помилка представлена на рис. 3.2. У той час як двигун працював на швидкості більше 1500 об/хв, помилка в швидкості становить менше 10 об/хв, що є дуже хорошим результатом для регулювання.

3.2 Відгук систем на різні ступені еталонної швидкості при повному навантаженні

Для отримання даних графіків була використана модель з рис. 2.18 в робочий простір MATLAB. Рисунки 3.3 – 3.5 показують швидкісні характеристики

адаптивного контролера на основі ШНМ, а також ПД і ПІ регуляторів відповідно. На цих рисунках пунктирні криві представляють вихідні дані $\omega_{ref}^*(n)$, суцільні криві представляють реакцію систем автоматичного управління.

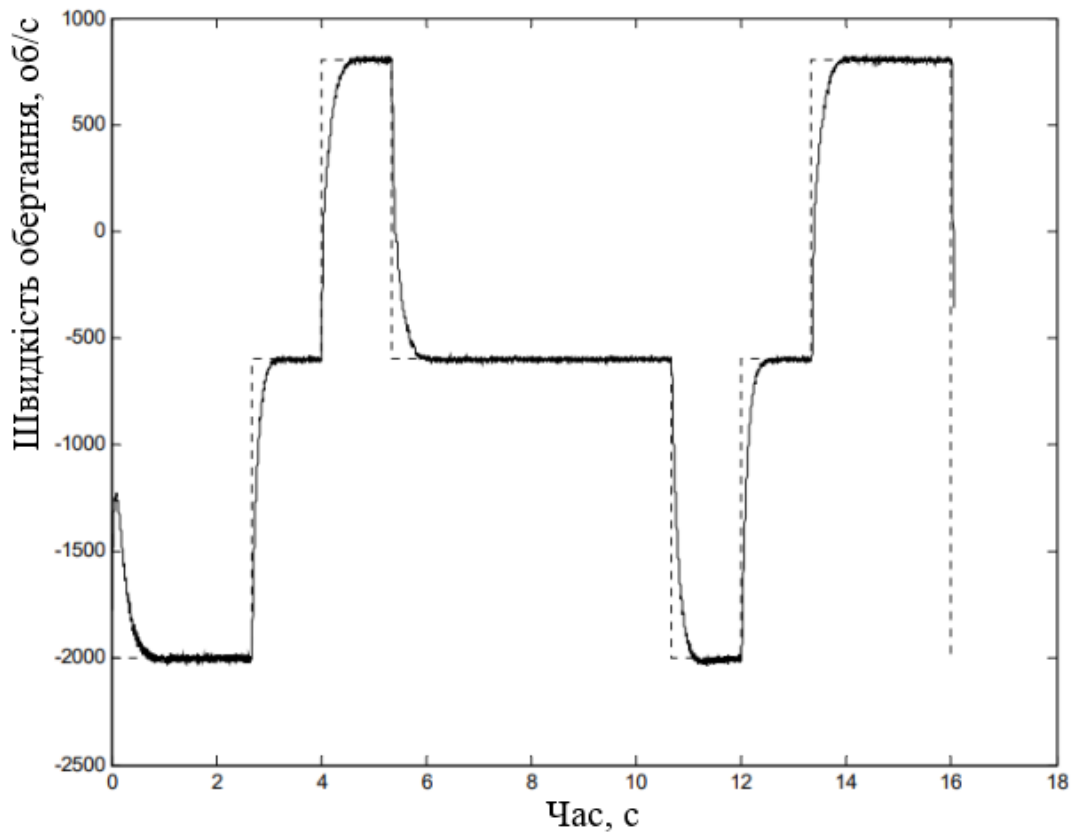


Рисунок 3.3 - Експериментальний результат контролера на основі ШНМ зі змінами еталонної швидкості

З рисунків видно, що адаптивний контролер на основі ШНМ працював набагато краще, ніж два інших контролери. І у ПД, і у ПІ регуляторів виникла проблема перерегулювання при зміні еталонної швидкості.

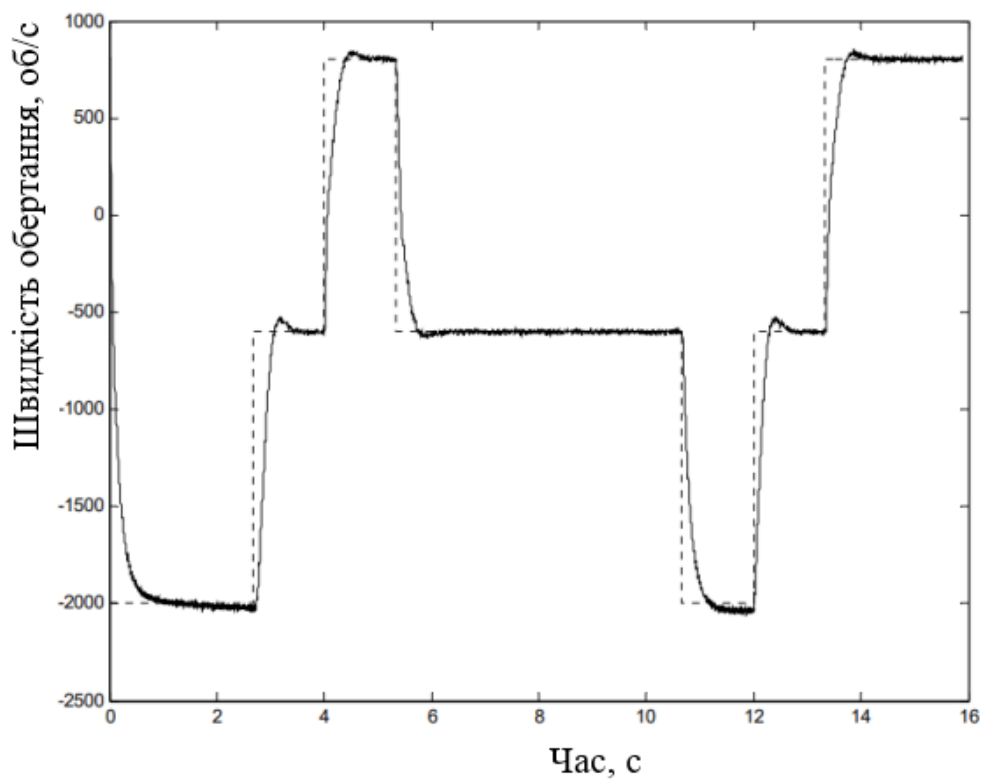


Рисунок 3.4 - Експериментальний результат ПІД-регулятора зі змінами еталонної швидкості

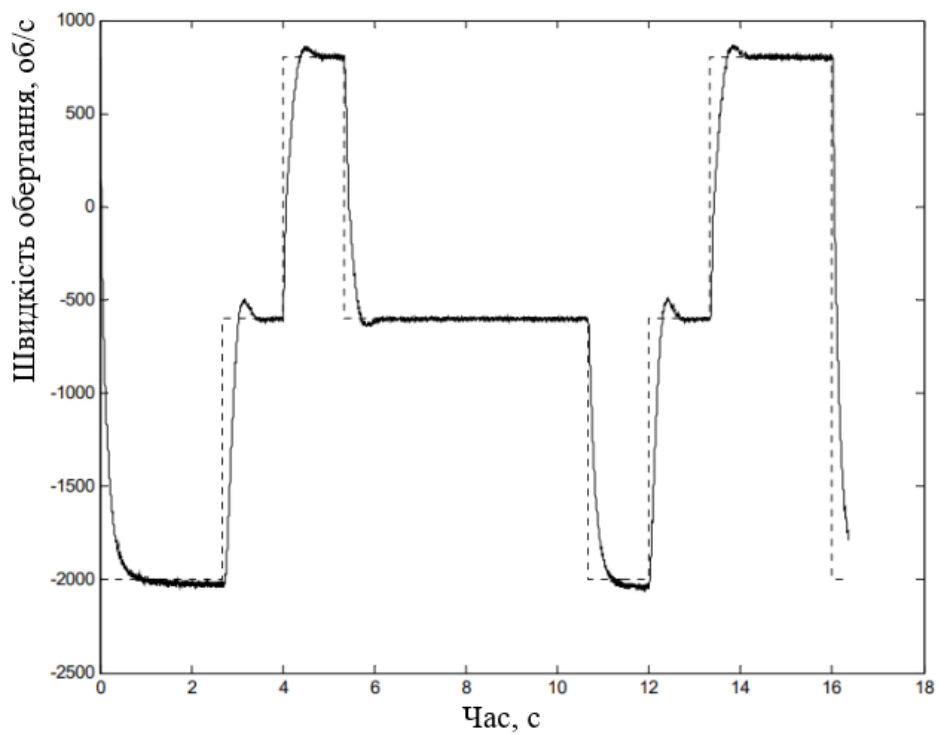


Рисунок 3.5 - Експериментальний результат ПІ-регулятора зі змінами еталонної швидкості

Контролери ПД і ПІ можуть бути перепроєктовані для більш перевантаженого стану, щоб зменшити перерегулювання, але в таких випадках було помічено, що час наростання ставав повільнішим. Можна також помітити, що показники стаціонарних помилок ШНМ також були значно кращими, ніж для ПІ і ПД регуляторів. Реакція швидкості адаптивного контролера на основі ШНМ була більш стійкою до зміни робочих умов покрокових змін еталонної швидкості через оперативне налаштування вагових коефіцієнтів і зміщень в моделі штучної нейронної мережі.

3.3 Дослідження реакції системи керування на синусоїдальний сигнал задання швидкості

Були проведені деякі тести для отримання фактичних і заданих швидкісних траєкторій для входу синусоїдального типу. На рисунках 3.6 – 3.8 показані фактична і задана траєкторії швидкості адаптивного контролера на основі штучної нейронної мережі, ПД-регулятора і ПІ-регулятора відповідно.

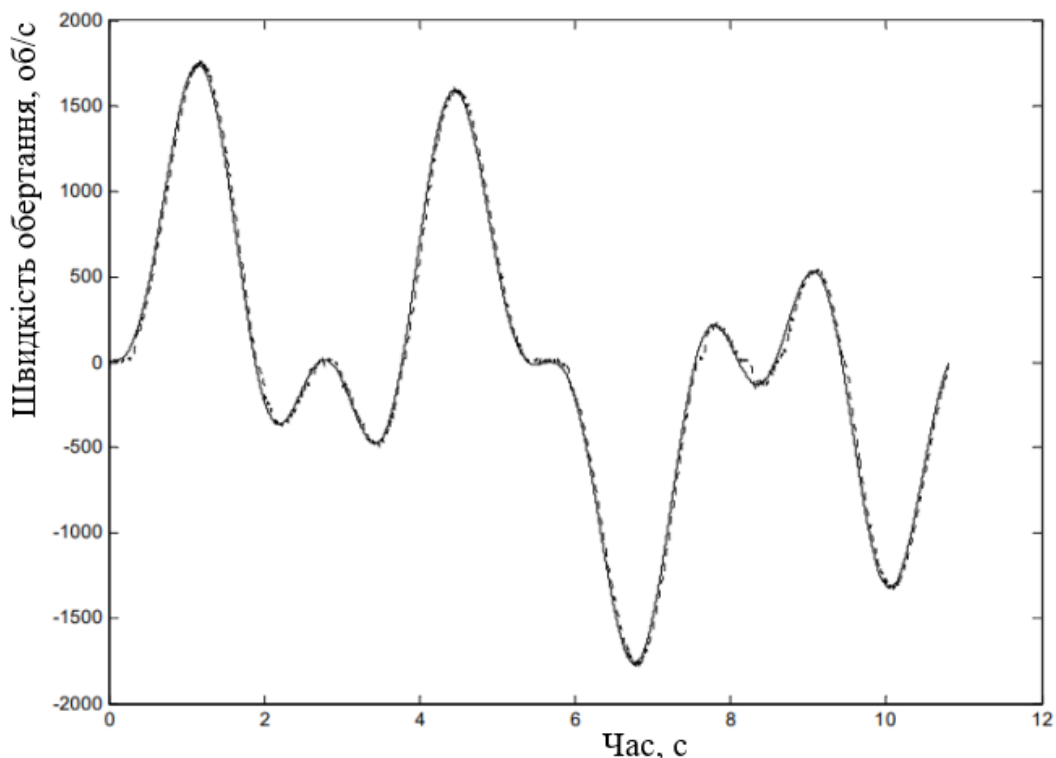


Рисунок 3.6 - Реакція контролера на основі ШНМ зі змінами в еталонній доріжці швидкості синусоїдального типу

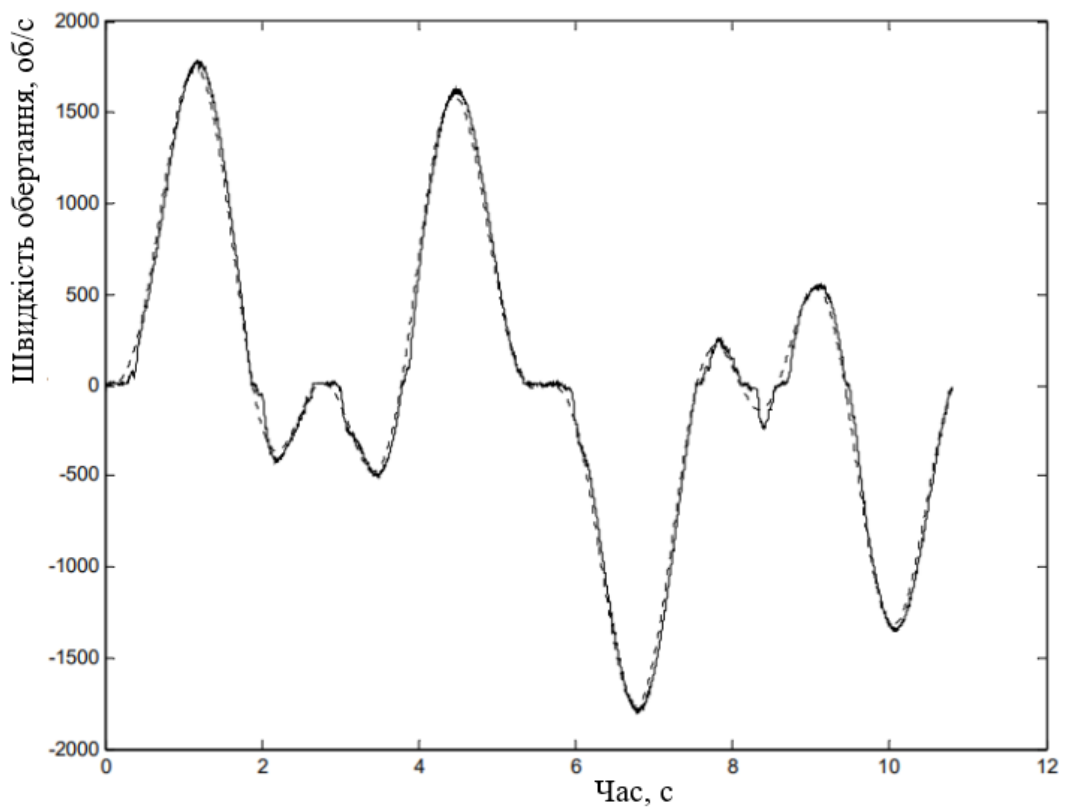


Рисунок 3.7 - Реакція ПД-регулятора на зміни в синусоїдальній еталонній швидкості

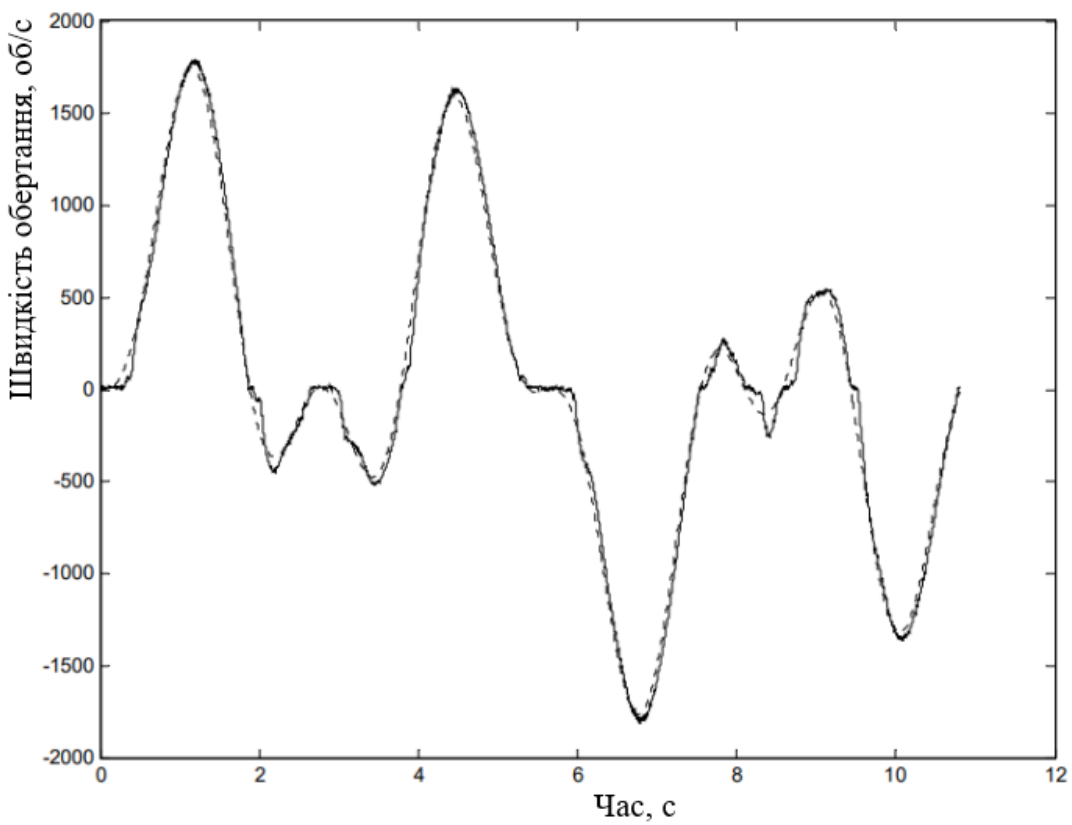


Рисунок 3.8 - Реакція ПІ-регулятора зі змінами в синусоїдальній опорній швидкості треку

3.4 Дослідження впливу шуму на роботу системи керування

Інший набір випробувань був виконаний для вивчення впливу шуму вимірювання на продуктивність систем. Білий шум вводили в систему, додаючи його до значень $\omega(n+1)$, які були виміряні за допомогою аналого-цифрового перетворювача. На наступних рисунках 3.9, 3.10 і 3.11 показані відповідно фактична і задана траєкторії швидкості адаптивного контролера на основі штучної нейронної мережі, ПІД-регулятора і ПІ-регулятора після введення шуму в системи.

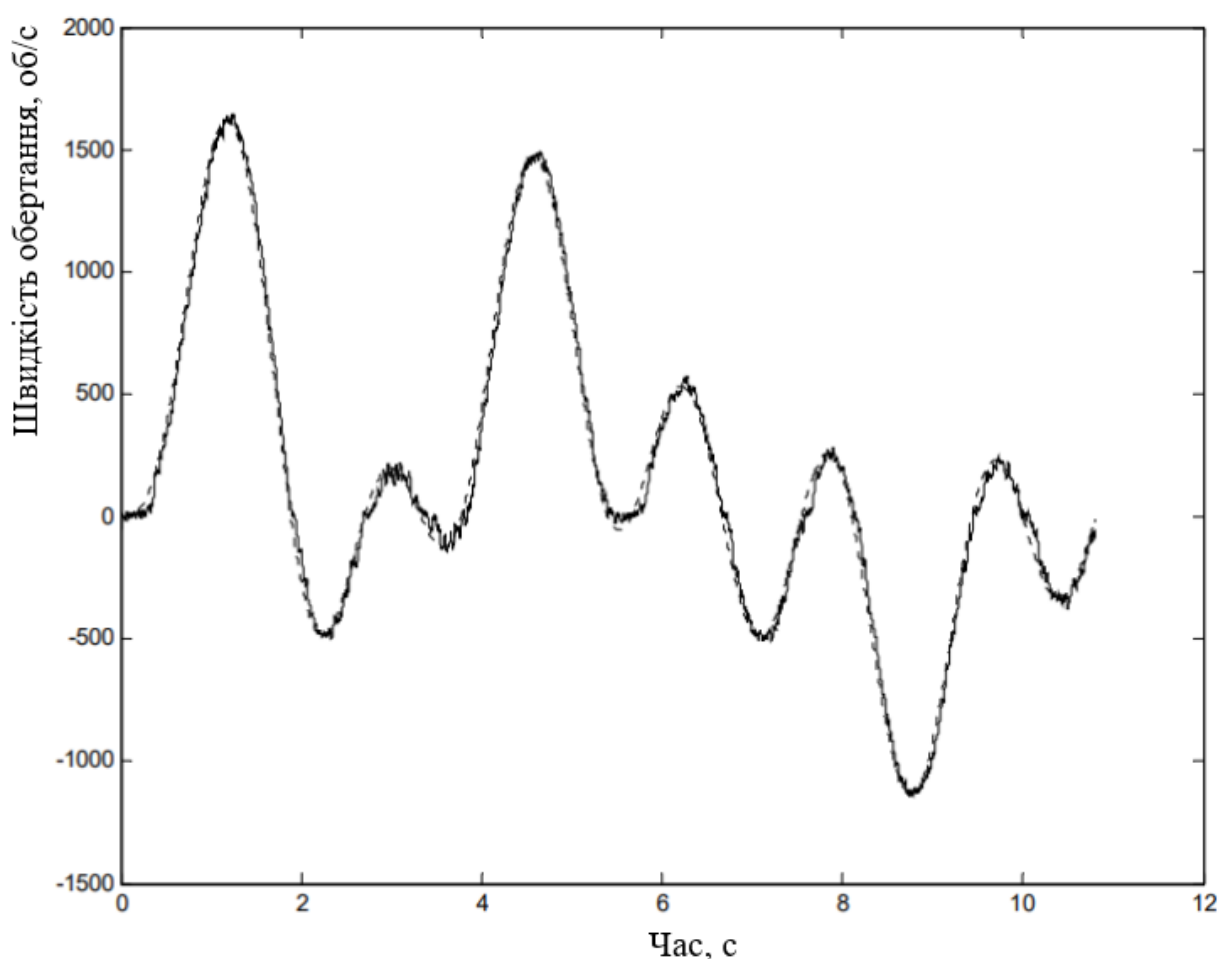


Рисунок 3.9 Відстеження продуктивності регулятора на основі ШНМ з шумом

Як видно з рисунків, контролер на основі штучної нейронної мережі показує високу точність відстеження на всіх швидкостях у порівнянні з контролерами ПІД і ПІ, коли в системи вводився шум. Максимальна помилка трасування становить 40 об/хв або 2,5% від максимальної швидкості траєкторії для системи під керуванням

ШНН. Вони порівнюються з 95 об/хв (6%) і 130 об/хв (8%) для ПД і ПІ контролю відповідно. Це відображає можливість придушення шуму регулятора на основі штучної нейронної мережі.

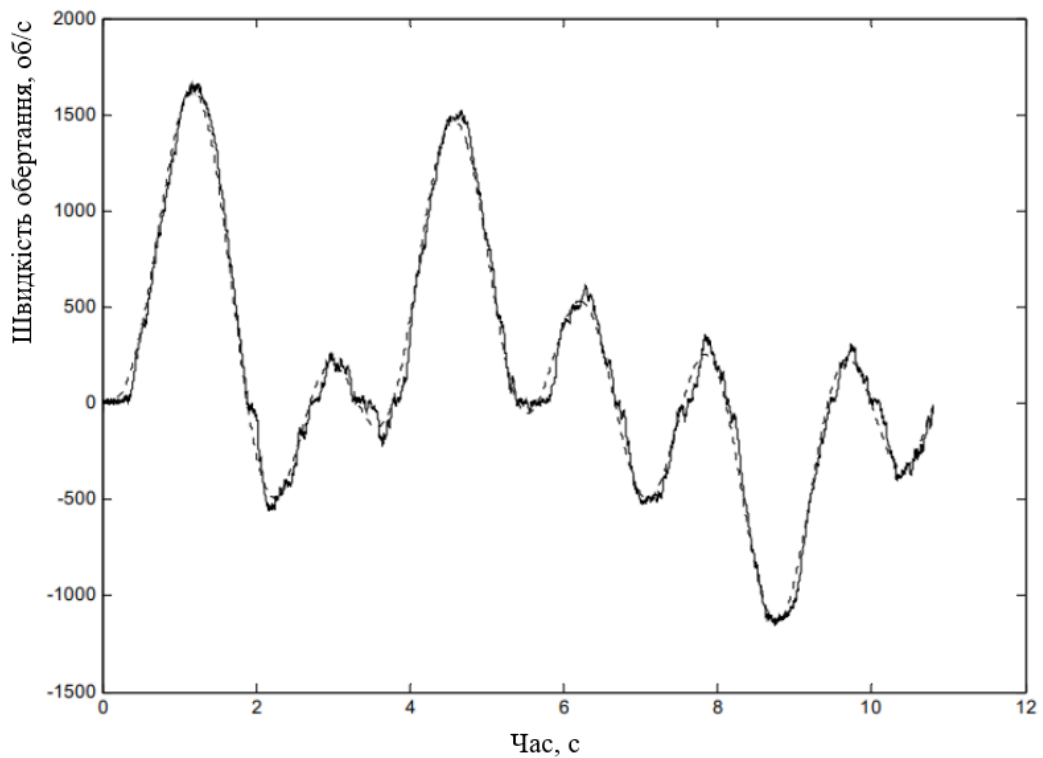


Рисунок 3.10 Відстеження продуктивності ПД-регулятора з шумом

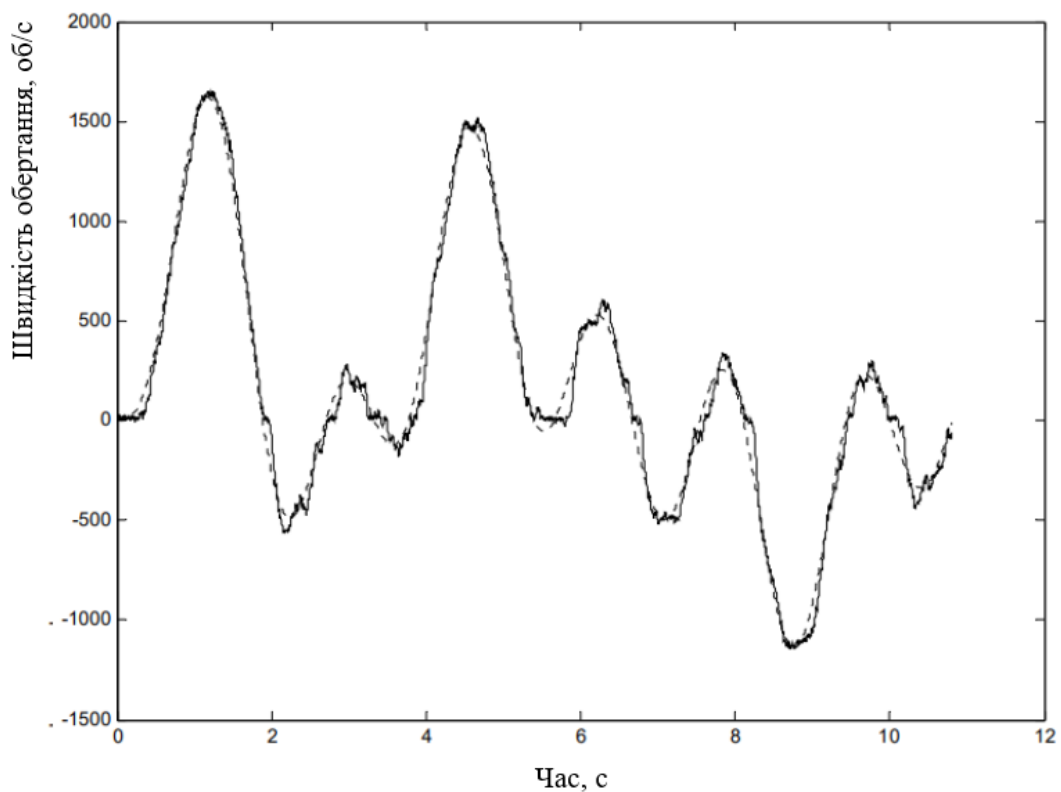


Рисунок 3.11. Відстеження продуктивності ПІ-контролера з шумом

3.5 Аналіз роботи системи керування за умов навантаження

Ці тести були виконані для вивчення ефекту навантаження системи. На рисунках 3.12, 3.13 і 3.14 показані швидкісні характеристики адаптивного контролера на основі штучної нейронної мережі, ПД-регулятора і ПІ-регулятора відповідно, коли двигун працював у режимі холостого ходу, і через деякий час номінальне навантаження (однакове навантаження застосовується до кожного регулятора) накладається.

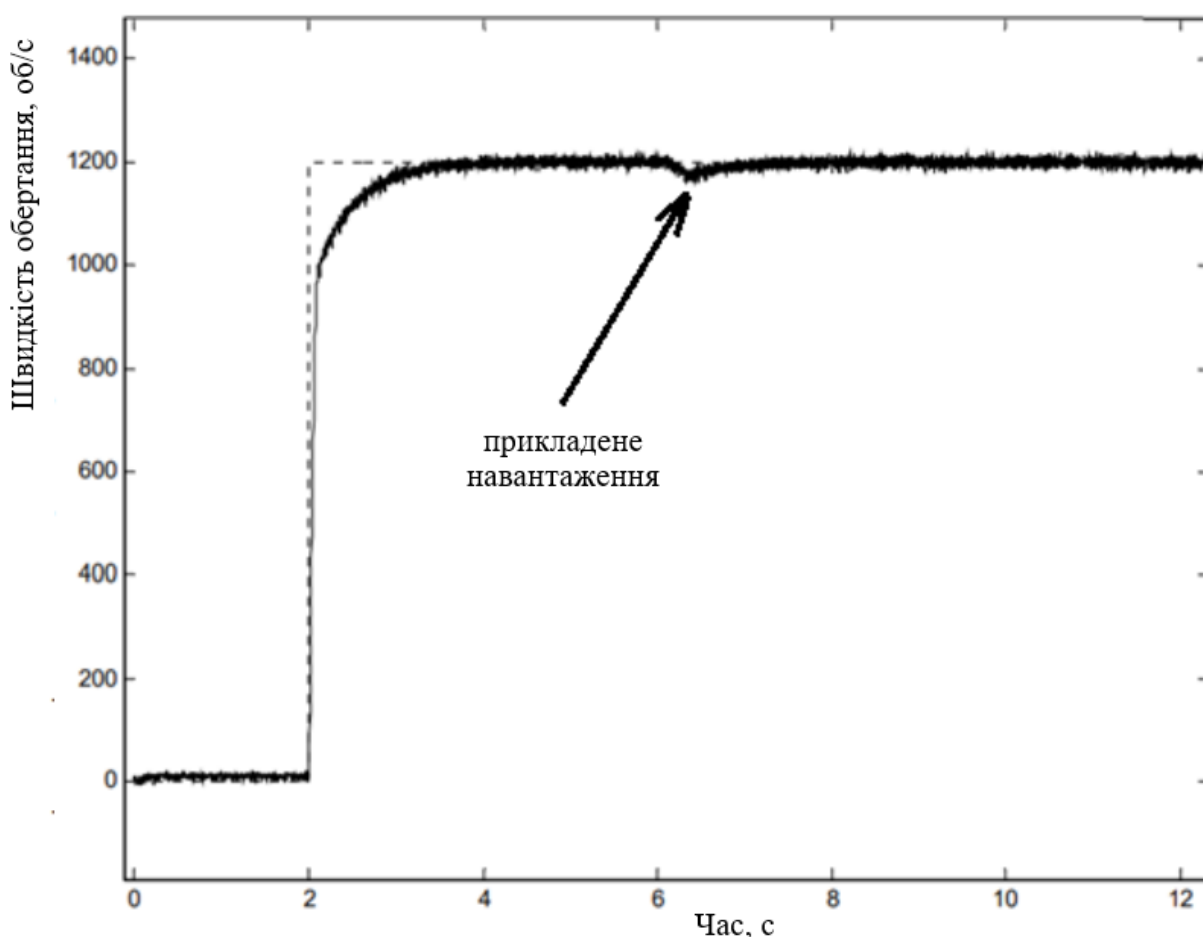


Рисунок 3.12 - Швидкість регулятора на основі ШНМ з навантаженням

З рисунків видно, що відгук системи контролера на основі штучної нейронної мережі перевершує за якістю два інших контролери. Штучна нейронна мережа коригує свої коефіцієнти і затримки на цю змінну умову навантаження і забезпечує відповідну керуючу напругу, щоб приводна система реагувала відповідно до заданої швидкості.

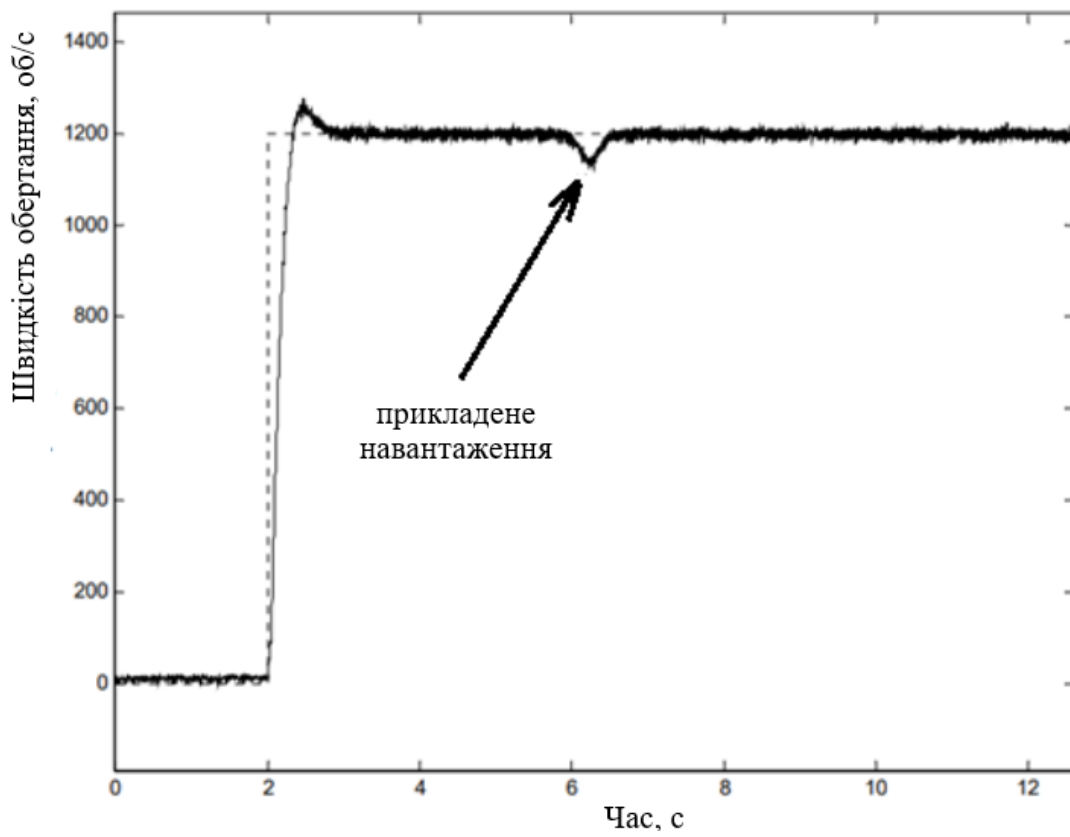


Рисунок 3.13 - Швидкість ПД-регулятора з покроковою зміною навантаження

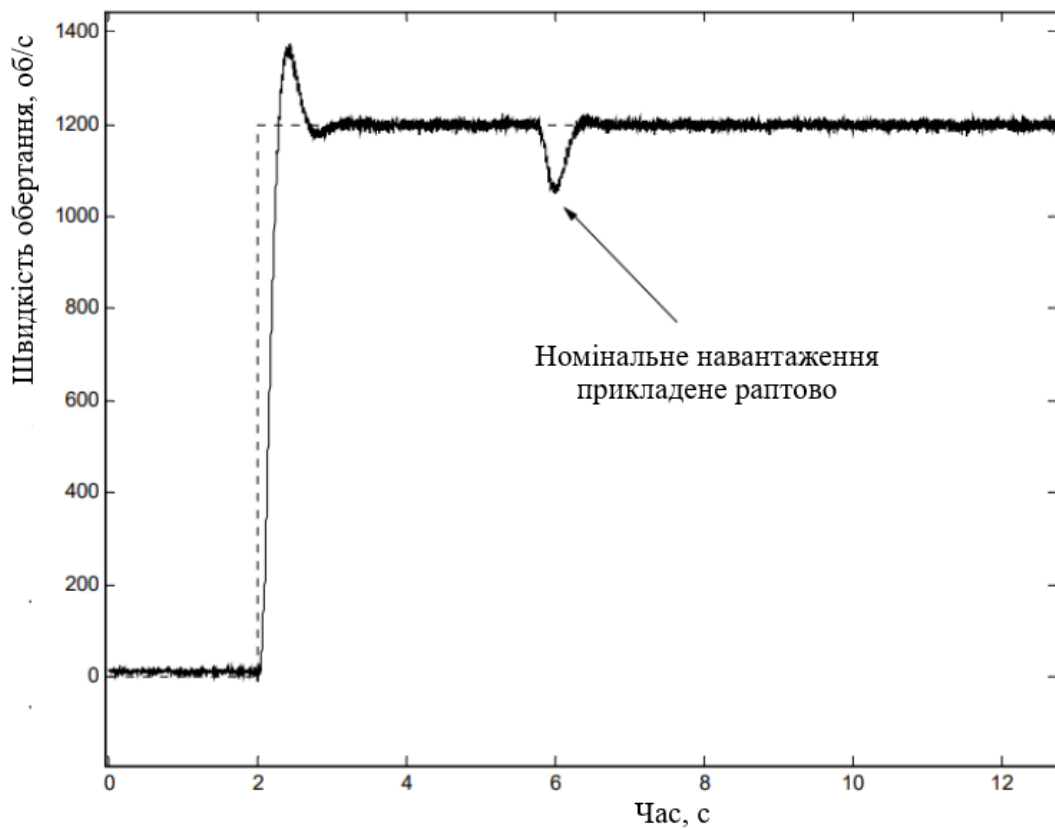


Рисунок 3.14 - Швидкість ПІ-регулятора з покроковою зміною навантаження

У даній роботі була здійснена практична розробка, реалізація і експерименти для адаптивного контролера на основі ШНМ. З усіх проведених випробувань видно, що контролер на основі ШНМ перевершує ПІД і ПІ регулятори. Як і очікувалося, завдяки оперативному оновленню вагових коефіцієнтів і зміщень, і адаптивній швидкості навчання, запропонований контролер стає нечутливим до шуму і раптових змін навантаження і, таким чином, досить точно відстежує необхідну швидкість. Також можна помітити, що перерегулювання швидкості контролера на основі ШНМ значно нижче, ніж у інших регуляторів. Оскільки штучна нейронна мережа може ефективно представляти нелінійні аспекти, адаптивний контролер на основі штучної нейронної мережі також має потенціал кращої компенсації нелінійності двигуна, якої немає у двох інших регуляторів.

Також було проведено кілька серій експериментів і досліджень для оцінки контролера на основі ШНМ з двома іншими контролерами ПІД і ПІ. Спочатку двигун постійного струму працював у розімкнутій контурі, щоб отримати деякі фактичні дані для навчання моделі двигуна ШНМ. Після цього швидкість двигуна контролювалася з використанням трьох контролерів в аналогічних умовах, і результати роботи в таких режимах були проаналізовані.

3.5 Висновки до розділу

Було розроблено та проведено дослідження адаптивного регулятора, побудованого на основі ШНМ. Результати виконаних випробувань свідчать, що запропонований нейромережевий контролер демонструє кращі показники якості керування порівняно з ПІД та ПІ регуляторами.

Завдяки механізму оперативного оновлення вагових коефіцієнтів і зміщень, а також використанню адаптивної швидкості навчання, розроблений регулятор характеризується зниженою чутливістю до шумових впливів і раптових змін навантаження. Це забезпечує більш точне відстеження заданої швидкості обертання. Крім того, встановлено, що перерегулювання у нейромережевій системі керування є суттєво меншим порівняно з ПІД та ПІ регуляторами.

Також було виконано серію порівняльних випробувань нейромережевого контролера з ПД та ПІ регуляторами. На початковому етапі двигун постійного струму працював у розімкнутому режимі для отримання експериментальних даних, необхідних для навчання моделі двигуна. У подальшому регулювання швидкості здійснювалося в замкнених системах керування з трьома типами регуляторів за однакових умов експерименту.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Інструктажі з охорони праці

Усі працівники, які приймаються на постійну чи тимчасову роботу, і при подальшій роботі, повинні проходити на підприємстві навчання в формі інструктажів з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих.

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий .

Вступний інструктаж проводиться:

- з усіма працівниками, які приймаються на постійну або тимчасову роботу, незалежно від їх освіти, стажу роботи та посади;
- з працівниками інших організацій, які прибули на підприємство і беруть безпосередню участь у виробничому процесі або виконують інші роботи для підприємства;
- з учнями та студентами, які прибули на підприємство для проходження виробничої практики;
- у разі екскурсії на підприємство;

Первинний інструктаж проводиться до початку роботи безпосередньо на робочому місці з працівником:

- новоприйнятим (постійно чи тимчасово) на підприємство;
- який переводиться з одного цеху виробництва до іншого;
- який буде виконувати нову для нього роботу;
- відрядженим працівником, який бере безпосередню участь у виробничому процесі на підприємстві [13].

Повторний інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці в терміни, визначені відповідними чинними галузевими нормативними актами або керівником підприємства з урахуванням конкретних умов праці, але не рідше:

- на роботах з підвищеною небезпекою - 1 раз на 3 місяці;
- для решти робіт - 1 раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці або в кабінеті охорони праці:

- при введенні в дію нових або переглянутих нормативних актів про охорону праці, а також при внесенні змін та доповнень до них;
- при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, вихідної сировини, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці;
- при порушеннях працівниками вимог нормативних актів про охорону праці, що можуть призвести або призвели до травм, аварій, пожеж тощо;
- при виявленні особами, які здійснюють державний нагляд і контроль за охороною праці, незнання вимог безпеки стосовно робіт, що виконуються працівником;

Цільовий інструктаж проводиться з працівниками:

- при виконанні разових робіт, не передбачених трудовою угодою;
- при ліквідації аварії, стихійного лиха;
- при проведенні робіт, на які оформлюються наряд-допуск, розпорядження або інші документи.

Стажування (дублювання) та допуск працівників до роботи.

Новоприйняті на підприємство працівники після первинного інструктажу на робочому місці до початку самостійної роботи повинні під керівництвом досвідчених, кваліфікованих фахівців пройти стажування протягом 2 - 15 змін або дублювання протягом не менше шести змін.

Працівники, функціональні обов'язки яких пов'язані із забезпеченням безаварійної роботи важливих і складних господарчих потенційно небезпечних об'єктів або з виконанням окремих потенційно небезпечних робіт (теплові та атомні електричні станції, гірничодобувні підприємства, інші подібні об'єкти, порушення технологічних режимів яких являє загрозу для працівників та навколишнього середовища), до початку самостійної роботи повинні проходити дублювання з

обов'язковим суміщенням з протиаварійними і протипожежними тренуваннями відповідно до плану ліквідації аварій.

Допуск до стажування (дублювання) оформлюється наказом (розпорядженням) по підприємству (структурному підрозділу), в якому визначаються тривалість стажування (дублювання) та прізвище відповідального працівника. Перелік посад і професій працівників, які повинні проходити стажування (дублювання), а також тривалість стажування (дублювання) визначаються керівником підприємства. Тривалість стажування (дублювання) залежить від стажу і характеру роботи, а також від кваліфікації працівника. Керівнику підприємства надається право своїм наказом (розпорядженням) звільнити від проходження стажування (дублювання) працівника, який має стаж роботи за відповідною професією не менше 3 років або переводиться з одного цеху до іншого, де характер його роботи та тип обладнання, на якому він працюватиме, не змінюються.

Стажування (дублювання) проводиться за програмами для конкретної професії, посади, робочого місця, які розробляються на підприємстві і затверджуються керівником підприємства (структурного підрозділу) на робочих місцях свого або іншого подібного за технологією підприємства. У процесі стажування працівники повинні виконувати роботи, які за складністю, характером, вимогами безпеки відповідають роботам, що передбачаються функціональними обов'язками цих працівників.

4.2 Захист від статичної електрики

Статична електрика – це сукупність явищ, що пов'язані з виникненням, накопиченням та релаксацією вільного електричного заряду на поверхні або в об'ємі діелектричних та напівпровідникових речовин, матеріалів та виробів. Виникнення зарядів статичної електрики є результатом складних процесів перерозподілу електронів чи іонів при стиканні двох різнорідних тіл (речовин) [13].

Порушення поверхневого контакту при терті тіл призводить до електризації - виникнення електричних зарядів, які можуть утримуватись на поверхні цих тіл протягом тривалого часу. Такі заряди, на відміну від рухомих зарядів динамічної електрики (електричний струм) знаходяться у статичному стані.

Електричні заряди виникають:

- при терті діелектричних тіл один об одного або об метал (наприклад, пасові передачі);
- при переливанні, перекачуванні, перевезенні в ємностях горючих та легкозаймистих рідин;
- при транспортуванні горючих газів трубопроводом;
- при подрібненні діелектриків;
- при переміщенні сухого запиленого повітря зі швидкістю понад 15 – 20 м/с і т.п.

Систематичний вплив електростатичного поля підвищеної напруженості негативно впливає на організм людини, викликаючи, в першу чергу, функціональні розлади центральної нервової та серце-судинної систем.

Захист від статичної електрики та її небезпечних проявів досягається трьома основними способами:

- запобіганням виникнення та накопичення статичної електрики,
- прискоренням стікання електростатичних зарядів,
- нейтралізацією електростатичних зарядів.

4.3 Запобігання виникненню та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного походження на об'єктах електроенергетики

Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій — це підготовка та реалізація комплексу правових, соціально-економічних, політичних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів, спрямованих на регулювання безпеки, проведення оцінки рівнів ризику, завчасне реагування на загрозу виникнення надзвичайної ситуації на основі даних моніторингу (спостережень), експертизи,

досліджень та прогнозів щодо можливого перебігу подій з метою недопущення їх переростання у надзвичайну ситуацію або пом'якшення її можливих наслідків.

Зазначені функції запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного та природного характеру в нашій країні виконує Єдина державна система запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного і природного характеру, затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 3 серпня 1998 р. № 1198.

Єдина державна система запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного і природного характеру (ЄДСЗР) включає в себе центральні та місцеві органи виконавчої влади, виконавчі органи рад, державні підприємства, установи та організації з відповідними силами і засобами, які здійснюють нагляд за забезпеченням техногенної та природної безпеки, організують проведення роботи із запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного та природного походження і реагування у разі їх виникнення з метою захисту населення і довкілля, зменшення матеріальних втрат.

Основною метою створення ЄДСЗР є забезпечення реалізації державної політики у сфері запобігання і реагування на надзвичайні ситуації, забезпечення цивільного захисту населення.

Завданнями ЄДСЗР є:

- розроблення нормативно-правових актів, а також норм, правил та стандартів з питань запобігання надзвичайним ситуаціям та забезпечення захисту населення і територій від їх наслідків;
- забезпечення готовності центральних та місцевих органів виконавчої влади, виконавчих органів рад, підпорядкованих їм сил і засобів до дій, спрямованих на запобігання і реагування на надзвичайні ситуації;
- забезпечення реалізації заходів щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій;
- навчання населення щодо поведінки та дій у разі виникнення надзвичайної ситуації;

- виконання цільових і науково-технічних програм, спрямованих на запобігання надзвичайним ситуаціям, забезпечення сталого функціонування підприємств, установ та організацій, зменшення можливих матеріальних втрат;
- збирання та аналітичне опрацювання інформації про надзвичайні ситуації, видання інформаційних матеріалів з питань захисту населення і територій від наслідків надзвичайних ситуацій;
- прогнозування і оцінка соціально-економічних наслідків надзвичайних ситуацій, визначення на основі прогнозу потреби в силах, засобах, матеріальних та фінансових ресурсах;
- створення, раціональне збереження і використання резерву матеріальних та фінансових ресурсів, необхідних для запобігання і реагування на надзвичайні ситуації;
- проведення державної експертизи, забезпечення нагляду за дотриманням вимог щодо захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій (у межах повноважень центральних та місцевих органів виконавчої влади);
- захист населення у разі виникнення надзвичайних ситуацій;
- проведення рятувальних та інших невідкладних робіт щодо ліквідації надзвичайних ситуацій, організація життєзабезпечення постраждалого населення;
- пом'якшення можливих наслідків надзвичайних ситуацій у разі їх виникнення;
- здійснення заходів щодо соціального захисту постраждалого населення, проведення гуманітарних акцій;
- реалізація визначених законодавством прав у сфері захисту населення від наслідків надзвичайних ситуацій, в тому числі осіб (чи їх сімей), що брали безпосередню участь у ліквідації цих ситуацій;
- участь у міжнародному співробітництві у сфері цивільного захисту населення

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра було проведено дослідження та розробку адаптивної системи керування колекторним двигуном постійного струму з постійними магнітами на основі штучної нейронної мережі. Основна увага була зосереджена на підвищенні якості регулювання швидкості електропривода в умовах невизначеності параметрів об'єкта керування, змін навантаження та наявності зовнішніх збурень.

У ході роботи проаналізовано принципи роботи колекторних двигунів постійного струму, їх основні електромеханічні характеристики та особливості регулювання швидкості. Розглянуто основні підходи до побудови адаптивних систем керування, зокрема регулятори з прямим та зворотним зв'язком. Показано, що адаптивні системи дозволяють компенсувати зміну параметрів об'єкта керування та підвищують стійкість системи в широкому діапазоні робочих режимів.

Особливу увагу приділено використанню штучних нейронних мереж як інструменту нелінійного відображення та ідентифікації об'єкта керування. Розроблено структуру нейромережевого регулятора для керування швидкістю двигуна, а також визначено принципи його автономного та онлайн-навчання з використанням алгоритму зворотного поширення помилки та адаптивної швидкості навчання.

У програмному середовищі MATLAB Simulink та Simscape створено модель електропривода колекторного двигуна постійного струму, виконано її лінеаризацію та перевірку адекватності. На основі отриманих моделей проведено порівняльне моделювання систем керування з ПІ, ПІД та нейромережевими регуляторами.

Результати моделювання показали, що запропонований нейромережевий адаптивний регулятор забезпечує кращі показники якості перехідних процесів, зокрема менше перерегулювання, менший час встановлення та вищу точність відпрацювання заданої швидкості. Також встановлено його підвищену стійкість до впливу шумів вимірювання та раптових змін навантаження.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). Power electronics: converters, applications, and design. John Wiley & Sons.
2. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. – 5th ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2019. – 456 p.
3. Ogata, K. (2010) Modern Control Engineering. 5th Edition, Pearson, Upper Saddle River.
4. Буняк О. А. Електричні машини : Навчальний посібник /. — Тернопіль : ФОП Паляниця В.А. , 2023 — 324 с.
5. El Ouanjli, N.; Motahhir, S.; Derouich, A.; El Ghzizal, A.; Chebabhi, A.; Taoussi, M. Improved DTC strategy of doubly fed induction motor using fuzzy logic controller. Energy Rep. 2019, 5, 271–279.
6. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М.Куценко, В.Ф.Яковлев та ін.—К.: Аграрна освіта, 2013. —449 с..
7. АНДРІЙЧУК, В., НАКОНЕЧНИЙ, М., ФІЛЮК, Я., КОСТИК, Л., & КОЗАК, І. (2023). Електропривід рухомої опромінювальної установки. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences, 329(6), 44-48.
8. Getu, B. N. (2019). Tuning the Parameters of the GRNN algorithm Using Matlab. Journal of Engineering and Applied Sciences.
9. Vazquez-Sanchez, E.; Gomez-Gil, J.; Gamazo-Real, J.C. A New Method for Sensorless Estimation of the Speed and Position in Brushed DC Motors Using Support Vector Machines.IEEE Trans. Ind. Electron. 2012.
10. Wang, Q.; He, F. The Synchronous Control of Multi-Motor Drive Control System with Floating Compensation. In Proceedings of the 2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), Guilin, China, 12–15 June 2016.
11. Wang, F.; Wang, R.; Liu, E.; Zhang, W. Stabilization Control Method for Two-Axis Inertially Stabilized Platform Based on Active Disturbance Rejection Control with Noise Reduction Disturbance Observer. IEEE Access 2019.

12. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.

13. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіджний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.