

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістр

Освітній рівень

Метод компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі  
машинного навчання

Назва теми

КвРАКІТР.2023169.01.02.ПЗ

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ магістр


Галузь знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»  
Шифр, назва

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»  
Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»  
Назва

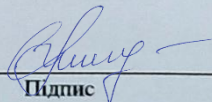
Виконав:

студент II курсу, група АКІТРм-23-1

  
Підпис

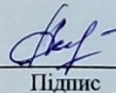
Андрій БАЛАГУР  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник

  
Підпис

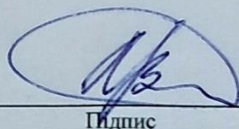
Наталія МОРКУН  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер

  
Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:  
зав. кафедри АКІТтаР

  
Підпис

Валерій МАРТИНЮК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

« 11 » грудня 2024 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

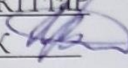
Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТтаР

Валерій МАРТИНЮК 

01 вересня 2024р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Балагуру Андрію Ігоровичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи Метод компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання

Керівник роботи Моркун Наталія Володимирівна, доктор технічних наук, професор

Затверджено наказом ректора університету від 26.08.2024 р. №60

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 02.12.2024р.

3 Вихідні дані до роботи Мета роботи: розробити методи компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання. Предметом дослідження є методи компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання

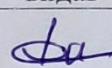
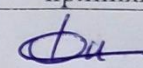
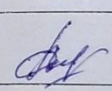
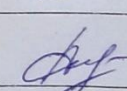
4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. Порівняльний аналіз та застосування сервомоторного контролю. Розробка методу компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання.

Реалізація методу компенсації точності руху промислових сервоприводів за допомогою підходу до машинного навчання. Дослідження методу компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі підходу до машинного навчання. Висновки.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)  
презентаційні матеріали (слайди)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

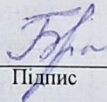
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М.В., доцент кафедри АКІТтаР		
Нормоконтроль	Корецька Л.О., доцент кафедри АКІТтаР		

7 Дата видачі завдання 01 вересня 2024р.

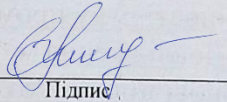
## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1 Вступ	10.09.2024р.	Виконано
2 Порівняльний аналіз та застосування сервомоторного контролю	25.09.2024р.	Виконано
3 Розробка методу компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання	15.10.2024р.	Виконано
4 Реалізація методу компенсації точності руху промислових сервоприводів за допомогою підходу до машинного навчання	30.10.2024р.	Виконано
5 Дослідження методу компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі підходу до машинного навчання	10.11.2024р.	Виконано
6 Висновки	15.11.2024р.	Виконано
7 Оформлення пояснювальної записки до ДР	20.11.2024р.	Виконано
8 Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2024р.	Виконано

Студент

  
ПідписБалагур А.І.  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи

  
ПідписМоркун Н.В.  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: “Метод компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання”

Автор роботи: Балагур А.І.

Керівник роботи: Моркун Н.В.

Пояснювальна записка: 75 ст., 20 рис., 9 таб., 1 додат., 70 джерел.

Графічна частина: 15 презентаційних слайдів

Ключові слова: КОМПЕНСАЦІЯ РУХУ, СЕРВОМЕХАНІЗМ, ПОМИЛКА, ПРОГНОЗОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ВИПРОБУВАЛЬНИЙ СТЕНД, МАШИННЕ НАВЧАННЯ

Об'єктом дослідження є промислові сервоприводи

Предметом дослідження є методи компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання

**Мета роботи:** розробити методи компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання. Розроблено ключовий аспект моделювання та компенсації помилок положення в промислових сервоприводах з метою досягнення точного керування та високопродуктивної роботи в промислових роботах та автоматизованих виробничих системах. Визначено, що властива складність і нелінійна поведінка цих модулів, які зазвичай складаються з серводвигуна і редуктора швидкості, часто кидають виклик традиційним підходам аналітичного моделювання.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....	4
ВСТУП.....	5
1 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ЗАСТОСУВАННЯ СЕРВОМОТОРНОГО КОНТРОЛЮ .....	7
1.1 Сервомотори: будова, спосіб роботи, види, основні характеристики.....	7
1.2 Попередня компенсація помилок сервовідстеження за рахунок модифікації еталонної траєкторії на основі даних. ....	13
1.3 Основні принципи управління сервомотором .....	16
1.4 Порівняння методів управління сервомоторами .....	22
1.5 Висновки до першого розділу. Постановка задачі .....	26
2 РОЗРОБКА МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ ТОЧНОСТІ РУХУ ПРОМИСЛОВИХ СЕРВОПРИВОДІВ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ.....	28
2.1 Компенсація лінійної динаміки сервоприводу .....	28
2.2 Компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання.....	32
2.3 Попередня компенсація нелінійного передковзного тертя .....	42
2.4. Використання нечіткої логіки в управлінні сервомотором .....	47
2.5. Висновки до другого розділу .....	49
3 РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ ТОЧНОСТІ РУХУ ПРОМИСЛОВИХ СЕРВОПРИВОДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПІДХОДУ ДО МАШИННОГО НАВЧАННЯ.....	51
3.1. Методи управління сервомоторами .....	52
3.2 Структура машинного навчання для програмування TE.....	57
3.3. Критерії оцінювання .....	61
3.4. Експериментальна перевірка .....	63
3.5 Висновки до третього розділу .....	64
4 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ ТОЧНОСТІ РУХУ ПРОМИСЛОВИХ СЕРВОПРИВОДІВ НА ОСНОВІ ПІДХОДУ ДО МАШИННОГО НАВЧАННЯ .....	66

4.1 Впровадження компенсації на основі ML .....	66
4.2 Експериментальна перевірка .....	70
4.3 Компенсація профілю руху .....	72
4.4. Висновки до четвертого розділу.....	78
ВИСНОВКИ.....	80
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....	82
ДОДАТОК А Стаття у фаховому журналі .....	91

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ШІМ – Широтно-імпульсна модуляція

FOC – Польове керування

ML – Машинне навчання

TE – Помилка передачі

ЧПУ – Числове програмне управління

RV – Редуктор з обертовим вектором

MS – Motor side

LS – Load side

SS – Slow side

ELM – Extreme Learning Machine

MAE – Середня абсолютна похибка

RMSE – Середньоквадратична похибка

## ВСТУП

Сучасне виробництво не може обійтися без електродвигунів, які використовуються в різних сферах. Різні типи електродвигунів використовуються для різних цілей, що дозволяє підвищити продуктивність, енергоефективність та економічність у будь-якому виробничому процесі [1]. Завдяки моторам можливості виробництва постійно розширюються, що дозволяє використовувати більш складні і вдосконалені механізми, створювати нові можливості для розвитку.

Одним із шляхів розвитку виробництва є використання роботизованих систем, де безпосередньо використовуються серводвигуни [2]. Сервомотори в роботах використовуються для підвищення точності або плавності роботи механізатора, в залежності від завдання, яке він виконує. Тому управління приводами повинно мати аналогічну природу, дозволяючи досягати необхідних цілей. Однак, чим складніше спосіб управління приводом, тим більш складною буде система управління, що призведе до додаткових витрат, але в той же час підвищить виробничі характеристики [3].

Управління серводвигунами не тільки змінилося в останні роки, але і продовжує розвиватися, революціонізуючи різні галузі, зокрема робототехніку та автоматизацію. Спочатку управління цими двигунами здійснювалося за допомогою аналогових методів, але з розвитком цифрових технологій управління стало більш точним і універсальним [4].

В даний час використовуються різні технології управління серводвигунами, включаючи цифрові системи обробки сигналів, системи зворотного зв'язку, польове управління та системи управління, інтегровані з Industry 4.0. Всі ці види управління сервомоторами використовуються для досягнення різних результатів, кожен з яких має свої переваги і недоліки, які розглядаються в цих роботах [5].

Метою роботи є розробка методів компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати наступні задачі дослідження:

- дослідити наявні методи та засоби компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання

- виконати оцінку наявних методів

- визначити основні принципи управління вервомотором

- оцінити ефективність запропонованих методів

- розробити структуру машинного навчання

Об'єктом дослідження є промислові сервоприводи

Предметом дослідження є методи компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання

Методи досліджень. На інструментальній установці була проведена експериментальна кампанія для ефективного навчання декількох моделей машинного навчання, здатних передбачити варіації в основні піки ТЕ (амплітуда і фаза) виходячи з нав'язаних умов експлуатації. Також використовувалось моделювання та компенсація помилок положення в промислових сервомеханізмах. У дослідженні впроваджено використання алгоритмів машинного навчання для розробки комплексної моделі ТЕ, з особливим акцентом на редуктори ПШ.

Наукова новизна отриманих результатів: впроваджено використання алгоритмів машинного навчання для розробки комплексної моделі ТЕ, з особливим акцентом на редуктори ПШ.

# 1 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ЗАСТОСУВАННЯ СЕРВОМОТОРНОГО КОНТРОЛЮ

Даний розділ є загальним оглядом теми серводвигунів, їх пристроїв і принципів експлуатації, популярних методів управління, а також шляхів розширення існуючих і нових систем управління. Варто зазначити, що руховий контроль постійно розвивається, що дозволяє досліджувати нові методи управління, такі як перехід від аналогової до цифрової системи, від систем з розімкнутим контуром до систем зворотного зв'язку і так далі.

Розвиток систем управління дозволяє підвищити ефективність, точність і адаптивність двигунів в різних галузях промисловості, що призводить до висновку, що нові технології матимуть більш складні, але інтегровані рішення.

Сервомотори: будова, спосіб роботи, види, основні характеристики

Серводвигун - це різновид електродвигуна, валом якого можна керувати з високою точністю. Вал серводвигуна може обертатися на необхідний кут або з постійною швидкістю обертання.

Сервомотори отримали широке поширення в робототехніці завдяки цим властивостям [6]. Серводвигун складається з двигуна ДТС, коробки передач з валом і контролера з необхідними датчиками (енкодером, датчиком положення і т.д.). Проект конструкції серводвигуна представлений на рисунку 1.1.

Коробка передач в серводвигунах використовується для зниження частоти обертання і збільшення крутного моменту на вихідному валу. Потенціометр або енкодер використовують для відстеження кута повороту або частоти обертання вала, створюючи таким чином замкнуту систему управління зі зворотним зв'язком.

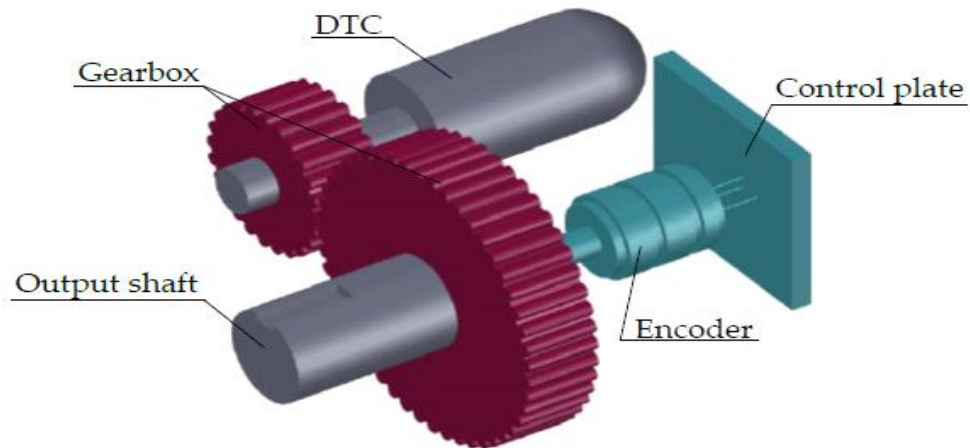


Рисунок 1.1 – Тяга серводвигуна

Популярним методом управління серводвигуном є широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). Цей метод заснований на визначенні кута повороту або частоти обертання вихідного валу на основі довжини імпульсу на заданій частоті. Застосування ШІМів для управління серводвигунами ґрунтується на наступних принципах [7]:

– ШІМ генерує імпульси різної ширини (тривалості) з різними періодами [7]:

$$D = \frac{T_{ON}}{T_{period}} \times 100, \quad (1.1)$$

де  $D$  — тривалість імпульсу,  $T_{ON}$  — час увімкнення сигналу, а  $T_{period}$  — загальний період одного циклу ШІМ;

$$f = \frac{1}{T_{period}}, \quad (1.2)$$

де  $f$  — частота ШІМ;

– для регулювання частоти обертання серводвигуна ширину імпульсів змінюють, дозволяючи регулювати потужність, що подається на двигун:

$$PW = D(PW_{\max} - PW_{\min}) + PW_{\min}, \quad (1.3)$$

де  $PW$  — ширина імпульсу і  $PW_{\max}$  та  $PW_{\min}$  — максимальна і мінімальна ширина імпульсу, що підтримується серводвигуном;

– управління положенням серводвигуна можливе за допомогою зворотного зв'язку. Щоб відрегулювати положення, напруга, що подається на двигун, після перетворення ШІМ-сигналу порівнюється з бажаною напругою, в результаті чого виходить керуючий сигнал [7]:

$$\alpha = D(\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) + \alpha_{\min}, \quad (1.4)$$

де  $\alpha$  — кутове положення серводвигуна і  $\alpha_{\max}, \alpha_{\min}$  — максимальний і мінімальний кути серводвигуна;

– ШІМ також використовується для регулювання плавної траєкторії руху з однієї точки в іншу для серводвигуна;

– крім ШІМ, для підвищення ефективності регулювання і управління застосовуються ПІД-контролери і мікроконтролери.

Цей спосіб завоював популярність завдяки простоті виконання і невисокій вартості. PWM також забезпечує високу ефективність керування швидкістю та позиціонуванням, що робить його застосовним у додатках, що вимагають високої реакції на вхід керування та точного керування. Прикладами таких застосувань можуть бути нединамічні системи, такі як вентилятори, насоси або конвеєри [8]. Однак для досягнення найкращих результатів застосовуються й інші принципи управління серводвигунами.

В даний час серводвигуни поділяються на кілька типів на основі шести різних критеріїв: тип використовуваного двигуна, тип струму, тип конструкції, виконувана функція, спосіб обробки сигналу та тип коробки передач. Виходячи з типу використовуваного двигуна і типу струму, серводвигуни класифікуються

як синхронні або асинхронні, і використовують відповідно змінний або постійний струм.

З огляду на більш потужні асинхронні двигуни, даний тип серводвигунів випускається тільки на змінний струм. Синхронні двигуни мають меншу потужність, але забезпечують більшу точність; У сукупності з постійним струмом вони дозволяють домогтися менших розмірів двигуна і використовувати цей тип серводвигуна для автономних механізмів [9].

За конструкцією серводвигуни поділяються на щіткові двигуни, двигуни без сердечника та безщіткові двигуни. На відміну від щіткових двигунів, безщіткові моделі мають більш широкий діапазон швидкостей обертання, що дозволяє використовувати їх в процесах, що вимагають високошвидкісного переміщення.

Однак управління безщітковим двигуном вимагає наявності ПЛК, незалежно від виконуваних ним завдань. За виконуваною функцією серводвигуни поділяються на дві групи: що підтримують заданий кут повороту або швидкість обертання. Виходячи з назв, перша група серводвигунів використовується для приведення механізмів в необхідне положення, таких як замки, заслінки, крани і т.д.

Друга група серводвигунів використовується для переміщення предметів в робочій зоні і використовується в маніпуляторах, різних верстатах з ЧПУ і т.д. Залежно від виконуваної функції буде відрізнятися основний параметр управління в серводвигуні: дальність обертання двигуна або момент інерції для першої або другої групи двигунів відповідно. З точки зору обробки сигналу серводвигуни поділяються на аналогові та цифрові.

Основна відмінність між цими групами полягає в принципі управління. У аналогових двигунах використовуються мікросіпи, а в цифрових – мікропроцесори. Завдяки технічному прогресу цифрові серводвигуни прийшли на зміну аналоговим завдяки збільшеній швидкості реакції на керуючий сигнал. Отже, ці серводвигуни мають підвищену точність позиціонування і здатність підтримувати постійний крутний момент [10].

Наприклад, на рисунку 1.2 зображений серводвигун, який використовується в декартовому роботі. Він являє собою синхронний двигун змінного струму з функцією підтримки постійної швидкості обертання, так як використовується для переміщення осі робота уздовж робочої зони [11].



Рисунок 1.2 – Серводвигун, який використовується в декартовому роботі

Двигуни з функцією підтримки постійної частоти обертання використовуються також в лабораторних установках цифрового двійника вітрогенератора [12], а також при діагностиці пошкоджень підшипників [13], зображених на рисунку 1.3.

Управління двигуном здійснюється за допомогою частотного перетворювача, що дозволяє вибрати відповідний режим управління двигуном, налаштувань контролера для різних умов експлуатації, калібрування управління для усунення несправностей і багато іншого.

Наприклад, при діагностиці несправностей підшипників дискретне управління двигуном використовується для підтримки постійної швидкості обертання. Використання потенціометра для встановлення сигналу аналогової швидкості не є доцільним, оскільки існує велика ймовірність виникнення додаткових збурень, які вплинули б на швидкість обертання вихідного валу.

Для цифрової двійної установки вітрогенератора використовуються методи моделювання, так як для підтримки постійної швидкості обертання сигнал вхідної швидкості перетворюється з бази даних, що зберігається в хмарі.

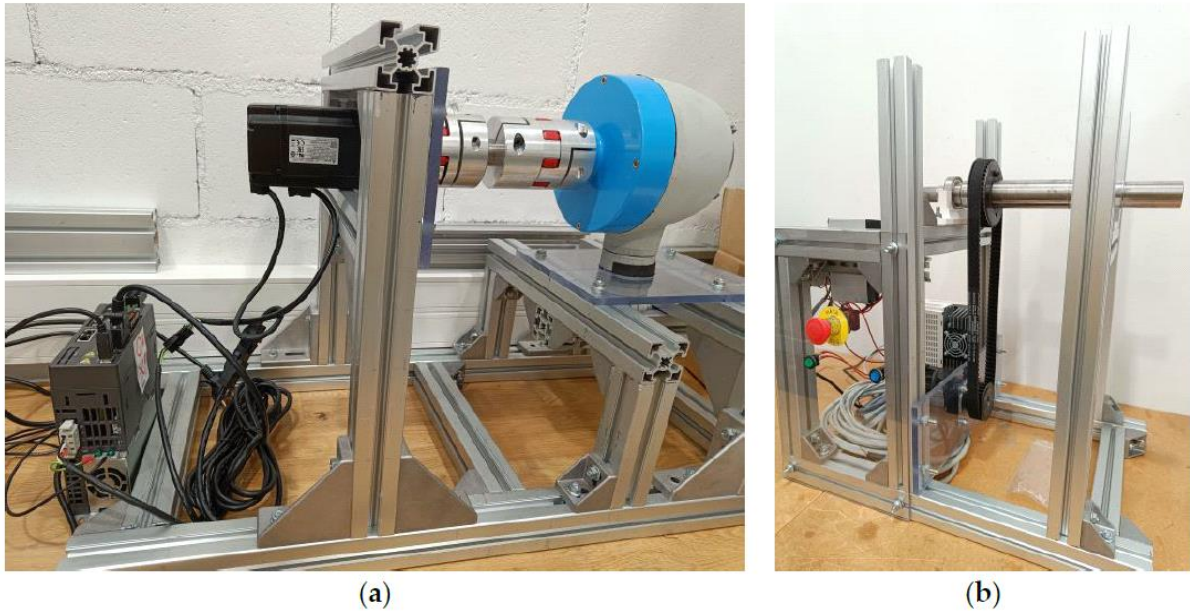


Рисунок 1.3 – Використання серводвигунів на різних випробувальних стендах:  
 а) як цифровий двійник вітрогенератора; б) при діагностиці несправностей підшипників

Основні технічні характеристики серводвигунів наступні [14]:

- крутний момент (зусилля валу);
- робоча напруга;
- частота обертання;
- максимальний кут повороту, габарити та вага;
- крутний момент вказує на швидкість розгону вихідного валу і його здатність долати опір обертанню вантажу. Здатність реалізувати весь потенціал серводвигуна прямо пропорційна крутному моменту;
- швидкість обертання серводвигуна вказує на час, необхідний для повороту вихідного валу на  $60^\circ$ . Наприклад, швидкість обертання 0,07 с означає, що вал серводвигуна повернеться на  $60^\circ$  за 0,07 с. Робоча напруга джерела живлення серводвигуна впливає як на швидкість обертання, так і на крутний момент;
- максимальний кут повороту вказує на кут, на який може повертатися вихідний вал серводвигуна. У сучасному виробництві використовуються серводвигуни з безперервним обертанням, тобто максимальний кут повороту

становить  $360^\circ$ . Однак в деяких механізмах використовуються двигуни з меншими кутами повороту, такі як  $120^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  і т. д;

- розміри серводвигуна впливають на вибір використовуваного для виробництва механічних конструкцій, в які вони будуть встановлені;

- цей параметр важливий для пристроїв, де вирішальне значення мають швидкість, легкість і компактність, наприклад, для моделей дронів. Зі згаданих вище технічних характеристик на управління серводвигунами безпосередньо впливають тільки три: крутний момент, швидкість обертання, кут повороту. Залежно від обраного режиму управління буде відрізнятися і параметр управління сервомотором.

Наприклад, основні технічні характеристики серводвигуна, про які говорилося вище, представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Наведені основні технічні характеристики серводвигуна декартового робота [15]

<b>Характеристики</b>	<b>Данні</b>
Момент	2.4 Нм
Вхідна (робоча) напруга	116 V AC
Швидкість обертання	3000 об/хв
Вихідна потужність	0.75W

Попередня компенсація помилок сервовідстеження за рахунок модифікації еталонної траєкторії на основі даних.

У літературі по верстатах основна увага приділяється двом основним стратегіям пом'якшення помилок динамічної подачі-приводу: вичерпання меж управління зворотним зв'язком (FB) шляхом проектування нелінійних, надійних адаптивних [16] контролерів з модальним демпфуванням і компенсація решти динамічних помилок за допомогою управління прямим зв'язком (FF), яке використовується не тільки для нейтралізації відомої серводинаміки, але і таких

збурень, як нелінійне тертя, похибка висоти звуку, індуковані навантаженнями і гармонійними зубчастими силами [17].

Якщо динаміка, що підлягає компенсації, точно представлена причинно-наслідковими, стабільними моделями; Компенсація ФФ безпечна та ефективна. Однак на практиці етап моделювання, як правило, обходяться, і виграш компенсатора FF налаштовується вручну методом проб і помилок.

Динаміка приводу змінюється в залежності як положення, так і інерції оброблюваної деталі [18]. Динаміка тертя змінюється в залежності від часу, а отже, для відновлення втраченої динамічної точності необхідна перенастройка компенсатора, що займає багато часу і коштує дорого.

Покладатися виключно на контроль ФБ та ФФ недостатньо. Останнім часом переваги генерації еталонної траєкторії визнаються як вони оптимізовані для уникнення залишкових вібрацій або попередньо компенсують затримку сервоприводу для підвищення характеристик контурування машини. Більшість систем ЧПУ забезпечують попередні фільтри цифрової траєкторії та функції введення команд зовнішньої траєкторії [19], щоб допомогти кінцевим користувачам використовувати обмеження своїх машин, а також інтегруватися з Індустрією 4.0.

У цьому розділі представлена нова стратегія попередньої компенсації помилок динамічного приводу подачі за допомогою модифікації еталонної траєкторії. Загальна схема наведена на рисунку 1.4. Команди опорної швидкості та прискорення модифікуються таким чином, щоб попередньо компенсувати похибки, спричинені динамікою сервоприводу.

У той час як файл `reference position.pro` модифікується локально, щоб усунути помилки позиціонування, спричинені тертям перед ковзанням (залипання/ковзання), для досягнення майже ідеального відстеження. Представлено два ключові внески. По-перше, попередня компенсація траєкторії реалізується цифровим попереднім фільтром з фіксованою структурою, параметри якого визначаються автоматично за допомогою машинного навчання.

По-друге, ідентифікація фільтра попереднього очищення траєкторії конкретної машини ставиться як задача опуклої оптимізації, що забезпечує швидку, безпечну і надійну автонастройку. Запропонований підхід простий і не вимагає будь-якої експертизи. Після налаштування фільтр попереднього очищення може підвищити динамічну точність старих або нових верстатів з ЧПУ за допомогою флайнової або онлайн-модифікації траєкторії, і його ефективність продемонстрована експериментально.

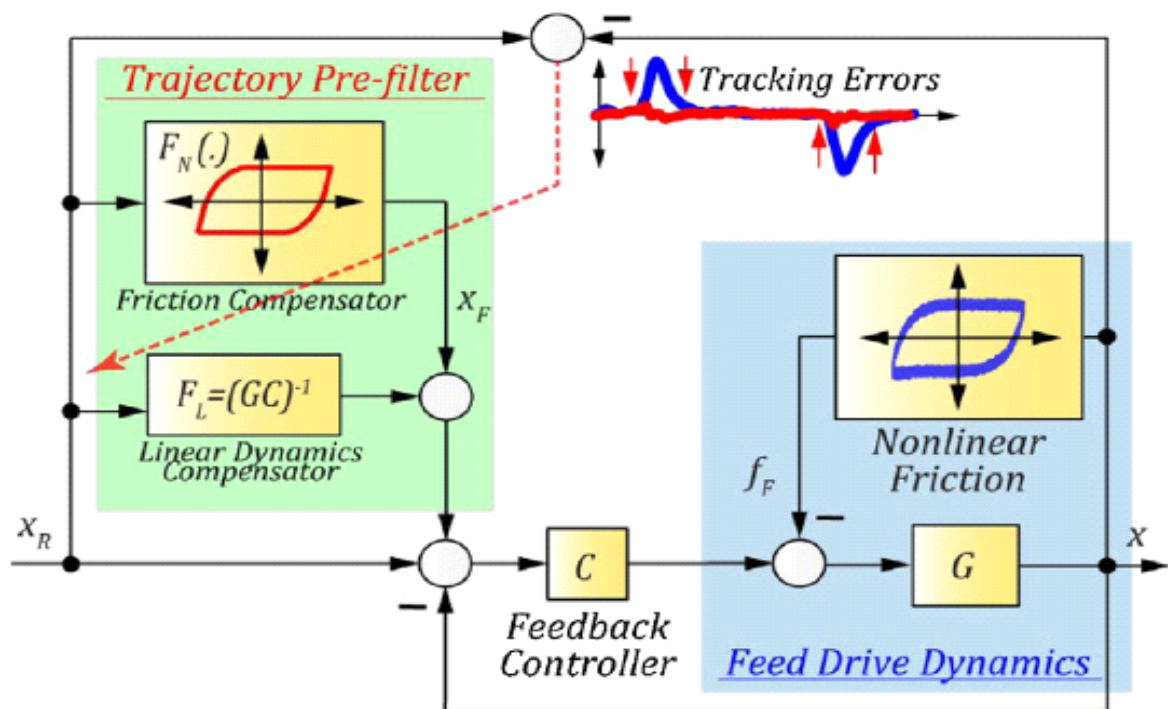


Рисунок 1.4 – Стратегія модифікації траєкторії

Як показано на рисунку 1.4, опорна траєкторія  $x_R$  змінюється двома пре-компенсаційні фільтри,  $F_N$  та  $F_L$ .

Модифікована траєкторія  $x_M = x_R + F_L(x_R) + F_N(x_R)$  потім надсилається в систему керування сервоприводом із замкнутим контуром таким чином, що кінцеве положення осі  $x$  ідеально слідує команді  $x_R$ . Передкомпенсаційний фільтр  $F_L$  використовується для погашення лінійної динаміки замкнутого контуру приводу подачі.

Тоді як  $F_N$  призначений для нейтралізації помилок, спричинених нелінійним тертям джойстика/ковзання, шляхом зміщення опорної траєкторії під час зміни швидкості.

## Основні принципи управління сервомотором

Як вже говорилося вище, для управління серводвигунами існують чотири основні принципи: цифрова обробка сигналів, управління зі зворотним зв'язком, польове управління та інтеграція з Industry 4.0.

Цифрова обробка сигналів дозволила оптимізувати управління серводвигуном, розширивши межі в методах управління і відкривши нові можливості. Цифрова обробка сигналів дозволяє обійти обмеження аналогових систем управління, тим самим закладаючи нову основу для більш ефективного управління серводвигуном.

Ключові моменти в цифровій обробці сигналів для управління серводвигуном включають:

- контроль точності. Цифрова обробка сигналів дозволяє використовувати вдосконалені алгоритми керування, які підвищують точність керування. Це досягається завдяки тому, що цифрові контролери можуть приймати, обробляти та реагувати на зміни вхідних сигналів у режимі реального часу, пропускаючи багато етапів у налаштуванні керуючого впливу;

- адаптивне управління. Так як серводвигуни функціонують в динамічних середовищах зі зміною навантаження і виникненням різних похибок, то принцип цифрової обробки сигналів допомагає інтегрувати адаптивне управління серводвигунами. Цей вид контролю нейтралізує збурює впливає в режимі реального часу і коригує управління в залежності від нових умов, тим самим покращуючи продуктивність і ефективність серводвигунів;

- фільтрація шуму. У реальних виробничих умовах серводвигуни піддаються перешкодам і шуму від інших пристроїв, конструкцій виробничої лінії, додаткових навантажень тощо. Принцип цифрової обробки сигналу

дозволяє виявляти і нейтралізувати шуми для підтримки точності керуючого сигналу на необхідному рівні;

- мережева взаємодія та комунікація. Обмін даними серводвигунів в рамках єдиної системи полегшується за рахунок принципу цифрової обробки сигналів. Координація дій, регулювання управління та інші мережеві можливості дозволяють синхронізовано керувати серводвигунами в складних виробничих процесах, таких як роботизовані технологічні лінії.

Однак, поряд з перевагами цифрової обробки сигналу, у цього принципу є і деякі недоліки:

- обчислювальна потужність. Реалізація алгоритмів цифрової обробки сигналів вимагає значних обчислювальних ресурсів. Для забезпечення обробки сигналу в режимі реального часу необхідно точно розрахувати час обробки і реакцію сигналу контролера для повної реалізації потенціалу всієї системи управління;

- інтеграція з існуючими системами управління. Інтеграція керування на основі цифрової обробки сигналів з іншими системами може створити проблеми через проблеми сумісності та необхідність належного проектування інтерфейсу керування;

- системи управління зі зворотним зв'язком - це системи управління замкнутим контуром, які порівнюють фактичний вихідний сигнал з шуканим. Виходячи з різниці між цими значеннями, вони регулюють параметри керування, тим самим змінюючи поведінку системи, щоб мінімізувати відхилення вихідного сигналу.

У випадку з серводвигунами системи управління зі зворотним зв'язком надають задане значення положення, швидкості або будь-якого іншого вихідного параметра двигуна.

Система управління зі зворотним зв'язком складається з наступних компонентів:

- датчик. У випадку з серводвигунами енкодери або потенціометри в основному використовуються для безперервного відстеження швидкості або положення вихідного валу двигуна;

- контролер. Це деталь, що відповідає за обробку сигналів зворотного зв'язку і формування керуючих впливів через вбудований контролер на двигун. У більшості систем управління використовується ПД-контролер для його швидкодії і мінімізації похибки на виході;

- бажаний вихідний сигнал. Це цільове значення, на досягнення якого спрямована система управління двигуном. За шукане значення можна прийняти будь-який параметр, що становить основу для системи управління.

Принцип роботи системи управління зі зворотним зв'язком досить простий і функціонує за чітким алгоритмом. Датчик безперервно відстежує вихідне значення в режимі реального часу і відправляє дані на контролер. Потім похибка обчислюється шляхом порівняння сигналів, і виводиться керуючий вплив.

За допомогою контролера і його компонентів формується керуючий сигнал для мінімізації відхилення і підвищення стабільності роботи системи управління.

До переваг систем зворотного зв'язку можна віднести:

- точність. Безперервний контроль вихідного значення дозволяє системам зворотного зв'язку досягати високих показників підтримки потрібного вихідного сигналу;

- динамічний відгук. Системи управління зі зворотним зв'язком забезпечують швидку реакцію на зміну навантаження, перешкоди або шум, що дозволяє використовувати серводвигуни в умовах, що змінюються;

- зменшення статичної похибки. Контролери, що використовуються в цих системах, мінімізують статичну похибку і скорочують час перехідного процесу;

- стабільність. Управління замкнутим контуром підвищує загальну стійкість системи управління.

Векторне керування — це метод керування, який дозволяє оптимізувати керування двигунами змінного струму (АС) і синхронними двигунами з

постійними магнітами. У цьому методі управління використовується підхід, при якому окремо розглядається крутний момент і струмовий потік двигуна.

Основна ідея полягає в перетворенні трифазного струму і напруги в обертову систему координат, вирівнюючи магнітний потік з магнітним полем ротора. Це дозволяє незалежно контролювати крутний момент, що призводить до кращого динамічного відгуку системи керування, зниження додаткового шуму та підвищення ефективності.

Основними складовими польово-орієнтованої системи управління є:

- перетворення координат. Векторне керування ґрунтується на перетворенні струмів у систему координат за допомогою перетворень Парка і Кларка, що спрощує завдання керування та оптимізує роботу двигуна;
- контроль струму. Точне керування струмами має вирішальне значення. Незалежне регулювання крутного моменту дозволяє мінімізувати втрати і підвищити ефективність;
- використання PI-контролерів. Використання контролерів цього типу допомагає зменшити помилки керування, підвищити чуйність і забезпечити безперервну підтримку бажаної роботи двигуна.

До ключових переваг векторного принципу управління можна віднести:

- покращений динамічний відгук. Швидке і точне управління двигуном забезпечує миттєву динамічну реакцію;
- зменшення перешкод крутного моменту. Це значно знижує коливання крутного моменту, забезпечуючи плавну роботу двигуна;
- підвищена ефективність. Оптимізація струмів двигуна і мінімізація втрат призводять до підвищення загальної ефективності двигуна;
- підвищена питома потужність. Можна досягти конструкції більш компактних і легких серводвигунів з більшою потужністю, що робить їх придатними для використання в обмеженому просторі.

Індустрія 4.0 дозволяє використовувати інтелектуальні технології, які змінюють поведінку механізмів у промисловості, при цьому серводвигуни є

одним із ключових елементів розумних технологій завдяки їх забезпеченню точності та ефективності.

Завдяки інтеграції з Industry 4.0 з'явилися нові можливості в прогностному управлінні та безшовній комунікації виробничих процесів і механізмів.

Основними моментами інтеграції з Industry 4.0 є:

- підключення до Інтернету речей (IoT). Сервомотори, підключені до Industry 4.0, є частиною єдиної мережі Інтернету речей. Це з'єднання дозволяє в режимі реального часу відстежувати стан двигуна, збираючи безліч даних, таких як робочі параметри, температура, вібрація тощо;

- аналіз даних та прогнозне обслуговування. Сучасні методи аналізу даних дозволяють збирати потоки даних від серводвигунів в єдину базу даних. Така системна організація даних дозволяє прогнозувати поведінку двигуна та планувати технічне обслуговування та ремонт, таким чином уникаючи необґрунтованих простоїв обладнання;

- віддалений моніторинг та управління. Серводвигуни, підключені до Індустрії 4.0, можуть мати повторне керування. Це вигідно на великомасштабному виробництві, де двигуни розподіляються по великій площі, що вимагає дистанційного керування та моніторингу стану двигуна для своєчасного регулювання управління без втручання на місці. Віддалений моніторинг зменшує затримки та підвищує загальну ефективність виробництва;

- стандартизації. Використання спеціальних стандартів, таких як Open Platform Communications Unfired Architecture (OPC UA), полегшує інтеграцію серводвигунів в єдину мережу з іншими виробничими компонентами;

- адаптивне управління. Інтеграція з Industry 4.0 дозволяє розробляти і використовувати гнучкі системи управління серводвигунами. Системи управління можуть оперативно адаптуватися до мінливих умов і реагувати на порушення, тим самим скорочуючи час налаштування і простоїв;

- енергоефективність. Підключивши серводвигуни до єдиної мережі за протоколами Industry 4.0, можна знизити енерговитрати виробництва та

оптимізувати процеси для використання більш логічного розподілу енергоресурсів.

Також буде розглянуто такий метод як: програмоване управління серводвигуном, яке засноване на використанні спеціалізованого програмного забезпечення та зовнішніх контролерів для управління швидкістю, позиціонуванням і крутним моментом двигуна. Цей метод пов'язаний з принципом інтеграції з Industry 4.0. Програмоване управління, в залежності від поставленого завдання, забезпечує адаптивне управління і настройку, допускаючи інтеграцію з іншими системами управління. Відповідно, цей спосіб управління серводвигунами знаходить своє застосування в автоматизованих системах управління виробництвом і робототехніці.

За допомогою зовнішнього контролера програмоване управління дозволяє визначати діапазон бажаних положень за допомогою відповідних команд і підтримує різні варіації руху, такі як плавний старт і зупинка, профілі прискорення, підтримання постійної швидкості або крутного моменту тощо.

Використання зворотного зв'язку в програмованій системі управління має важливе значення, причому зворотний зв'язок може бути як поступовим, так і абсолютним. Вимірювання положення або швидкості обертання вихідного валу серводвигуна дозволяє отримати більш чітку реакцію на помилки, які можуть виникнути під час позиціонування, і плавну реакцію для їх усунення. Гнучкість управління підтримується також за допомогою різних систем координат (в тому числі відносних або зовнішніх).

Взаємодія з іншими пристроями в системі управління за допомогою програмного методу забезпечується за рахунок використання різних протоколів, таких як EtherCAT, Modbus і т.д. Крім того, програмний метод дозволяє створювати системи диспетчерського контролю та збору даних (SCADA) для взаємодії між машинами та людьми. Використання різних мов програмування, а також фірмових бібліотек сервомоторів дозволяє оптимізувати витрати на управління і інтеграцію двигуна в існуючі системи управління.

Програмоване управління, виходячи зі своїх особливостей, має такі недоліки, як складність програмування і реалізація через наявність безлічі розрізнених систем управління, і залежно від обчислювальної потужності може статися втрата продуктивності в реальному часі. Також варто відзначити, що даний метод є єдиним серед всіх проаналізованих в даній роботі, який вимагає постійного налагодження і супроводу всіх задіяних систем.

Цей метод ідеально підходить для інтеграції декількох різних інтерфейсів в єдину систему і дозволяє швидко аналізувати вхідні дані з різних джерел, що робить його універсальним підходом до програмних методів.

#### Порівняння методів управління сервомоторами

Порівняння методів управління серводвигунами може певною мірою відрізнитися для кожного технічного рішення, тому в даній роботі пропонується загальне порівняння, засноване на декількох параметрах: швидкості, точності, адаптивності, енергоефективності, популярності, простоті реалізації і витрат на матеріальні ресурси. Це загальні показники, за якими можна оцінити ефективність представлених методів контролю і вибрати найбільш підходящий для конкретного випадку.

Кожна характеристика відіграє ключову роль в побудові системи управління і оцінюється за п'ятибальною шкалою:

- швидкість необхідна для оцінки реакції системи управління на вхідні збурення і зміни вхідних параметрів (1 — низька швидкість, 5 — висока швидкість);
- точність є основним параметром для систем, заснованих на позиціонуванні (1 — низька точність, 5 — висока точність);
- адаптивність відповідає за ступінь пристосованості системи управління до мінливих умов (1 — низька гнучкість, 5 — висока гнучкість);

- енергоефективність показує кількість і якість спожитої енергії (1 — збільшене споживання енергії, 5 — низьке енергоспоживання);
- популярність свідчить не тільки про ступінь поширення методу в галузі, а й про доступ до достовірної інформації про створення системи управління на основі того чи іншого методу (1 — низька популярність, 5 — висока популярність);
- простота впровадження важлива для оцінки складності розробки та підтримки створеної системи управління (1 — легко впроваджується, 5 — важко впроваджується);
- витрати на матеріальні ресурси впливають на економічний фактор розробки системи управління, її вартість і термін окупності з урахуванням ефективності та аспектів продуктивності (1 — високі витрати, 5 — низькі витрати).

Наочне порівняння характеристик наведено на рисунку 1.5.

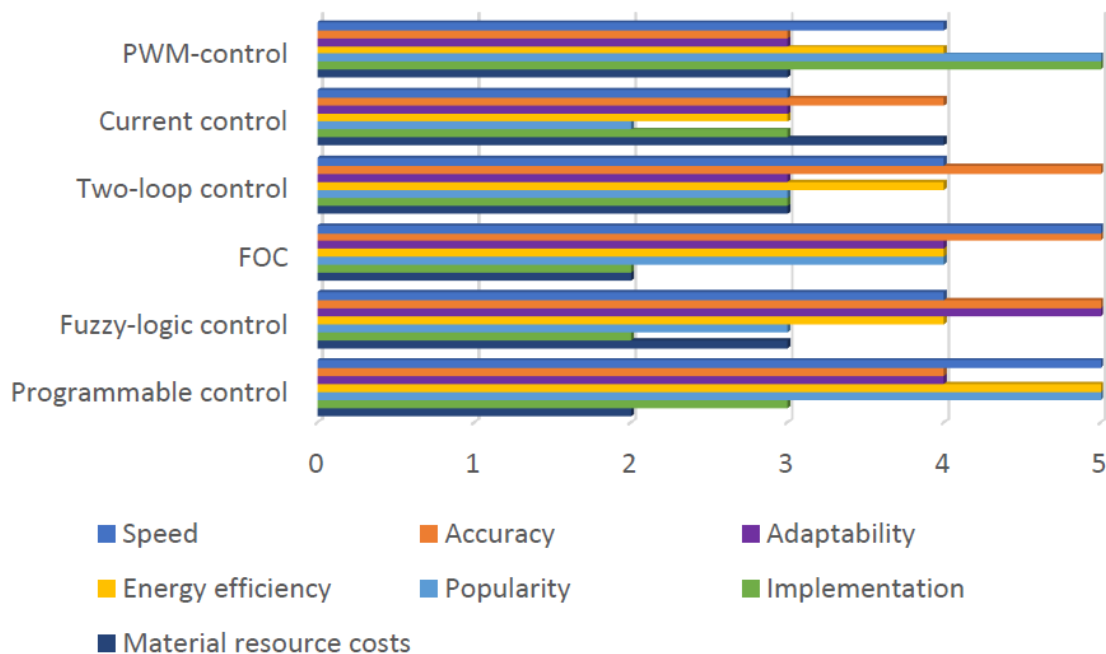


Рисунок 1.5 – Порівняння основних характеристик методів управління сервомоторами

Як видно з порівняння, найбільш популярним і енергоефективним методом на сьогоднішній день є програмоване управління серводвигунами. Однак найбільш простим в реалізації є ШІМ-управління, а в термінах адаптивного управління розглядається алгоритм нечіткої логіки. За точністю виділяються три способи управління: двоконтурне управління, ФОК і управління нечіткою логікою. Підводячи підсумок, можна сказати, що при виборі методу управління серводвигуном доцільно враховувати вихідні характеристики бажаного управління, тобто обирати параметри управління, які несуть більшу відповідальність за виконання конкретних операцій.

При управлінні сервомоторними операціями декартового робота Хірата використовується пряме управління на основі алгоритму нечіткої логіки. Це пов'язано з тим, що алгоритм використовується не тільки для управління двигуном, але і для діагностики механічних пошкоджень в трансмісіях робота. Тому важливими характеристиками для керування серводвигуном є точність, адаптивність та швидкість керування. Крім того, адаптивність нечіткої логіки в поєднанні з високою точністю дозволяє використовувати її в налаштуванні цифрових двійників для моделювання різних станів і поведінкових варіацій.

Нечітка логіка сприяє розвитку системи управління в декількох напрямках, дозволяючи цифровому двійнику емулювати людську логіку, засновану на зовнішніх факторів. Ця людська здатність приймати рішення має вирішальне значення в сценаріях, де жорсткі системи, засновані на правилах, можуть не допомагати, забезпечуючи більш тонкий і реалістичний підхід.

Крім розглянутих вище методів управління сервомоторами, з'являються нові методи, які ще не отримали широкого застосування в промисловій, робототехніці та інших областях, а тому не розглядаються в порівнянні з представленими методами. Однак варто відзначити, що сучасні методи управління серводвигунами є дуже перспективним напрямком в розробці систем управління. До таких методів належать модельне прогнозне

керування (MPC), керування нейронними мережами (NNC), кусково-лінійне керування та інші.

ГДК - це метод управління, при якому за допомогою точної математичної моделі механізму або процесу можна створити модель поведінки і заздалегідь визначити критерії ефективності. Цей контроль знаходить своє застосування в областях, де необхідне управління системами з затримками або змінними характеристиками, таких як хімічне виробництво і роботизовані системи тривалої дії. Однак, незважаючи на те, що MPC дозволяє оптимізувати продуктивність системи на основі бажаних критеріїв, обчислювальна потужність цього методу залишається значним недоліком, який обмежує його поширення. Створення складної математичної моделі, а також обчислення оптимального рішення на кожному кроці часу є складним завданням для більшості механізмів і виробництв.

ННК – це метод керування, який використовує нейронні мережі та принципи штучного інтелекту для апроксимації нелінійних функцій керування та математичної моделі процесу. Цей тип управління серводвигунами використовується в системах, де неможливо або важко створити точну математичну модель, наприклад, в багаторівневих автономних системах управління. Цей метод перегукується з методами управління, заснованими на нечіткій логіці, і володіє аналогічними позитивними якостями, такими як гнучкість, адаптивність управління, здатність швидко реагувати на зовнішні впливи. Однак, на відміну від нечіткої логіки, навчання нейромережі вимагає величезної кількості даних і ресурсів, а також значної кількості часу, що є перешкодою в реальному світі, де потрібне швидке прийняття рішень на основі невивчених даних.

Кусково-лінійне управління серводвигунами - це метод управління, що дозволяє розділити криву управління двигуном на окремі лінійні відрізки для досягнення контрольних точок з досить високою точністю. Цей метод характеризується простотою імплементації та дискретизації керуючого простору, при цьому кожен сегмент управління має свої особливості.

Цей метод є оптимальним рішенням там, де використання складних алгоритмів обходиться занадто дорого, а кількість обчислювальних ресурсів істотно обмежена. Однак цей метод є досить специфічним рішенням і має багато обмежень при застосуванні до вирішення складних і динамічних завдань.

## Висновки до першого розділу. Постановка задачі

У цьому розділі описуються структури, виконання, види, основні принципи та методи керування сервомотором, а також висвітлюються його переваги, обмеження та можливості застосування. ШІМ-керування з використанням цифрової обробки сигналів виявляється ефективним у контролі положення, швидкості та траєкторії.

Контроль струму, або контроль крутного моменту, вирізняється високою точністю регулювання крутного моменту, швидкою реакцією на зміни, економією енергії та впливом на точність позиціонування.

Двоконтурне керування, що інтегрує позиційні та швидкісні петлі, підвищує ефективність керування двигуном, пропонуючи точність позиціонування, стабільність у регулюванні швидкості, динамічний відгук та інтеграцію з іншими методами. Польове керування (FOC), засноване на принципі векторного керування, забезпечує точне керування, низький рівень шуму та вібрації, а також високу енергоефективність за рахунок перетворення магнітного поля.

Порівняння методів управління сервомоторами, представлене в цьому розділі, дає всебічний огляд різних параметрів, що мають вирішальне значення для оцінки ефективності різних методів управління. Параметри швидкості, точності, адаптивності, енергоефективності, популярності, простоти виконання, витрат на матеріальні ресурси служать цінними показниками при прийнятті обґрунтованих рішень про вибір методу управління, виходячи з конкретних вимог.

Аналіз показує, що програмоване управління виділяється як найбільш популярний і енергоефективний метод, в той час як ШІМ-управління є найбільш простим в реалізації. Для адаптивного керування розглядається алгоритм нечіткої логіки, а для точності виділяється двоконтурне керування, ФОК та нечітко-логічне керування.

Кожен метод має свою нішу і сильні сторони, і вибір залежить від конкретних вимог застосування. Адаптивність керування нечіткою логікою та ефективність програмованого керування роблять їх особливо універсальними, вирішуючи проблеми в невизначених умовах. У міру розвитку технологій вибір методу керування серводвигуном повинен відповідати зростаючим вимогам щодо точності, адаптивності та ефективності в різноманітних промислових застосуваннях.

## 2 РОЗРОБКА МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ ТОЧНОСТІ РУХУ ПРОМИСЛОВИХ СЕРВОПРИВОДІВ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У цьому розділі представлено новий динамічний підхід до компенсації помилок з новою схемою налаштування замкнутого циклу на основі даних для підвищення точності відстеження приводів подачі верстатів. Як динаміка сервоприводу, так і помилки позиціонування, викликані порушеннями тертя, попередньо компенсуються зміною опорної траєкторії.

Профілі швидкості та прискорення опорної траєкторії модулюються для досягнення ідеального відстеження. Профіль опорного положення модифікується в залежності від режиму тертя перед ковзанням для усунення збоїв у квадранті. Оптимальна компенсація похибки досягається за рахунок цифрового фільтра попереднього очищення траєкторії, параметри якого налаштовуються автоматично шляхом виконання ітераційних коригувань на льоту. Ефективність запропонованого компенсаційного підходу підтверджена експериментально в багатоосьових системах подачі-приводу.

Продуктивність і загальна точність верстатів залежать від швидкості і точності його систем подача-привід. Приводи подачі страждають квазістатичними об'ємними і динамічними помилками відстеження. Об'ємні похибки можуть бути виміряні і компенсовані за допомогою модифікації опорної траєкторії без втручання сервоконтролера. Помилки динамічного відстеження виникають постійно, так як сервоконтролер намагається компенсувати інерційні і в'язкі демпфуючі сили і намагається подолати нелінійне тертя і викликані процесом збурення.

### 2.1 Компенсація лінійної динаміки сервоприводу

Приводи подачі верстатів в основному управляються каскадними контролерами P-PI або PID, щоб уникнути захоплюючих структурних резонансів [20]. В результаті в типовій реакції стеження «подача-привід» переважає

динаміка  $C(s)$  установки з жорстким кузовом і контролером  $FB$ , що викликає великі помилки сервоприводу при швидкому прискоренні і уповільненні. Якщо вихідна траєкторія змінюється фільтром попереднього очищення  $FL$  (див. рисунок 2.1), де функція передачі в домені Laplace ( $s$ ) вибирається як [20]:

$$F_L = \frac{1}{GC} = \frac{ms^3 + bs^2}{K_D s^2 + K_P s + K_I} \rightarrow \frac{x}{x_R} = (1 + F_L) \underbrace{\left( \frac{GC}{1 + GC} \right)}_{G_{cl}} \simeq 1 \quad (2.1)$$

Динаміка сервоприводу замкнутого циклу може бути компенсована для досягнення майже ідеальне відстеження. Зверху структура фільтра попереднього очищення задовольняє основні припущення. По-перше, чисельник підсилює початкові профілі прискорення і швидкості тільки на величину некомпенсованої маси ( $m$ ) і в'язкого тертя ( $b$ ).

По-друге, знаменник намагається компенсувати динаміку контролера  $FB$ . Зауважимо, що всі лінійні сервоконтролери можуть бути реалізовані шляхом відображення їх параметрів в базові коефіцієнти підсилення PID, [21]. Таким чином, запропонована конструкція фільтра грубого очищення може вловлювати динаміку більшості промислових сервосистем.

Початкові параметри попереднього фільтра визначаються автоматично на основі одного експерименту з замкнутим циклом відстеження. Машина інструктується за допомогою простої траєкторії вперед-назад і записується отриманий профіль помилки, динаміка похибки регулюється так [21]:

$$\frac{e_L}{x_R} = \frac{1}{1 + GC} = \frac{ms^3 + bs^2}{ms^3 + (K_D + b)s^2 + K_P s + K_I}$$

$$e_L = x_R - \frac{1}{m} \left( (K_D + b) \int_0^t e_L d\tau + K_P \int_0^t \int_0^t e_L d\tau + K_I \int_0^t \int_0^t \int_0^t e_L d\tau - b \int_0^t x_R d\tau \right) \quad (2.2)$$

Рівняння (2.2) відбирається на періоді сервоциклу і нормалізується за масою ( $m$ ), параметри попереднього фільтра визначаються методом найменших квадратів (LS) [21]:

$$\min_{\boldsymbol{\theta}} \frac{1}{2} \|\Phi \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\gamma}\|_2^2 \quad \text{subject to : } \boldsymbol{\theta} \geq 0$$

$$\boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} x_R(0) - e_L(0) \\ x_R(T_s) - e_L(T_s) \\ \vdots \\ x_R(MT_s) - e_L(MT_s) \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_D + b \\ K_P \\ K_I \\ b \end{bmatrix} \frac{1}{m}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} e_i(0) & e_{ii}(0) & e_{iii}(0) & -x_{Ri}(0) \\ e_i(T_s) & e_{ii}(T_s) & e_{iii}(T_s) & -x_{Ri}(T_s) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_i(MT_s) & e_{ii}(MT_s) & e_{iii}(MT_s) & -x_{Ri}(MT_s) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

де  $e_i, e_{ii}, e_{iii}$  – цифрові інтегровані профілі  $e_L$  похибок у рівнянні.

На практиці підхід до підгонки передавальної функції може не забезпечити найбільш підходящі параметри компенсатора. Якщо живильний привід страждає від сильного нелінійного тертя направляючого, виявлені параметри твердого тіла можуть бути зміщені [22], або навіть попередньо відфільтрована траєкторія може викликати резонанси [23]. Для полегшення цих практичних проблем розроблено підхід точного налаштування «машина в циклі», а також оновлено чисельник фільтра попереднього очищення.

Машина отримує команду від коду NC, що містить безперервні зміни швидкості, показані на рисунку 2.1(а). Параметри попереднього фільтра після оновлюються для мінімізації помилок відстеження навколо перехідних процесів прискорення, що сприяє усуненню нелінійного зміщення тертя і в той же час штрафуює за збудження динаміки помилок вищого порядку. Це можна постулювати за допомогою наступної задачі оптимізації [23]:

$$\min_{m, b} \left( J_L = \frac{1}{2} \|\mathbf{e}_L\|_2^2 = \frac{1}{2} \mathbf{e}_L^T \mathbf{e}_L \right), \quad \text{subject to: } m \geq 0, b \geq 0 \quad (2.4)$$

де  $e_L$  - вектор помилки відстеження. На основі рівняння (2.4) параметри попереднього фільтра регулюються; компенсована траєкторія знову надсилається на машину, і результуюча тенденція помилки використовується для оновлення параметрів фільтра для наступного запуску, як показано на рисунку 2.1 (b). Ітерації «машина в циклі» продовжуються до досягнення збіжності.

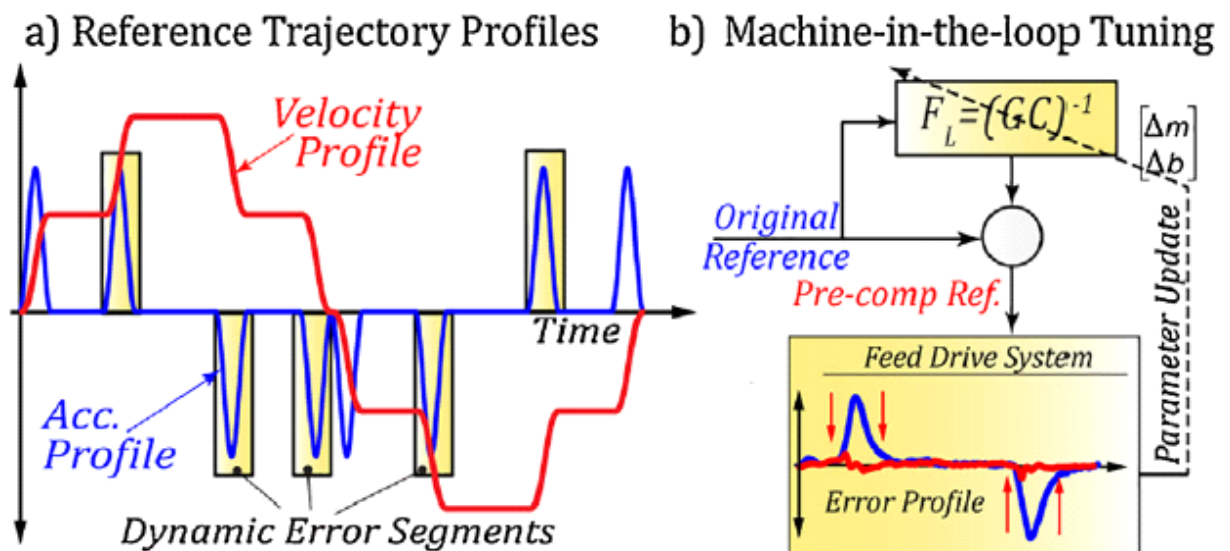


Рисунок 2.1 – Машинна настройка траєкторного префільтра FL

Цей підхід імітує ручну настройку експерта методом проб і помилок. Безпечна та надійна конвергенція має вирішальне значення. Автоматичне оновлення параметрів досягається рішенням в рівнянні (2.4). Це задача опуклої оптимізації, і, отже, використовуючи градієнт (якобіан) її вартісна функція, позитивна визначена матриця Гесса, дозволяє нам швидко і безпечно спрямувати пошук до глобального мінімуму.

Зауважу, що вже доступний у вигляді даних вимірювання, а його градієнт може бути отримується шляхом фільтрації опорної траєкторії або вихідної некомпенсованої відповіді з рівняння (2.1) як [23]:

$$e_L = x_R - x = \left( \frac{1 - F_L GC}{1 + GC} \right) x_R \rightarrow \nabla e_L = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_L}{\partial m} \\ \frac{\partial e_L}{\partial b} \end{bmatrix} = -\nabla F_L \underbrace{\left( \frac{GC}{1 + GC} \right)}_x x_R$$

$$\text{where } \nabla F_L = \begin{bmatrix} s^3 \\ s^2 \end{bmatrix} \frac{1}{K_D s^2 + K_P s + K_I} \quad (2.5)$$

Параметри фільтра оновлюються простим використанням ітераційної схеми другого порядку Ньютона:

$$\begin{bmatrix} m \\ b \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} m \\ b \end{bmatrix}^k - \alpha (\nabla^2 J_L)^{-1} (\nabla J_L) \quad (2.6)$$

Компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання

В даний час сервомеханізми є ключовими компонентами, що використовуються в широкому спектрі промислових секторів завдяки їх вражаючим динамічним характеристикам руху та можливості легкої переналаштування їх завдань, що дозволяє швидко адаптувати загальні виробничі системи до нових запитів і форматів [23].

Вони широко застосовуються для приведення в дію роботизованих систем і верстатів, а також у різних виробничих процесах, таких як текстиль, поліграфія, лиття під тиском, обробка металів тиском і харчова промисловість [24]. Зростаючі стандарти якості продукції вимагають підвищення точності руху багатьох виробничих систем, таких як роботизована точна обробка та складання, метрологічне обладнання, верстати з числовим програмним керуванням (ЧПУ) [25] та верстати для лазерного різання.

Незважаючи на це, комерційні сервомеханізми зазвичай мають різні внутрішні проблеми, які заважають їм відповідати суворим вимогам щодо

точності положення. На рисунку 2.2, відмінності між еталонним положенням ( $\theta$ ) і ефективним положенням, отриманим на кінцевому ефекторі, викликані тим, що:

- система управління замкнутим контуром, а саме неоптимальний закон управління і параметрами, реалізований в системах приводу, що призводить до;
- проміжні механічні муфти та інтерфейси (за наявності);
- які зазвичай вносять еластичність у передачу, що призводить до;
- Редуктор швидкості (встановлюється для кращого узгодження руху та крутного моменту;
- вимог конкретного застосування), що неминує призводить до помилки передачі (TE) і призводить до (де  $\tau$  є коефіцієнтом редукції).

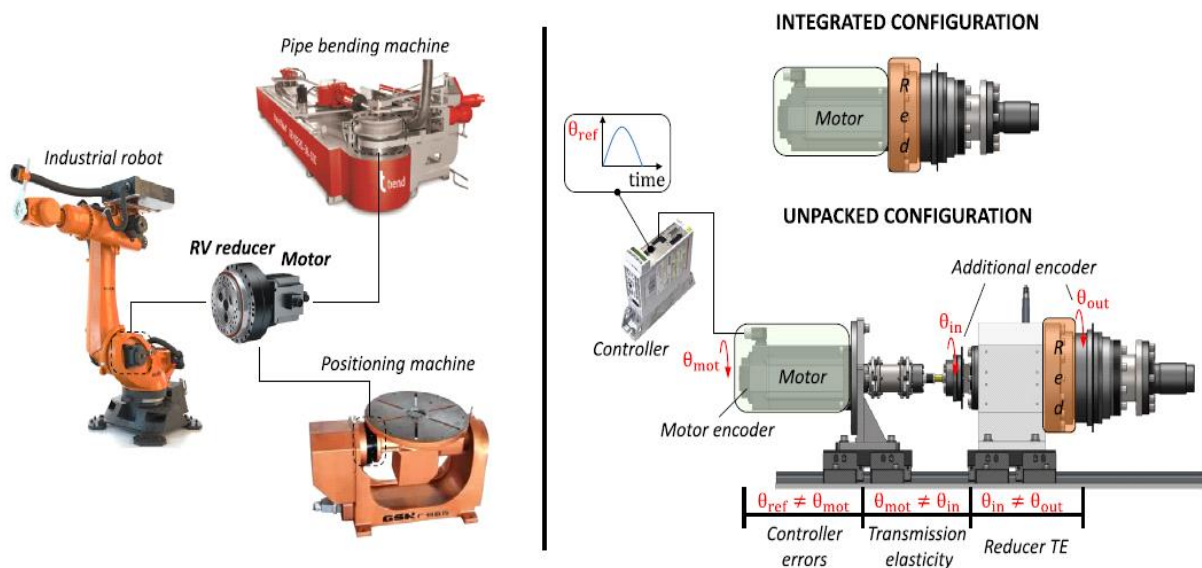


Рисунок 2.2 – Промислове застосування та механічні конфігурації редукторів для автофургонів

Редуктори можуть бути особливо складними [26]. В першу чергу це пов'язано зі складним характером вузлів редукторів, що складаються з численних деталей і взаємних складних контактних взаємодій, характер яких може бути не ідеально передбачуваним, оскільки вони строго пов'язані з виготовленням деталей (наприклад, форма зуба і допуски). Складність посилюється при використанні компактних рішень, таких як редуктори з обертовими векторами

(RV), які поєднують планетарний ступінь з циклоїдальним ступенем для досягнення більш високих коефіцієнтів зниження (зазвичай в діапазоні від 30 до 300, як видно з каталогів виробників) [27].

Як правило, динамічна поведінка редукторів швидкості варіюється в залежності від їх кінематичної архітектури і безлічі робочих параметрів, включаючи швидкість, стійкий крутний момент, температуру мастила і ступінь деградації. Складна взаємодія цих факторів вимагає комплексного підходу при спробі змодельовати і зрозуміти їх вплив на ТЕ.

Чисто теоретичні моделі, як ті, що запропоновані в Бібліогр.[28], може недостатньо вловити чутливість параметра, необхідну для прогнозування та компенсації цих нелінійних ефектів у реальних додатках. Крім того, додаткові проблеми виникають у зв'язку з тим, що численні геометричні та функціональні параметри обраного комерційного редуктора залишаються прихованими для користувача, обмежуючи застосовність наданих формул.

Отже, нещодавні дослідження все частіше використовують спеціалізоване обладнання для тестування та збагачення поведінкових моделей, також і отримання розуміння цих складних взаємодій [29]. Незважаючи на те, що згадані роботи зробили значний прогрес у динамічній характеристиці редукторів, у звітних дослідженнях зазвичай враховується зменшена кількість параметрів (наприклад, комбінація швидкості та прикладеного навантаження або знос, за винятком температури масла).

Експерименти, проведені на своєчасно обладнаних випробувальних стендах, дають великі дані і пропонують більш повне розуміння досліджуваної системи в порівнянні з прямими вимірюваннями на промислових машинах.

Тим не менш, відображення ТЕ редуктора в широкій операційній області (тобто з урахуванням 3-4 вхідних параметрів) може зайняти багато часу. Це пояснюється великою кількістю необхідних експериментів (навіть при середньому числі рівнів, призначених кожному параметру), під впливом обраного методу апроксимації, спрямованого на побудову точних емпіричних співвідношень, вдаючись до методів метамоделювання.

У цьому контексті машинне навчання (ML) виявилось цінним інструментом для досягнення хорошого балансу між кількістю експериментів і точністю моделі. Алгоритми машинного навчання можуть аналізувати історичні дані, виявляти закономірності та прогнозувати поведінку системи, що робить їх придатними для моделювання складних, нелінійних динамічних систем. У літературі машинне навчання використовується для розробки прогнозних моделей, які можуть компенсувати помилки, покращувати стабільність і безперервно оптимізувати роботу систем управління і промислових серійних механізмів.

Машинне навчання також було застосовано для прогнозування похибок точності позиціонування промислових роботів у їхньому робочому просторі та відмов під час роботизованих завдань, або для виконання оптимальної генерації траєкторії та компенсації помилок шляху, так і на верстатах з ЧПУ.

У цьому контексті дослідження, представлене в цьому розділі, заглиблюється в критичну область моделювання та компенсації помилок положення в промислових сервомеханізмах, спрямованих на підвищення точності управління та експлуатаційних характеристик в автоматизованих виробничих системах. Зокрема, з метою подолання існуючих прогалин, нові внески цього дослідження будуть такі:

- інженерні методи та інструменти для проведення структурованих експериментальних параметричних досліджень редукторів для автофургонів за допомогою спеціально виділеного апарату випробувального стенду;
- аналіз чутливості характеристик руху редукторів ПШ шляхом оцінки впливу основних робочих параметрів (швидкості, прикладеного крутного моменту та температури мастила) на їх функції ТЕ, з особливим акцентом на явища, що залежать від положення, а саме на події, що відбуваються певну кількість разів за оборот і тому пов'язані з конкретними спектральними компонентами при кожній швидкості обертання;
- реалізація прогнозних моделей машинного навчання ТЕ в редукторах РШ, які ефективно корелюють робочі параметри редуктора з

прямими та зворотними функціями ТЕ протягом цілого обороту вихідного валу. Моделі машинного навчання розробляються з використанням Python і навчаються на експериментальних даних, отриманих на буровій установці;

- інтеграція прогнозних моделей машинного навчання в програмовану Logic Controller (PLC) для виконання онлайн-компенсації в режимі реального часу під час виконання індивідуальних профілів руху з корекцією на основі моделі;

- набір даних з відкритим вихідним кодом, пов'язаних з проведеними вимірюваннями ТЕ і отримали моделі машинного навчання, якими поділилися для полегшення подальшого розвитку.

В цьому розділі буде розроблено вичерпний огляд використовуваного апарату випробувального стенду з детальним описом його механічної архітектури, основних компонентів обладнання та системи збору. Згодом у ньому буде представлено попередній якісний аналіз спектральних характеристик ТЕ редукторів РШ, а також опис методологій тестування, використаних для збору тренувальних даних ML.

Установка випробувального стенду, показана на рисунку 2.3, складається з двох з'єднаних між собою сервомеханізмів, з'єднаних центральним валом. Первинний сервомеханізм, ідентифікований як система, що досліджується, включає в себе серводвигун BOSCH в парі з редуктором Nabtesco RV 160N (коефіцієнт редуктора  $\tau = 81$ , 40 штифтів і 39 зубів на циклоїдальній шестерні).

Другорядний механізм, що складається з серводвигуна BOSCH і аналогічного редуктора з коефіцієнтом редуктора 156, працює як система активного навантаження. Розроблена для змінних у часі профілів крутного моменту та швидкостей, ця система навантаження точно відтворює динамічні умови, з якими стикається досліджуваний сервомеханізм у практичних сценаріях експлуатації, таких як промислові середовища, показані на рисунку 2.2. Обидва сервомеханізми знаходяться під управлінням ПЛК, наданого компанією Beckhoff.

ПЛК забезпечує синхронізований обмін даними з приводами, відповідаючи за керування та регулювання потужності, що подається на серводвигуни. Зв'язок між пристроями встановлюється через польову шину EtherCAT. У цій конфігурації ПЛК бере на себе роль головного, тоді як пристрої вводу/виводу функціонують як підлеглі.

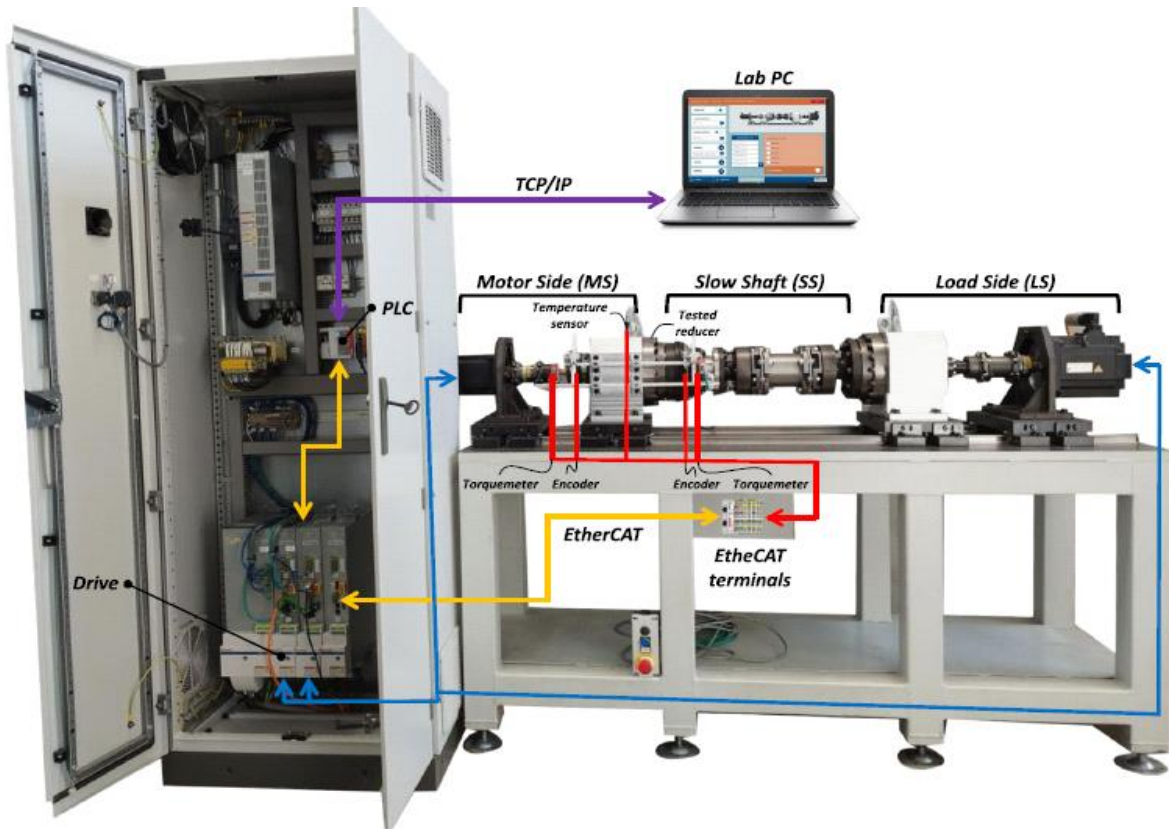


Рисунок 2.3 – Схема тестового стану: функціональні модулі та основні з'єднання

Робота бурової установки програмується і управляється зі стандартного ПК за допомогою спеціального призначеного для користувача інтерфейсу, реалізованого за допомогою Beckhoff TwinCAT HMI і підключеного до ПЛК через TCP/IP. Для глибокого розуміння конструктивних особливостей, властивих цьому прототипу бурової установки, зацікавлені читачі можуть звернутися до Refs [30].

Як видно з рисунку 2.3., представлена архітектура бурової установки складається з трьох основних модулів, а саме Motor Side (MS), повільного валу

(SS) і Load Side (LS). MS і LS представляють механічні трансмісії на вхідній стороні випробуваного редуктора і другого редуктора відповідно, тоді як SS є центральним сполучним валом.

Для правильної оцінки працездатності першого (лівого) редуктора на MS і SS встановлені додаткові оптичні енкодери фірми Renishaw і динамометричний фактор Manner. Додатково в корпус редуктора вбудований датчик температури для контролю температури масла варіації, які впливають на динамічну поведінку редуктора, як задокументовано в Бібліогр.[31], де можна спостерігати помітні зміни з точки зору похибок полягання як для одиночного суглоба, так і для всієї серійної роботизованої системи.

Для дотримання меж вимірювань, поставлених встановленими датчиками, в даній роботі враховуються максимальні значення крутного моменту 50 Н м і 2000 Н м для MS і SS. Таким же чином, з огляду на межі частоти обертання вторинного серводвигуна (4000 об / хв) і коефіцієнти зниження обох редукторів (81 і 156), максимальна робоча частота обертання при MS фіксується на рівні 1800 об / хв.

Оцінка точності редуктора RV проводиться з акцентом на оцінці функції TE, що дає важливу інформацію про його динамічні характеристики. Зчитуванням кутових положень на вхідному ( $\theta_{in}$ ) і вихідному ( $\theta_{out}$ ) валах редуктора з енкодерами, встановленими на MS і SS відповідно, зображених на рисунку 2.2, рисунку 2.3., TE просто отримується в кожній точці як [31]:

$$TE(\theta_{out}) = \theta_{out} - \frac{\theta_{in}}{\tau} \quad (2.7)$$

Для всебічного розуміння поведінки редуктора функції TE зазвичай вимірюються як для прямого, так і для зворотного руху, в результаті чого утворюються дві різні криві ( $TE_f$  та  $TE_b$ ).

З результатів попередніх досліджень, що стосуються аналізу редуктора і графіків TE [32], зображених на рисунку 2.4, стає очевидною залежність TE від

вхідної швидкості, зовнішнього прикладеного навантаження і температури мастила. Зокрема, найбільш значущі гармоніки в пов'язаному спектрі відповідають конкретним фізичним явищам, що впливають на роботу механізму редуктора.

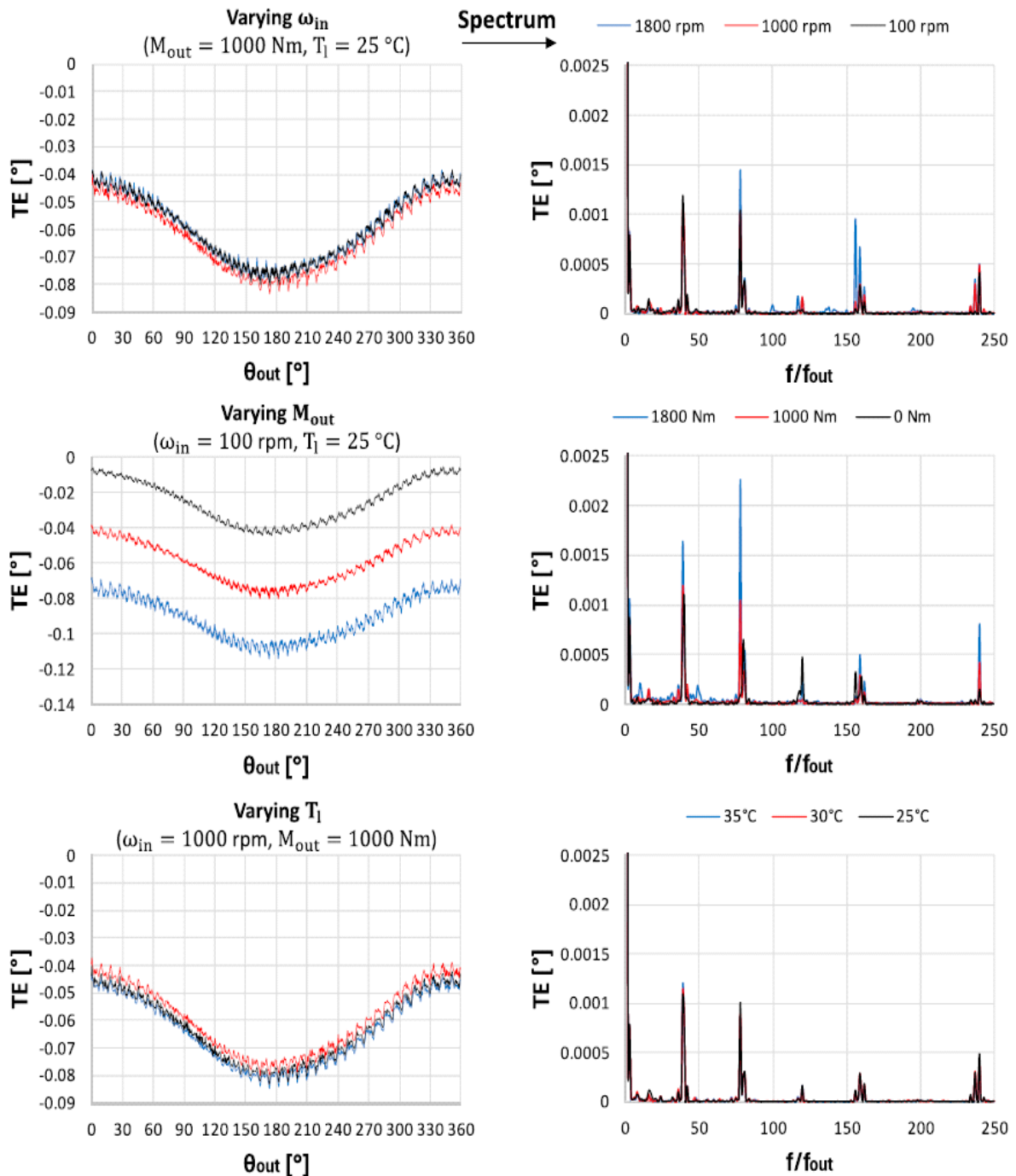


Рисунок 2.4 – Продуктивність передачі редуктора Nabtesco RV: функція TE виражається протягом цілого обороту вихідного валу та пов'язаного з ним спектра

Примітне спостереження, що впливає на рисунку 2.4, полягає в тому, що ці піки завжди виникають на наступних нормованих частотах (тобто  $f/f_{0,out}$ , вихід  $f_{0,out}$ , вихідна частота обертання вихідного валу, виражена в грс):

- компонент 0: пов'язаний з люфтом і пружною деформацією крутильного валу при впливі високих зовнішніх навантажень або внутрішніх фрикційних навантажень;
- компонент 1: виникає через відхилення вихідного валу;
- компонент 3: можливо, пов'язаний з неспіввісністю між планетарним валом редуктора і циклоїдальним диском, що відбувається тричі за один повний оборот вихідного валу;
- компонент 39: пов'язаний з помилками в зубцях циклоїдальних шестерень (під впливом  $M_{out}$ , оскільки він викликає їх локальну пружну деформацію);
- компонент 40: виникає через помилки в штифтах;
- компонент 78: 2-а гармоніка похибок в зубах циклоїдальних шестерень. При більш високих значеннях  $M_{out}$  він впливає більше, ніж компонент 39;
- компонент 81: відображає перекис у швидкому валу, який проявляється 81 раз за один оборот вихідного валу;
- компонент 156: 4-а гармоніка похибок в зубах циклоїдальних шестерень;
- компонент 162: 2-а гармоніка перекосу в пості Вал;
- компонент 240: 6-а гармоніка штифтів;

Отже, згідно з функцією редуктора ТЕ [33], можна математично виразити у вигляді суми найбільш значущих гармонік:

$$TE_-(\theta_{out}, \omega_{in}, T_l, M_{out}) = \sum_{k \in P} A_{-k} \cos(k\theta_{out} + \phi_{-k}) \quad (2.8)$$

де  $P$  - сукупність обраних гармонік, а  $A_{k}$  та  $\varphi_{k}$  - амплітуда і фазовий зсув гармоніки  $k$ , відповідно.

Нижній індекс  $_{k}$  може мати вигляд  $_{k}$  або  $_{-k}$ , що вказує на обертання вперед або назад. Тому, знаючи  $A_{k}$  і  $\varphi_{k}$  для кожної гармоніки  $k \in P$  і для кожної комбінації  $_{k}$ ,  $_{-k}$ , потенційно можна отримати функції ТЕ конкретної моделі редуктора у всьому його робочому діапазоні.

Грунтуючись на характеристиках ТЕ, викладених раніше, і з метою побудови всеосяжної моделі ТЕ для редуктора з використанням співвідношення, вираженого в рівнянні (2.2), було зібрано великий набір даних для встановленого редуктора RV для навчання алгоритмів машинного навчання. Мета полягає в прогнозуванні значень  $T_e$  і  $\omega$  в робочому діапазоні редуктора для полегшення швидких розрахунків ТЕ. У частотній області ці властивості за своєю суттю інкапсулюють складну динаміку редуктора.

Експериментальне дослідження організовано у вигляді тривимірної сітки, що охоплює всі можливі комбінації наступних значень параметрів:

$\in \{100, 200, \dots, 1800\}$  об/хв (18 рівнів)

$\in \{0, 100, \dots, 1800\}$  Н м (19 рівнів)

$\in \{25, 30, 35\}$  °С (3 рівні)

Всього було проведено 1026 експериментів як для прямого, так і для зворотного обертання. Зібрані дані пройшли всебічний аналіз і послужили фундаментом для проектування моделі машинного навчання.

У зв'язку з великою кількістю експериментів було створено та завантажено на ПЛК скрипт, що дозволяє їх автоматизоване виконання.

Скрипт функціонує через стан-автомат, виконуючи наступну послідовність дій:

- попередня перевірка вхідних параметрів, зокрема частоти обертання на МС і ЛС і крутного моменту на СС, щоб переконатися, що вони відповідають межам;

- перевірка стану енкодера для підтвердження того, що обидва додатково оптичні;

- кодери працюють правильно, забезпечуючи точні вимірювання;
- фаза прогріву шляхом накладення безперервного руху з постійною швидкістю на МС до тих пір, поки температура масла в редукторі МС ( $T_l$ ) не досягне необхідного рівня. Під час цієї фази двигун LS включається командою нульового крутного моменту ( $M_{LS} = 0$  Нм), щоб зменшити робоче навантаження на двигун MS, що відповідає за привід всієї трансмісії;
- процедура самонаведення для розташування досліджуваного редуктора під нульовим кутом на стороні виходу ( $\theta_{out} = 0^\circ$ ). Незначні поправки є послідовно виправлені за допомогою двигуна МС для розташування вхідної сторони посередині кутового інтервалу зазору. Для підтримки такого положення МС підтримується активним і на СС подається команда на нульовий крутний момент ( $M_{out} = 0$  Нм) для розвантаження валу і полегшення роботи. Процедура завершується програмним обнуленням обох енкодерів;
- виконання експерименту з приводом двигуна МС з постійною швидкістю. Крутний момент SS поступово збільшується, щоб досягти вхідного-визначена вартість. Коли кодувальник SS перетинає  $\theta_{out} = 0^\circ$ , сигнал встановлюється на TRUE, а потім знову на FALSE після а повна революція. Цей крок має вирішальне значення для постобробки, щоб зіставити TE для  $0^\circ \leq \theta_{out} \leq 360^\circ$ ;

Цей експеримент повторюється для обох напрямків обертання, що дозволяє оцінити  $TE_f$  та  $TE_b$ . У зворотному експерименті, щоб зберегти ту саму кутову прив'язку, процес ініціалізації (включаючи розминку та самонаведення) не відтворюється. Кожен експеримент займав від 5 до 10 хвилин, що призвело до загального часу близько 171 години для запуску всіх 1026 наборів даних вперед і назад.

### 2.3 Попередня компенсація нелінійного передковзного тертя

Запропонований алгоритм апробовано на декартовому мікроверстаті, показаному на рисунку 2.5. Управління осями X і Y здійснюється каскадними

контролерами P-PI зручно налаштованими компенсаторами FF на deltaTau NC систему. Осі переміщуються за допомогою одного G-коду вперед і назад зі швидкістю 50 і 100 [мм/сек].

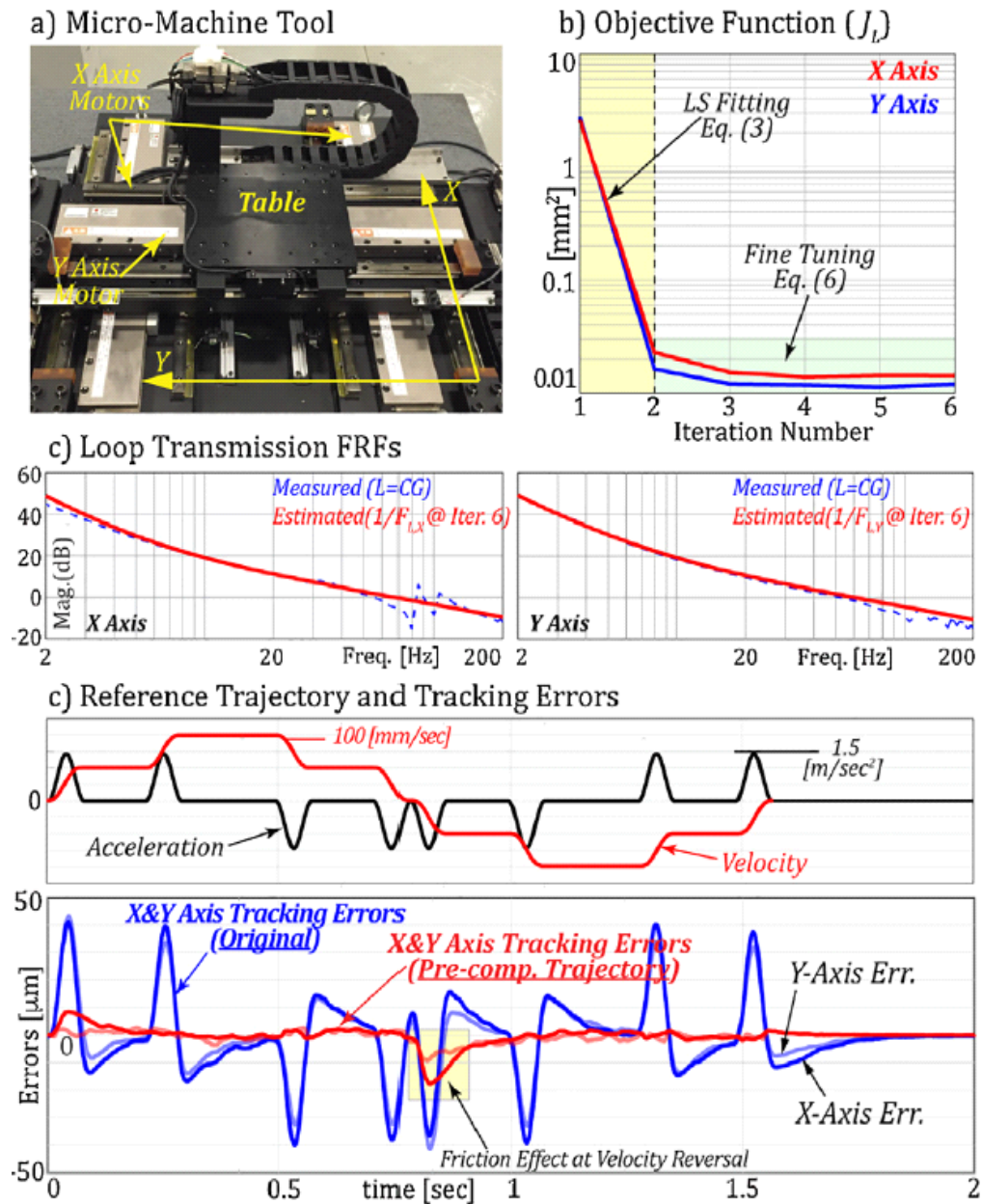


Рисунок 2.5 – Експериментальна валідація компенсації серводинаміки

Еталонна траєкторія і файли помилок записуються на частоті 1 кГц. Як показано на рисунку 2.5 (с), помилки відстеження досягають піку навколо ділянок опорної траєкторії ас/дсс.

Запропонована траєкторія попередньої фільтрації застосовується шляхом перебудови (тренування) префільтра ФЛ за допомогою рівняння (2.3) і (2.6) по

одній траєкторії. Як показано на рис. 2.5 (b), найкращі параметри фільтра виявляються протягом 5-6 ітерацій з , і похибки відстеження зводяться до менш ніж +/- 3[мм].

Решта помилок відстеження пов'язані з нелінійним порушенням тертя. Вони усуваються за допомогою методики попередньої фільтрації еталонної траєкторії. Після того, як фільтр попереднього очищення траєкторії навчений динаміці приводу подачі машини, його можна застосувати до будь-якої траєкторії для ідеального відстеження. Це проводиться шляхом усунення помилок контурування по криволінійній траєкторії інструменту.

Іншим основним джерелом динамічних помилок сервоприводу є нелінійне тертя. Як було показано в попередньому розділі, промислові сервоконтролери не можуть ефективно відхиляти швидко мінливі сили тертя, які залишає збої в квадрантах і помилки розташування поверхні при зміні швидкостей [34]. Далі показано, як можна змінити опорну траєкторію, щоб компенсувати її.

Траєкторний фільтр попереднього очищення використовується для погашення лінійної серводинаміки. Таким чином, при змінах швидкостей очевидні тільки помилки, викликані тертям, і можуть бути передбачені з динаміки замкнутого циклу як:

$$e = f_F \underbrace{\left( \frac{G}{1 + GC} \right)}_{D(s)} - x_F \underbrace{\left( \frac{GC}{1 + GC} \right)}_{G_{cl}(s)} \rightarrow e = \left( \frac{f_F}{C} - x_F \right) \underbrace{\left( \frac{GC}{1 + GC} \right)}_{G_{cl}(s)} \quad (2.9)$$

де  $x_F$  команда попередньої компенсації, згенерована (див. рисунок 2.5),  $F_N$  - збурення ТФ, а - нелінійне збурення тертя, рівняння (2.7) виявляє важливий факт: якщо еталонна траєкторія зміщена фільтрованими силами тертя контролер( $C(s)$ ), це також може компенсувати помилки, спричинені тертям.

Для цього потрібні знання динаміки контролера , яка вже визначена з апроксимації LS в рівнянні (2.3) і точна оцінка сил тертя. Нижче описано, як нелінійне тертя джойстика/ковзання може бути визначено автоматично

(адаптивно) в експериментах із замкнутим контуром і нейтралізовано сигналом попередньої компенсації, що генерується префільтром траєкторії.

Узагальнена модель ковзання Максвелла (GMS) точно фіксує динаміку передковзного тертя, викликану гістеретичним тертям/ковзанням, з нелокальною пам'яттю. Однак він повинен бути налаштований або вручну, або за допомогою нелінійної оптимізації для компенсації або нейтралізації перешкод тертя.

Для полегшення автоматичного налаштування тут пропонується модифікована форма GMS у вигляді [34]:

$$f_{GMS} = \sum_{i=1}^K k_i z_i, \quad \frac{dz_i}{dt} = \begin{cases} \dot{x}_R = v_R, & \text{if stick (i.e. } z_i \leq |P_i/2|) \\ 0, & \text{if slip (i.e. } z_i > |P_i/2|) \end{cases} \quad (2.10)$$

де  $K$  — кількість блоків MS, які прилипають і ковзають (див. рисунок 2.6), а  $k_i$  пружини  $i$ -го блоку під час залипання. Оскільки блоки піддаються локальній мікротрансляції ( $z_i$ ), вони ковзають лише тоді, коли перевищують відстань  $P_i$  відриву (палички). Принципова відмінність наведеної вище модифікованої формули GMS (формули (2.8)) від звичайного; тут умови палиці/ковзання є такими, що регулюються відстанями відриву, а не силами відриву.

Відстань між джойстиком приводів подачі становить 10–100[мм], що можна спостерігати за допомогою простого експерименту з відстеженням. Відстань між джойстиком ділиться і розподіляється на окремі відстані між джойстиком блоку MS як; . В результаті, лише невідомими в цій модифікованій моделі GMS є пружинні коефіцієнти  $k_i$ , які можна визначити просто в сенсі лінійних найменших квадратів (LS).

Крім того, наведена вище формула GMS зберігає всі властивості оригінального GMS, включаючи нелокальну гістерезисну пам'ять [35].

Формула (2.10) може бути представлена в простій лінійній матрично-векторній формі як:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{f}_{GMS} = \mathbf{A} \mathbf{k}, \quad \text{where } \mathbf{A} = [\dot{\mathbf{z}}_1 \quad \dot{\mathbf{z}}_2 \quad \cdots \quad \dot{\mathbf{z}}_K] \quad (2.11)$$

Де  $\mathbf{k} = [k_1 \dots k_K]^T$ , містить пружинні константи, а  $\mathbf{A}$  — пружину матриця активації, яка містить швидкості стік/ковзання для кожного окремого блоку. Її будова проілюстрована на рисунку 2.6 для синусоїдальної траєкторії. Кожен стовпець  $\mathbf{A}$  представляє кінематику джойстика/ковзання окремого блоку MS під час зміни швидкості. Наприклад, перший блок MS залипає при розвороті швидкостей ( $t = 0$ ) до  $x_r = P_1$ , що відбувається при  $t = t_1$ . Наступний блок тримається трохи довше, поки  $x_r = P_2$ ,  $t = t_2$ .

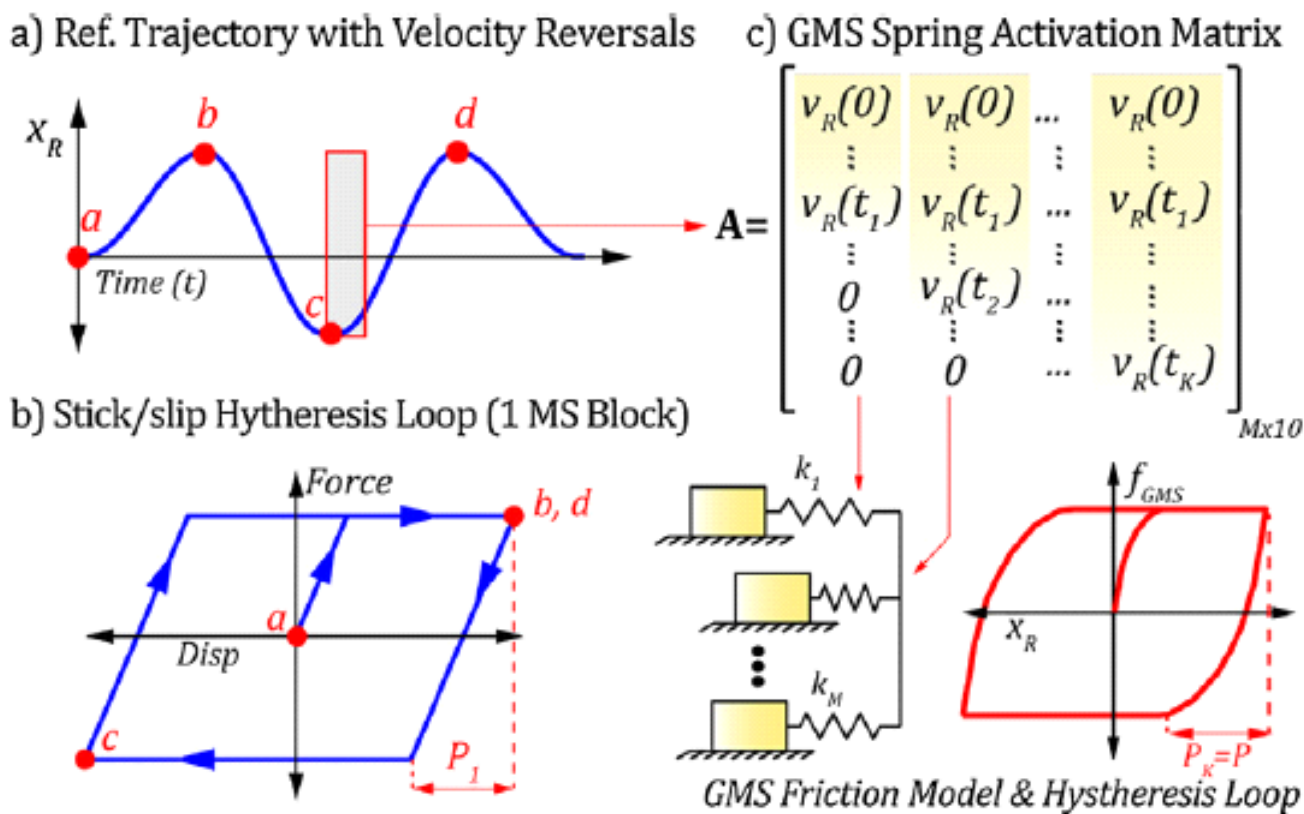


Рисунок 2.6 – Модифікована модель GMS і пружинна матриця активації

(A)

Матриця  $\mathbf{A}$  генерується з опорної траєкторії, і вона є «Залежність від розвороту швидкості».

У поєднанні з пружинними постійними це фіксує поведінку гістерезису, викликану тертям, показану на рисунку 2.6.

Ідентифікація пружинних констант GMS для компенсації (mini-mize) похибки тертя постулюється наступною оптимізаційною проблемою [34]:

$$\min_{\mathbf{k}} \left( J_N = \frac{1}{2} \|\mathbf{e}_v\|_2^2 = \frac{1}{2} \mathbf{e}_v^T \mathbf{e}_v \right), \quad \text{subject to : } \mathbf{k} \geq 0 \quad (2.12)$$

Де,  $\mathbf{k}$  - вектор помилки відстеження, записаний навколо зміни швидкості. Аналогічно попередньому розділу, рівняння (2.10) зображує оптимізаційну задачу з квадратичною метою, і вона може бути вирішено за допомогою його градієнта і Гессо які доступні аналітично шляхом фільтрації вимірних даних про помилку відстеження шляхом підключення формул (2.9) в (2.7) [34]:

$$e = (f_F - f_{GMS}) \frac{1}{C} \left( \frac{GC}{1 + GC} \right) \rightarrow \nabla e = -\nabla f_{GMS} \frac{1}{C} \left( \frac{GC}{1 + GC} \right)$$

$$\text{where: } \nabla f_{GMS} = \int_{t=0}^{MT_s} A dt, \quad \text{and } \nabla = \left[ \frac{\partial}{\partial k_1} \quad \dots \quad \frac{\partial}{\partial k_K} \right]^T \quad (2.13)$$

Де,  $\nabla f_{GMS}$  - це сигнал передкомпенсації тертя, а  $\nabla f_{GMS}$  містить його дискретизований вектор, що містить  $M$  зразки.

Як показано, запропонована формулювання моделі тертя GMS (рівняння (2.10)) дозволяє нам визначити градієнт помилки, спричиненої тертям, явно як функцію опорної траєкторії. Ітерації «машина в петлі» використовуються для безпечного тренування параметрів  $F_N = \nabla f_{GMS}/C$  попереднього компенсатора тертя за допомогою ітерацій Ньютона:

$$\mathbf{k}^{k+1} = \mathbf{k}^k - \alpha (\nabla^2 J_N)^{-1} (\nabla J_N) \quad (2.14)$$

## Використання нечіткої логіки в управлінні сервомотором

Використання нечіткої логіки в управлінні сервомотором дозволяє оптимізувати і адаптувати систему управління двигуном до мінливих вхідних умов. Нечітке логічне управління в першу чергу забезпечує гнучкість і адаптивність в умовах нечітких завдань і відсутності повних даних. Відповідно, нечітка логіка знаходить своє застосування в додатках зі змінними навантаженнями, механізмах, що працюють в мінливому середовищі, роботизованих системах. Управління на основі нечіткої логіки будується на наступних етапах:

- визначення вхідних умов: у випадку з серводвигуном вхідними змінними зазвичай є положення або швидкість вихідного валу;
- визначення нечітких правил: створення нечітких множин з різним ступенем приналежності для кожної вхідної змінної та встановлення правил, які пов'язують умови в єдину систему;
- нечітке логічне висновування: застосування визначених правил до кожного вхідного значення;
- агрегація: Комбінування застосованих правил для визначення керуючої дії;
- дефазифікація: перетворення загального правила дії керування в певне значення, яке потім застосовується до серводвигуна.

Хоча нечітка логіка не вимагає точної математичної моделі, настройка цього методу досить трудомістка. На розвиток методу також впливають складність прогнозування його поведінки в різних умовах і досягнення оптимальної продуктивності без втрати обчислювальної ефективності.

Враховуючи, що для нечіткої логіки немає необхідності використовувати спеціальні і точні математичні моделі, структуру алгоритму можна проілюструвати так, як на рисунку 2.7.

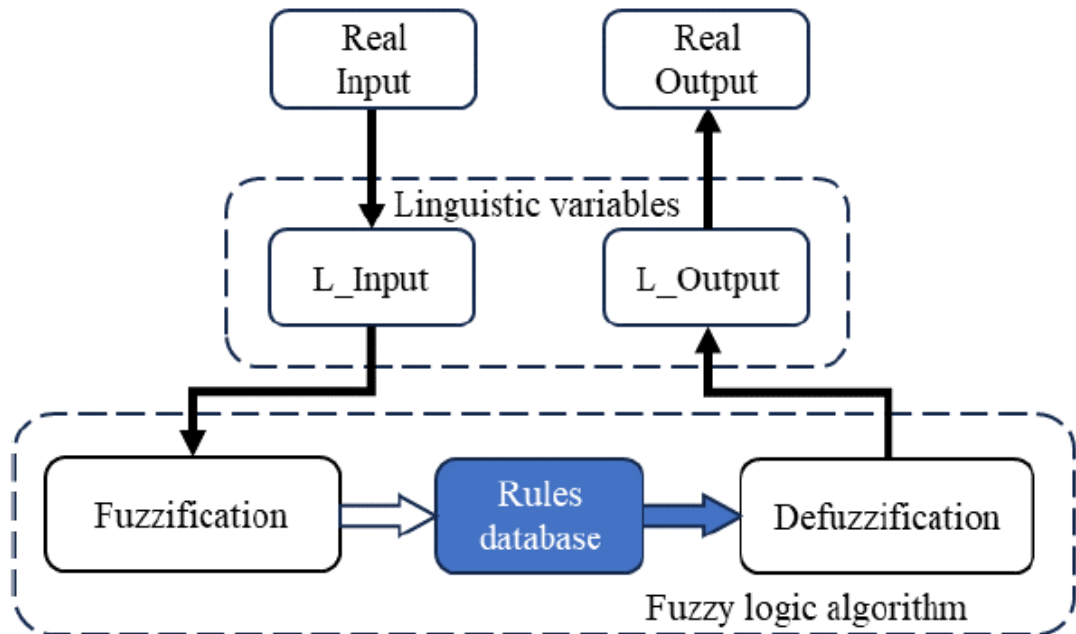


Рисунок 2.7 – Структура алгоритму нечіткої логіки

На відміну від двійкової логіки, де змінні діляться на основі значень true або false, нечітка логіка визначає ступінь приналежності змінної до 0 або 1. Використання даного виду управління дозволяє пристосувати систему управління для роботи в мінливих умовах, навіть під впливом різних стохастичних збурень, таких як зміна навантаження, виявлення механічних помилок і т.д. Управління нечіткою логікою ефективно в ситуаціях, коли прогнозування поведінки математичної моделі системи є складним завданням, а можливість її точного визначення відсутня.

До таких систем відносяться цифрові двійники, які при роботі з реальними об'єктами мають значну ступінь невизначеності. Таким чином, адаптивність системи управління на основі нечіткої логіки є ідеальним рішенням для управління цифровим двійником, а також може служити інструментом для створення багатозадачної системи управління.

## 2.5. Висновки до другого розділу

Запропонована попередньо компенсована траєкторія усуває похибки тертя і тим самим дозволяє обробляти профіль поверхні, близький до ідеалу. Значно

підвищує динамічну точність верстатів за рахунок компенсування для сервоприводу замкнутого контуру та тертя ручки/ковзання (перед ковзанням) викликало помилки шляхом зміни опорної траєкторії.

Запропоновані передкомпенсатори тертя дозволяють досягти майже ідеального відстеження. Після тренування фільтри компенсації траєктори можна використовувати на будь-якій траєкторії для покращення характеристик контурування.

Також розглянуто керування нечіткою логікою в управлінні сервомотором, яка дозволяє оптимізувати і адаптувати систему управління двигуном до мінливих вхідних умов. Нечітке логічне керування, що спирається на нечіткі множини та логічне висновування, забезпечує адаптивне рухове керування в умовах, що змінюються, що робить його ідеальним для невизначених систем, таких як цифрові двійники. Також, програмоване управління, пов'язане з Industry 4.0, використовує спеціалізоване програмне забезпечення та зовнішні контролери, пропонуючи високу гнучкість, ефективність, просту інтеграцію та взаємодію з різними протоколами та системами SCADA.

### **3 РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ ТОЧНОСТІ РУХУ ПРОМИСЛОВИХ СЕРВОПРИВОДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПІДХОДУ ДО МАШИННОГО НАВЧАННЯ**

У цьому розділі розглядається ключовий аспект моделювання та компенсації помилок положення в промислових сервоприводах з метою досягнення точного керування та високопродуктивної роботи в промислових роботах та автоматизованих виробничих системах. Властива складність і нелінійна поведінка цих модулів, які зазвичай складаються з серводвигуна і редуктора швидкості, часто кидають виклик традиційним підходам аналітичного моделювання.

У зв'язку з цим у роботі детально досліджується розробка та реалізація алгоритмів машинного навчання (ML) для отримання всеосяжної моделі помилки передачі (TE) у обертових векторних редукторах, яка є основним джерелом помилок точності руху роботів. Моделі машинного навчання проводяться на основі експериментальних даних, отриманих на випробувальному стенді спеціального призначення, де редуктор тестується при різних комбінаціях вхідної швидкості, прикладеного навантаження та температури масла.

Потім отримуємо прогнозовану модель, адаптовану для фіксації складної динаміки аналізованого редуктора, яка імпортується в програмований логічний контролер для активації онлайн-стратегій компенсації під час виконання користувацьких профілів руху. Експериментальні випробування проводяться з використанням двох різних профілів руху: один генерується за циклоїдальним законом, характерним для промислових машин, а інший екстраполюється зі з'єднань промислового робота під час завдання з підбору.

Отримані результати демонструють ефективність запропонованого підходу, що дозволяє точно прогнозувати та значно знижувати (понад 90%) загального показника TE за допомогою впровадженої прогностичної моделі

### 3.1. Методи управління сервомоторами

Відповідно до принципів управління серводвигунами, наведених вище, розрізняють основні загальні методи управління: ШІМ-управління, регулювання струму, двоконтурне управління, нечітке логічне управління і програмоване управління. ШІМ-управління було описано раніше, при цьому слід зазначити, що даний вид управління заснований на принципі цифрової обробки сигналів, що дозволяє контролювати положення, швидкість і траєкторію руху вихідного валу серводвигуна.

Контроль струму, також відомий як контроль крутного моменту, заснований на зміні струму в обмотках серводвигуна. Цей метод дозволяє точно регулювати крутний момент на валу двигуна, оскільки величина струму пропорційна крутному моменту. Система контролю струму, яка забезпечує високу точність регулювання крутного моменту, підходить для застосувань, де потрібне регулювання навантаження, а також потреба в захисті від перевантаження [36].

В основі поточного контролю лежить принцип зворотного зв'язку і регулювання. Зворотний зв'язок про струм подається на серводвигун, вимірюється струм в обмотках, і значення відправляється на контролер для порівняння з заданим значенням рівняння (5). Коли вимірюване значення відхиляється від заданого, регулятор формує керуючий сигнал для підсилювача потужності.

Підсилювач потужності, в свою чергу, регулює напругу на обмотках двигуна для приведення значення струму до потрібного рівня [37].

$$e = I_s - I_m, \quad (3.1)$$

де  $e$  — похибка відхилення, а  $I_s$  та  $I_m$  — встановлене і виміряне значення струму. Регулятор в цьому виді управління складається з трьох частин і їх комбінацій: пропорційної, інтегральної і диференціальної.

У пропорційній складовій для підвищення продуктивності використовується наступне рівняння [37]:

$$P = eK_p, \quad (3.2)$$

де  $P$  — пропорційний керуючий сигнал, а  $K_p$  — пропорційний коефіцієнт.

В інтегральній компоненті для усунення похибки використовується наступне рівняння [37]:

$$I = K_i \int e dt, \quad (3.3)$$

де  $I$  — інтегральний керуючий сигнал, а  $K_i$  — інтегральний коефіцієнт.

У диференціальній компоненті для зменшення величини перевищення використовується наступне рівняння [37]:

$$D = K_d \frac{de}{dt}, \quad (3.4)$$

де  $D$  — диференціальний керуючий сигнал, а  $K_d$  — диференціальний коефіцієнт.

До основних переваг цього методу можна віднести наступні [38]:

- висока точність регулювання крутного моменту;
- швидке реагування на зміни. Контроль струму дозволяє легко адаптуватися до зовнішніх змін;
- економія електроенергії. Ефективне використання енергії обумовлено адаптивними властивостями регулювання струму;
- вплив на точність позиціонування. Строгий контроль крутного моменту дозволяє контролювати положення валу в кінцевому положенні.

Основними недоліками методу, які відрізняються від інших методів і негативно впливають на подальший розвиток, є вимоги до точного вимірювання параметрів крутного моменту і потоку і чутливості до зміни параметрів двигуна, а саме індуктивності і опору.

Двоконтурне управління з'єднує петлі зворотного зв'язку, як правило, складаються з позиційних і швидкісних петель. Цей метод підвищує ефективність керування двигуном, забезпечуючи точність позиціонування та швидкість. Двоконтурне управління дозволяє підтримувати баланс між динамікою системи і точністю управління, тому застосування цього методу контролю поширене в медичних приладах і автоматичних виробничих лініях.

Позиційна петля призначена для контролю положення вихідного валу серводвигуна і задає напрямок його руху в задану точку. Керуючий сигнал для електродвигуна створюється шляхом порівняння поточного положення з заданим за допомогою потенціометра. Керуючий сигнал формується для мінімізації похибок позиціонування.

Петля швидкостей спрямована на стабілізацію швидкості обертання вихідного валу серводвигуна. Зворотний зв'язок від контуру швидкостей вимірює поточну швидкість обертання і порівнює її з шуканою швидкістю, розрахованою на основі похибки позиціонування з контуру позиційного управління.

Математичний апарат двоконтурного управління має такий спосіб, як контролер струму. Різниця між цими двома апаратами полягає в кількості регуляторів, що використовуються для кожного контуру.

До переваг двоконтурного управління можна віднести наступне:

- точність у позиціонуванні;
- стабільність роботи системи регулювання швидкості;
- динамічний відгук. Взаємодія між обома контурами дозволяє системі управління сервомотором оперативно реагувати на зміни;

– інтеграція з іншими методами. Двоконтурна система управління, заснована на ньому, легко інтегрується з системами управління, заснованими на інших методах, таких як польове управління.

Основним недоліком двухконтурного управління є вимога до точної настройки регуляторних коефіцієнтів в обох контурах. Досягнення оптимального управління і стабільної роботи системи вимагає більш складних математичних розрахунків. Однак необхідні математичні розрахунки набагато менше, ніж при використанні більш досконалих методів, таких як ФОК і нечітка логіка.

Польове управління (ПУ), засноване на принципі векторного управління, являє собою метод управління струмом і напругою в серводвигуні з урахуванням напрямку обертання магнітного поля. ФОС підтримує динаміку та ефективність керування системою, що підходить для високопродуктивних систем і механізмів з високою точністю.

Поле-орієнтований метод управління полягає в перетворенні магнітного поля в обертову систему координат, відому як система «d-q». Вісь d вирівняна з магнітним потоком, тоді як вісь q перпендикулярна осі d. Це перетворення вирівнює магнітний потік усередині двигуна вздовж однієї осі, а змінний струм вирівнюється вздовж іншої осі, яка є віссю крутного моменту. Тому управління здійснюється на основі змінного струму [39].

Математичне рівняння для перетворення Парка має вигляд:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

де  $i_\alpha$  та  $i_\beta$  — струми статора в нерухомих осях,  $i_d$  та  $i_q$  — струми статора в обертаних осях, а  $\theta$  — кут повороту магнітного потоку.

Математичне рівняння для перетворення Кларка має вигляд [39]:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

Система зворотного зв'язку вимірює магнітний потік і потім, використовуючи перетворення Парка і Кларка, перетворює їх з системи координат статора в обертову систему координат d-q. Використання ПІ-контролера в польово-орієнтованій системі управління дозволяє підтримувати заданий потік по кожній осі.

Перетворення Кларка використовується для створення координат d-q, а обернене перетворення Парка використовується для перетворення струмів назад в систему координат статора [40].

Рівняння для напруги і крутного моменту двигуна мають вигляд:

$$T_e = \frac{3}{2}p(\psi i_q + (\psi_m - \psi)i_d), \quad (3.7)$$

$$V_e = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + e_s, \quad (3.8)$$

де  $V_s$  — напруга статора,  $R_s$  — опір статора,  $L_s$  — індуктивність статора,  $i_s$  — струм статора,  $p$  — кількість пар полюсів,  $\psi$  — потік ротора,  $\psi_m$  — максимальний потік ротора,  $T_e$  — електромагнітний крутний момент,  $e_s$  — зворотна сторона ЕРС.

Переваги польового методу керування:

- контроль точності. Цей метод дозволяє підвищити точність контролю як крутного моменту, так і швидкості серводвигуна;
- низький рівень шуму та вібрації. ФОС знижує механічний та електричний шум при роботі серводвигуна;
- висока енергоефективність. Цей метод зменшує втрати та дозволяє підвищити ефективність використання енергії.

Розробка ФОК стикається з двома найбільш істотними його недоліками: складністю реалізації і чутливістю до рухових параметрів. Чим складніше

система управління механізмом, тим складніше реалізація алгоритму і тим точніше повинна бути модель поведінки. У свою чергу, зміни параметрів двигуна призводять до перегляду всього алгоритму управління.

### 3.2 Структура машинного навчання для програмування ТЕ.

За блок-схемою, зображеною на рисунку 3.1, запропонована методика починається зі збору даних, за якими слідує аналіз даних. Специфічний аналіз приводить до визначення множини  $P$ , яка містить вибрані гармонічні порядки. Тоді для кожного  $k \in P$  задача прогнозування визначається як задача регресії, де метою є прогнозування з використанням функції 3-вимірного набору ознак.

Під час експериментів захоплення сигналу здійснюється за допомогою ПЛК Beckhoff CX5140. Для кожної конкретної комбінації відносний тестовий сигнал збирається за допомогою енкдерів, що працюють на частоті дискретизації 4000 Гц. Потім цей сигнал обробляється за допомогою формули (3.1), щоб обчислити значення ТЕ.

Кожна пара містить тривимірний елемент вектор вхідних ознак та відповідне бажане математичне формулювання для розрахунку ТЕ виглядає так:

$$\widetilde{TE}_-(\theta_{out}, \omega_{in}, T_l, M_{out}) = \sum_{k \in P} \tilde{A}_{-,k}^* \cos(k\theta_{out} + \tilde{\phi}_{-,k}^*) \quad (3.9)$$

Згодом результати зберігаються у файлі значень, розділених комами (CSV), що містить чотири стовпці даних. У першій і другій колонках файлу відображаються кутові положення  $\theta_{out}$ , під час повного руху вперед (від  $0^\circ$  до  $360^\circ$ ), і відповідне значення  $TE_f(\theta_{out}, \omega_{in}, T_l, M_{out})$  відповідно. Аналогічно, в третьому і четвертому стовпцях показані кутові положення  $\theta_{out}$ , під час зворотного руху (від  $0^\circ$  до  $360^\circ$ ), і відповідне значення  $TE_b(\theta_{out}, \omega_{in}, T_l, M_{out})$  відповідно.

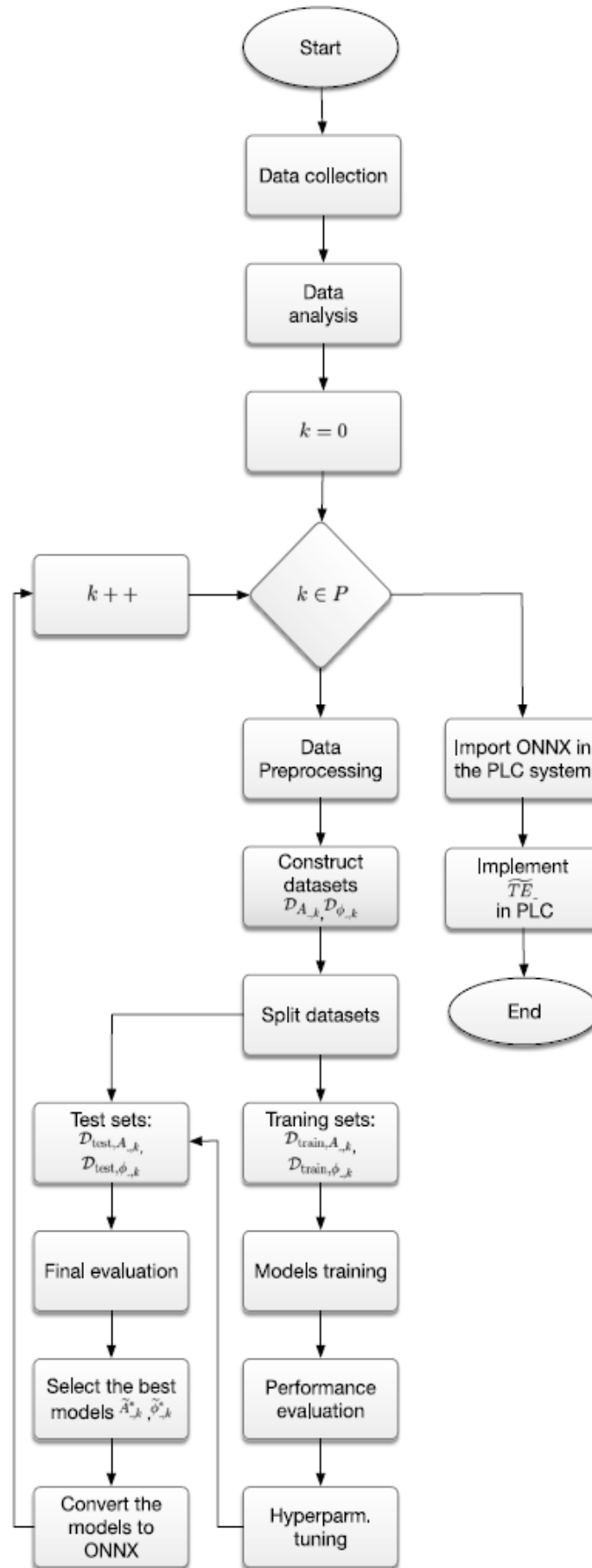


Рисунок 3.1 – Блок-схема розробленого процесу навчання ML

Таким чином, набір даних  $D$  складається із загальної кількості  $m = 1026$  CSV-файлів, кожен з яких пов'язаний з конкретним експериментом. В ході експериментів виявлення аномалій в точках даних спонукало до повторення тестів, що забезпечило високу якість  $D$ . Отже, не було реалізовано жодного етапу очищення даних  $D$ .

Незважаючи на те, що в існуючій літературі відсутнє застосування моделей машинного навчання для прогнозування ТЕ в редукторах автофургонів, різні типи моделей машинного навчання використовувалися для прогнозування похибок точності положення промислових роботів у їхньому робочому просторі. У цьому контексті нейронні мережі (НМ) широко використовуються завдяки їх розвиненим здібностям до навчання та гнучкості [41].

Останнім часом також успішно застосовуються деякі просунуті моделі, засновані на глибокому навчанні. Однак, ці моделі оперують емпіричною мінімізацією ризику, що означає, що вони добре працюють при великому обсязі навчальних даних.

З іншого боку, при роботі з обмеженими навчальними даними, хороші результати з точки зору точності продемонстрували спеціально розроблені варіанти Support Vector Machine (SVM) [42] а також Extreme Learning Machine (ELM).

Кожна модель машинного навчання пройшла навчання з використанням техніки перехресної перевірки пошуку сітки, наданої scikit-learn, за певною сіткою гіперпараметрів, описаною в таблиці 3.1, і визначеною за допомогою експериментальних випробувань. Будь-які додаткові налаштування залишаються до значення за замовчуванням, як це реалізовано в бібліотеці scikit-learn. Алгоритм пошуку по сітці згенерував всі комбінації гіперпараметрів і визначив найкращі, виділені жирним шрифтом в таблиці 3.1.

Це тонке налаштування полегшує оптимізацію кожної моделі, налаштовуючи їх під конкретні характеристики набору даних і проблемної області, забезпечуючи оптимальну продуктивність і плавну інтеграцію в середовище ПЛК. Хоча цей підхід вимагає ручних зусиль, він має перевагу перед

використанням більш зручних, але менш адаптивних систем автоматизованого машинного навчання (AutoML).

Таблиця 3.1 – Перехресна валідація пошуку сітки на моделях

Model	Hyperparameter	Values
SVR	Regularization param. $C$	0.01, 0.1, 0.5, <b>1</b> , 2, 3
	Kernel function $K$	linear, <b>rbf</b>
	epsilon	$1 \cdot 10^{-3}$ , <b><math>1 \cdot 10^{-4}</math></b> , $1 \cdot 10^{-5}$ , $1 \cdot 10^{-6}$
	gamma	$1 \cdot 10^{-5}$ , <b><math>1 \cdot 10^{-6}</math></b> , $1 \cdot 10^{-7}$
MLP	Activation function	<b>tanh</b> , relu
	Early stopping	True, False
	Hidden layer(s) size	(100,), (100, 50), (200,), <b>(200, 50)</b>
	Learning rate	<b>adaptive</b> , constant
	Solver	sgd, <b>adam</b>
RF	N estimators	50, 60, 70, 80, <b>90</b> , 100
	Criterion	<b>squared error</b> , absolute error
	Max depth	12, 13, <b>14</b> , 15, 16, None
	Min samples split	2, <b>3</b> , 4, 5, 6
DT	Criterion	<b>squared error</b> , absolute error
	Max depth	14, 15, <b>16</b> , 17, 18, None
	Min samples split	2, 4, 5, <b>6</b> , 7, 8
ET	Criterion	<b>squared error</b> , absolute error
	Max depth	14, <b>15</b> , 16, 17, 18, None
	Min samples split	2, 3, 4, <b>5</b> , 6
ERT	N estimators	20, 40, <b>60</b> , 80, 100
	Criterion	<b>squared error</b> , absolute error
	Max depth	14, <b>15</b> , 16, 17, 18, None
	Min samples split	2, <b>3</b> , 4, 5, 6
GBM	N estimators	20, <b>36</b> , 52, 68, 84, 100
	Criterion	<b>squared error</b> , absolute error
	Max depth	13, <b>14</b> , 15, 16, 17, 18,
	Learning rate	0.001, 0.01, <b>0.1</b> , 1.0
HGBM	Min samples split	10, 12, <b>14</b> , 16, 18,
	Max depth	9, 10, <b>11</b> , 12, 13, None
	Learning rate	0.18, 0.19, 0.2, <b>0.21</b> , 0.22, 0.1
LGBM	Max leaf nodes	24, 25, 26, <b>27</b> , 28, 31
	Max depth	10, 11, <b>12</b> , 13, 14, 15
	Learning rate	0.01, 0.1, 0.2, <b>0.39</b> , 0.58, 0.77
XGBM	Subsample	0.001, 0.01, <b>0.1</b> , 0.2, 0.3
	Max depth	12, 14, <b>16</b> , 18, 20
	Colsample by tree	0.6, 0.7, <b>0.8</b> , 0.9, 1
	Alpha	0, 0.1, <b>0.01</b> , 0.001, 0.0001
XGBM	Lambda	1, 10, <b>20</b> , 30, 40

### 3.3. Критерії оцінювання

Точність навчених моделей була оцінена за допомогою двох комплексних статистичних показників: Середня абсолютна похибка (MAE) і середньоквадратична похибка (RMSE). MAE широко використовується в прогнозній літературі [43] і розрахована на оцінку точності, модель в оцінці наступним чином:

$$MAE_{\tilde{A}_{-,k}} = \frac{1}{|D_{\text{test},A_{-,k}}|} \sum_{(x^i, A_{-,k}^i) \in D_{\text{test},A_{-,k}}} |A_{-,k}^i - \tilde{A}_{-,k}(x^i)| \quad (3.10)$$

Крім того, модель  $\tilde{A}_{-,k}$  оцінюється також у термінах RMSE, обчисленої за допомогою наступної формули:

$$RMSE_{\tilde{A}_{-,k}} = \sqrt{\frac{1}{|D_{\text{test},A_{-,k}}|} \sum_{(x^i, A_{-,k}^i) \in D_{\text{test},A_{-,k}}} (A_{-,k}^i - \tilde{A}_{-,k}(x^i))^2} \quad (3.11)$$

Аналогічно  $MAE_{\tilde{\varphi}_{-,k}}$  та  $RMSE_{\tilde{\varphi}_{-,k}}$  використовуються для оцінки точності моделі. MAE є надійним показником продуктивності, надання розуміння середньої величини помилок без акцентування уваги на впливі викидів [44]. З іншого боку, RMSE наголошує на впливі викидів і має тенденцію бути більш чутливою до екстремальних помилок.

Таким чином, комбінація MAE і RMSE дозволяє всебічно оцінити точність моделі, пропонуючи збалансований погляд як на типові, так і на найгірші сценарії продуктивності.

У таблиці 3.1 представлений повний огляд значень, пов'язаних з моделями ML, і апробісованими відповідно до специфікацій, наведених у попередньому розділі.

Кожен стовпець таблиці представляє певний гармонійний порядок  $k$ , причому кожен рядок відповідає окремій моделі машинного навчання. Відповідно, у цьому випадку різні моделі демонструють порівнянний рівень продуктивності.

Про вибраний найкращий прогноз повідомляється в другому стовпці, в таблиці 3.2. Стосовно вибору , таблиці 3.3, і таблиці 3.4, показують помилки, пов'язані з прогнозуванням , виміряні в термінах MAE і RSME, відповідно.

Таблиця 3.2 – Найефективніші моделі

$k$	$\hat{A}_{\cdot,k}^*$	$\hat{\varphi}_{\cdot,k}^*$
0	SVM	-
1	RF	LGBM
3	HGBM	HGBM
39	HGBM	HGBM
40	ERT	GBM
78	HGBM	RF
81	RF	RF
156	ERT	RF
162	ERT	ERT
240	ERT	ERT

Таблиця 3.3 - Значення навчених моделей машинного навчання

MAE $_{\hat{\varphi}_{\cdot,k}}$  values of the trained ML models.

Model	Harmonics order $k$								
	1	3	39	40	78	81	156	162	240
SVM	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$2.7 \cdot 10^{-2}$	$6.1 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-1}$	$1.3 \cdot 10^{-1}$	1.2	$4.9 \cdot 10^{-1}$	$4.9 \cdot 10^{-1}$
MLP	$7.2 \cdot 10^{-3}$	$6.5 \cdot 10^{-2}$	$6.2 \cdot 10^{-2}$	$8.0 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-1}$	$1.5 \cdot 10^{-1}$	1.9	$7.8 \cdot 10^{-1}$	$7.0 \cdot 10^{-1}$
RF	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$	$2.8 \cdot 10^{-2}$	$3.7 \cdot 10^{-2}$	<b><math>7.4 \cdot 10^{-2}</math></b>	<b><math>5.3 \cdot 10^{-2}</math></b>	<b><math>5.1 \cdot 10^{-1}</math></b>	$2.3 \cdot 10^{-1}$	$2.5 \cdot 10^{-1}$
DT	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$3.0 \cdot 10^{-2}$	$3.6 \cdot 10^{-2}$	$4.3 \cdot 10^{-2}$	$9.0 \cdot 10^{-2}$	$6.6 \cdot 10^{-2}$	$5.2 \cdot 10^{-1}$	<b><math>2.0 \cdot 10^{-1}</math></b>	<b><math>2.3 \cdot 10^{-1}</math></b>
ET	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$3.1 \cdot 10^{-2}$	$3.5 \cdot 10^{-2}$	$5.1 \cdot 10^{-2}$	$9.4 \cdot 10^{-2}$	$8.7 \cdot 10^{-2}$	$7.1 \cdot 10^{-1}$	$2.8 \cdot 10^{-1}$	$2.6 \cdot 10^{-1}$
ERT	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$2.7 \cdot 10^{-2}$	$2.8 \cdot 10^{-2}$	$4.0 \cdot 10^{-2}$	$7.6 \cdot 10^{-2}$	$5.6 \cdot 10^{-2}$	$5.3 \cdot 10^{-1}$	<b><math>2.0 \cdot 10^{-1}</math></b>	<b><math>2.3 \cdot 10^{-1}</math></b>
GBM	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$	$3.0 \cdot 10^{-2}$	<b><math>3.6 \cdot 10^{-2}</math></b>	<b><math>7.4 \cdot 10^{-2}</math></b>	<b><math>5.3 \cdot 10^{-2}</math></b>	$5.4 \cdot 10^{-1}$	$2.5 \cdot 10^{-1}$	$2.9 \cdot 10^{-1}$
HGBM	$1.9 \cdot 10^{-3}$	<b><math>2.0 \cdot 10^{-2}</math></b>	<b><math>2.1 \cdot 10^{-2}</math></b>	$4.0 \cdot 10^{-2}$	$9.1 \cdot 10^{-2}$	$5.7 \cdot 10^{-2}$	$7.4 \cdot 10^{-1}$	$3.5 \cdot 10^{-1}$	$3.6 \cdot 10^{-1}$
XGBM	$1.9 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$	$3.2 \cdot 10^{-2}$	$6.1 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-1}$	$9.1 \cdot 10^{-2}$	$9.6 \cdot 10^{-1}$	$5.4 \cdot 10^{-1}$	$3.9 \cdot 10^{-1}$
LGBM	<b><math>1.8 \cdot 10^{-3}</math></b>	$2.1 \cdot 10^{-2}$	<b><math>2.1 \cdot 10^{-2}</math></b>	$4.0 \cdot 10^{-2}$	$9.5 \cdot 10^{-2}$	$5.5 \cdot 10^{-2}$	$7.4 \cdot 10^{-1}$	$3.5 \cdot 10^{-1}$	$3.4 \cdot 10^{-1}$

При цьому різні моделі демонструють порівнянну продуктивність рівнях. Деталі наведені в таблиці 3.2 для кожного вибраного гармонічного порядку  $k$  моделі, які разом демонструють мінімальні значення для обох .

Вибір моделей для аплікації завершено в розділі нижче. Результати демонструють ефективність реалізовані методи ML для точного прогнозування ТЕ. Послідовно з літературою, класичні моделі ML працюють ефективно під час роботи з обмеженими навчальними даними [45].

Таблиця 3.4 – Значення навчених моделей машинного навчання.

RMSE $_{\hat{\phi}_k}$  values of the trained ML models.

Model	Harmonics order $k$								
	1	3	39	40	78	81	156	162	240
SVM	$3.1 \cdot 10^{-3}$	$4.2 \cdot 10^{-2}$	$4.4 \cdot 10^{-2}$	$9.7 \cdot 10^{-2}$	$3.2 \cdot 10^{-1}$	$2.0 \cdot 10^{-1}$	1.8	1.1	1.1
MLP	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$8.4 \cdot 10^{-2}$	$7.7 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-1}$	$2.4 \cdot 10^{-1}$	$2.2 \cdot 10^{-1}$	2.2	1.2	1.1
RF	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$4.3 \cdot 10^{-2}$	<b><math>5.5 \cdot 10^{-2}</math></b>	<b><math>1.6 \cdot 10^{-1}</math></b>	<b><math>8.2 \cdot 10^{-2}</math></b>	<b>1.2</b>	$6.8 \cdot 10^{-1}$	$6.3 \cdot 10^{-1}$
DT	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$4.2 \cdot 10^{-2}$	$6.1 \cdot 10^{-2}$	$6.1 \cdot 10^{-2}$	$2.0 \cdot 10^{-1}$	$1.0 \cdot 10^{-1}$	1.3	$7.3 \cdot 10^{-1}$	$6.7 \cdot 10^{-1}$
ET	$3.3 \cdot 10^{-3}$	$4.6 \cdot 10^{-2}$	$6.2 \cdot 10^{-2}$	$7.4 \cdot 10^{-2}$	$2.3 \cdot 10^{-1}$	$1.5 \cdot 10^{-1}$	1.5	$9.3 \cdot 10^{-1}$	$6.8 \cdot 10^{-1}$
ERT	$3.6 \cdot 10^{-3}$	$4.0 \cdot 10^{-2}$	$4.4 \cdot 10^{-2}$	$6.0 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$1.1 \cdot 10^{-1}$	<b>1.2</b>	<b><math>6.4 \cdot 10^{-1}</math></b>	<b><math>5.8 \cdot 10^{-1}</math></b>
GBM	$2.6 \cdot 10^{-3}$	$3.4 \cdot 10^{-2}$	$4.5 \cdot 10^{-2}$	<b><math>5.5 \cdot 10^{-2}</math></b>	$1.8 \cdot 10^{-1}$	$8.4 \cdot 10^{-2}$	1.3	$7.1 \cdot 10^{-1}$	$7.1 \cdot 10^{-1}$
HGBM	<b><math>2.5 \cdot 10^{-3}</math></b>	<b><math>2.9 \cdot 10^{-2}</math></b>	<b><math>2.7 \cdot 10^{-2}</math></b>	$6.0 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-1}$	$8.5 \cdot 10^{-2}$	1.3	$7.0 \cdot 10^{-1}$	$7.4 \cdot 10^{-1}$
XGBM	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$4.3 \cdot 10^{-2}$	$8.9 \cdot 10^{-2}$	$2.3 \cdot 10^{-1}$	$1.3 \cdot 10^{-1}$	1.4	$8.1 \cdot 10^{-1}$	$7.6 \cdot 10^{-1}$
LGBM	<b><math>2.5 \cdot 10^{-3}</math></b>	$3.0 \cdot 10^{-2}$	$2.8 \cdot 10^{-2}$	$6.0 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-1}$	<b><math>8.2 \cdot 10^{-2}</math></b>	1.3	$7.0 \cdot 10^{-1}$	$7.1 \cdot 10^{-1}$

Крім того, було впроваджено ELM для порівняння, незважаючи на цю модель немає бути сумісним з інтеграцією в середовище TwinCAT.

ELM стабільно перевершував MLP, але демонстрував менш точні прогнози з точки зору MAE та RMS порівняно з усіма іншими методами реалізовано.

### 3.4. Експериментальна перевірка

Ефективність запропонованої схеми попередньої фільтрації траєкторії для компенсації тертя перевірена на тому ж мікроверстаті з лінійним моторним приводом (див. рисунок 2.5 (а)) в розділі 2.

Спіральна криволінійна траєкторія інструменту, показана на рисунку 2.6 (а), подається при подачі 50 [мм/сек]. Лінійний фільтр (налаштований раніше) використовується для компенсації серводинаміки.

В результаті навколо зміни швидкості виникають великі квадрантні збої через порушення тертя приводу X–Y, і їх видно в тенденції похибки контуру на рисунку 2.5(с). Компенсатор тертя попереднього фільтра тренується за

допомогою рівняння (2.14) при кожному розвороті швидкості (ітерації) на льоту для зміщення траєкторії та нейтралізації тертя.

Блоки ГМС 10 використовуються для уловлювання передковзного режиму тертя подачі-приводу. Як показано на рисунку 2.5, після 15-го перетину швидкості крива гістерезису палиця/ковзання автоматично визначається, а опорна траєкторія модифікується для ідеальної нейтралізації збоїв у квадранті, як показано на рисунку 2.5(a) і в. Похибки контуру зменшуються до 1 [мм]. Поєднуючи як лінійну динаміка сервоприводу, так і фільтри.

Нарешті, для демонстрації проводяться експерименти з мікроподрібненням, щоб продемонструвати важливість попереднього ковзання в якість обробки на рисунку 2.5(c). На A5052 вирізана увігнута поверхня деталь на глибину 5 [мм] і радіальне занурення 0,1 [мм] з 15 [к/хв] швидкість шпинделя та подача 0,02 [мм/об-зуб].

Вісь X змінює напрямок руху внизу поверхні. При цьому миттєво починає діяти тертя перед ковзанням і спричиняє поверхню помилки профілю понад ~20 [мм], рисунок 2.5(c), виміряно Surfcom Flex- 50A). Зауважемо, що помилки профілю виникають із невеликою затримкою від швидкості точки розвороту через відстань тертя. Запропонована попередньо компенсована траєкторія усуває похибки тертя і тим самим дозволяє обробляти профіль поверхні, близький до ідеалу.

### 3.5 Висновки до третього розділу

Спочатку проводиться попередній аналіз для вивчення спектральних компонентів функцій TE, виміряних на спеціалізованому випробувальному стенді, призначеному для оцінки впливу вхідної швидкості, прикладеного крутного моменту та температури масла. Після цього на інструментальній установці проводиться експериментальна кампанія для ефективного навчання декількох моделей машинного навчання, здатних передбачити варіації в основні піки TE (амплітуда і фаза) виходячи з нав'язаних умов експлуатації.

Конкретні моделі машинного навчання, навчені на Python, вибираються на основі їх сумісності для інтеграції в систему Beckhoff PLC. Для всіх навчених моделей машинного навчання проводиться оціночний тест для оцінки та порівняння їх прогнозної ефективності. На наступному етапі дослідження моделі машинного навчання імпортується в TwinCAT для полегшення реалізації онлайн-стратегій компенсації під час виконання користувальницьких профілів руху в високодинамічних сервомеханіках.

Для цього визначено два FB для циклічної екстраполяції нового значення TE з імпортованих моделей ML і подальшого обчислення скоригованого положення, яке буде передано на керований серводвигун. Експериментальна валідація, проведена із застосуванням як закону руху, витягнутого з першого суглоба промислового робота KUKA під час операції pick-and-place, так і стандартного закону циклоїдального руху, підтвердила ефективність запропонованого підходу.

У наступному розділі буде досліджуватись використання алгоритмів машинного навчання для розробки комплексної моделі TE, з особливим акцентом на редуктори ПШ.

## 4 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ ТОЧНОСТІ РУХУ ПРОМИСЛОВИХ СЕРВОПРИВОДІВ НА СОНОВІ ПІДХОДУ ДО МАШИННОГО НАВЧАННЯ

В цьому розділі отримаємо прогнозовану модель, адаптовану для фіксації складної динаміки аналізованого редуктора, яка імпортується в програмований логічний контролер для активації онлайн-стратегій компенсації під час виконання користувацьких профілів руху. Експериментальні випробування проводяться з використанням двох різних профілів руху: один генерується за циклоїдальним законом, характерним для промислових машин, а інший екстраполюється зі з'єднань промислового робота під час завдання з підбору.

Отримані результати демонструють ефективність запропонованого підходу, що дозволяє точно прогнозувати та значно знижувати (понад 90%) загального показника TE за допомогою впровадженої прогностичної моделі.

### 4.1 Впровадження компенсації на основі ML

Новий фреймворк на основі ПЛК, що забезпечує онлайн-рух, керований ML компенсації був визначений, як показано на рисунку 4.1.

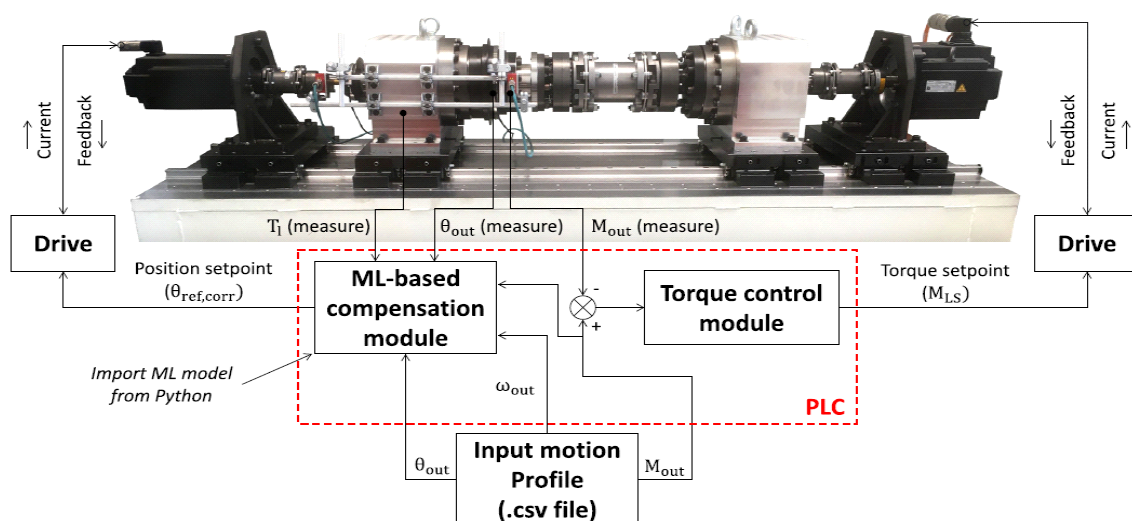


Рисунок 4.1 – Схема нового контролера випробувального стенду з компенсацією руху на основі ML

Система читається як введіть спеціальний профіль руху, який буде отримано в редукторі вихідний вал, збережений у зовнішньому файлі CSV. Той самий файл також забезпечує профілі швидкості та стійкості (тобто зовнішнього застосування), потім ці вектори використовуються в межах двох головних модулів керування ПЛК, що відповідають відповідно моделі ML компенсації руху на MS і контроль крутного моменту на LS для досягнення правильного навантаження на випробуваний редуктор RV.

Як це може бути і як видно зі схеми, обидва ці модулі також використовують режим реального часу дані датчика з бурової установки для правильного обчислення руху та крутного моменту задані значення, які надсилаються на приводи серводвигунів під час експерименту. Зокрема, серводвигун MS керований позицією (має петлі позиції/швидкості/струму, керовані приводом), тоді як LS серводвигун керується крутним моментом (має лише внутрішній контур струму керується на рівні диска).

Щоб інтегрувати моделі ML, розглянуті в попередньому розділі 2, і експортовані як файли ONNX у TwinCAT (тобто програмне забезпечення для автоматизації Beckhoff), необхідно встановити пакет TF38xx як на ПЛК, так і на лабораторний ПК.

Цей пакет полегшує розгортання спеціалізованих функцій Блоків (FB) для завдань ML і обробки файлів ONNX. Як підкреслено у розділі 3 вибір моделей ML має відповідати цим доступним в бібліотеці.

Запропонований компенсаційний модуль складається з двох FB, названих FB\_TEPredict і FB\_Compensator, як показано на рисунку 4.2. Ці FB запрограмовані на циклічну екстраполяцію значення TE з імпортованих моделей ML і подальше обчислення компенсаційного значення при кожному циклі PLC.

Зокрема, FB\_TEPredict, що працює на нижньому рівні, розглядає в якості входів дані датчика і еталонні дані з вхідного профілю руху ( $\theta$ ), як видно на рис. 4.1. Слід зазначити, що файли ONNX, експортовані з Python (два для кожної гармоніки  $k \in P$ , тобто один для  $i$  і один для  $j$ ), не можуть бути легко оброблені ПЛК і тому перетворюються на XML-файли в середовищі TwinCAT.

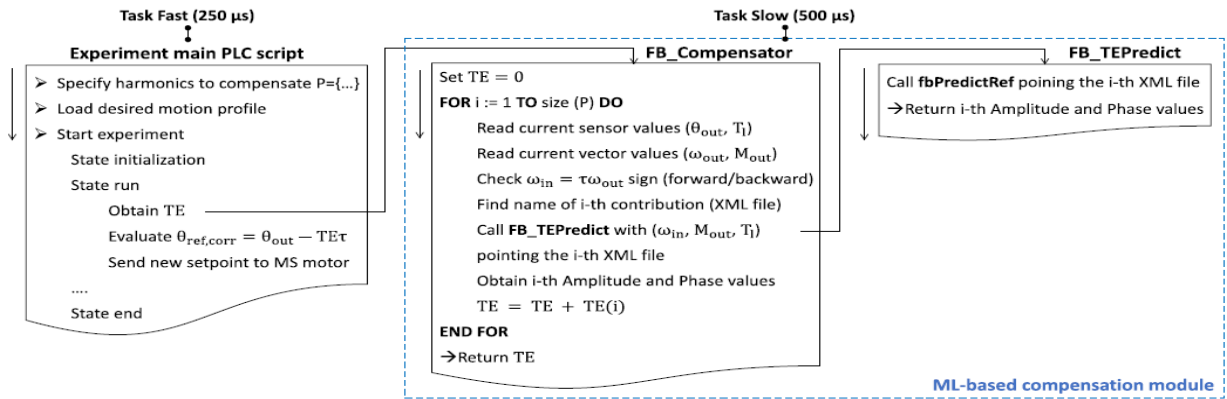


Рисунок 4.2 – Логічна структура компенсційного модуля на основі ML

Згодом, для спрощення керування файлами ML, пов'язані з амплітудою та фазами, XML-файли об'єднуються в два повноцінні файли. Це справедливо за умови, що кожен вихідний файл створюється з вибором однієї і тієї ж моделі ML у Python.

Отже, об'єднання моделей різних типів, таких як модель HGBM і модель SVM для двох спектральних внесків, вимагає імпорту двох окремих XML-файлів, одного для HGBM і одного для SVM.

На більш високому рівні FB\_Compensator використовує цикл FOR протягом одного циклу PLC для збору значень  $i$  для кожної гармоніки шляхом виклику FB\_TEPredict, рис. 4.2. Згодом він обчислює поточну TE, при цьому виходить від датчика,  $i$  в цьому відмінок, виражений у радіанах. Ця інформація потім використовується в основному сценарії PLC для визначення заданого значення виправленої позиції ( $\theta_{ref,corr}$ ) для МС серводвигун виглядає наступним чином:

$$\begin{cases} \theta_{ref,corr} = \theta_{out} - TE\tau, & \omega_{in} \geq 100 \text{ rpm} \\ \theta_{ref,corr} = \theta_{out} - TE \frac{\tau\omega_{in}}{150}, & \omega_{in} < 100 \text{ rpm} \end{cases} \quad (4.1)$$

Як видно з рівняння (4.1), на нижчих швидкостях корекція зважається, щоб пом'якшити потенційну нестабільність і підтримувати належну функціональність бурової установки.

Потім, за поріг 100 об/хв, компенсація повністю включається. Важливо підкреслити, що в той час як основний сценарій експерименту працює над швидким завданням PLC (час циклу 250 мкс), два FB працюють над повільнішим завданням PLC (час циклу 500 мкс) через більш високе обчислювальне навантаження, пов'язане з використанням моделей ML. Таким чином, потрібна точна синхронізація сигналу, про що буде сказано далі.

Синхронізація сигналів за часом є ключовим аспектом для виконання тонких компенсацій у розподіленій системі. Під час експерименту операції збору та керування виконуються за допомогою ПЛК Beckhoff CX5140, який обмінюється даними із зовнішніми пристроями через польову шину EtherCAT, що забезпечує високопродуктивний та детермінований обмін сигналами під час роботи.

Вхідні сигнали (дані датчиків, зокрема  $\theta_{out}$ ,  $M_{out}$  і  $T_l$ ) і вихідних сигналів (задані положення і крутний момент для систем приводу, тобто  $\theta_{ref,corr}$  і  $M_{LS}$ ) приймаються і відправляються з частотою 4000 Гц, що є основним часом циклу PLC і EtherCAT, встановленим рівним 250 мкс. Однак реалізація повільнішого завдання (500 мкс) виконується оцінкою TE з імпортованих моделей ML та її передача з основною задачею введені затримки в обміні даними.

Змінні є обмінюються на початку завдань, що призводить до збільшення загального часу компенсація. Визначити максимально досягну корекцію частота запропонованої системи компенсації руху на основі ПЛК, часову діаграму, наведену на рис. 4.3 (часові значення доступні для користувача у TwinCAT) необхідно ретельно проаналізувати.

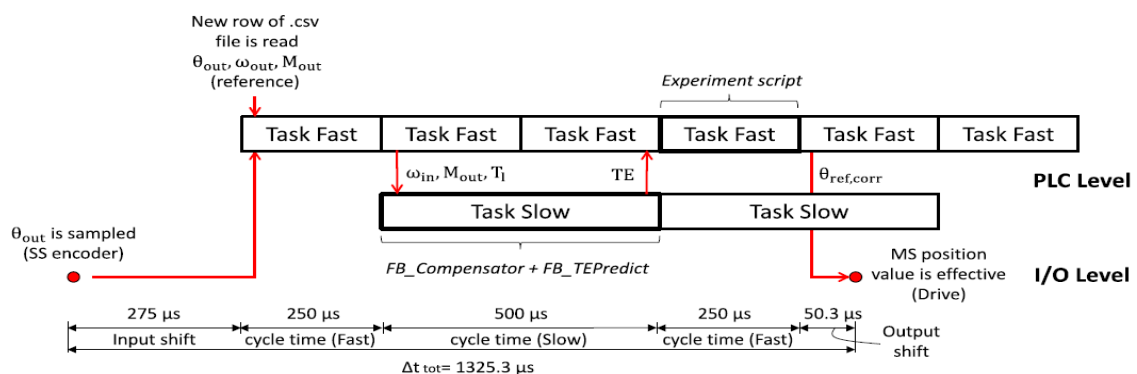


Рисунок 4.3 – Часова діаграма сигналів та обміну даними всередині ПЛК

Проміжок часу між отриманням нового значення () від кодера SS і застосуванням корекції становить приблизно 1325,3 мкс, встановлюючи верхню межу корекції на рівні 754,5 Гц. Тепер, враховуючи, що найвищий пік TE на рисунку 3.3 (розділ 3), максимальна частота обертання при SS для корекції цього внеску стає  $n = 188,6$  об/хв.

Це значення значно перевищує встановлений струмом межу  $n = 1800$  об/хв (як детально описано в розділах 2,3), в результаті чого  $n = 22,2$  об/хв.

Дано що основні значні внески відбуваються на більш низьких частотах ( $n \leq 100$ , як показано на рисунку 2.4 (розділ 2)), вищезазначені обмеження додатково пом'якшуються в практичному застосуванні.

#### 4.2 Експериментальна перевірка

У цьому розділі детально описано експериментальну валідацію запропонованої онлайн-компенсації на основі ML, оцінюючи її практичну ефективність при виконанні індивідуальних профілів руху за допомогою промислового ПЛК. Перш ніж заглибитися в процес компенсації, перевіряються можливості розробленого ФБ щодо прогнозування роботи редуктора TE в межах розглянутої операційної області.

Для оцінки можливостей прогнозування моделі машинного навчання в Twin-CAT було обрано три додаткові сценарії, що виходять за рамки початкового навчального набору даних, що включають 1026 зразків. Відповідні параметри наведені в таблиці 4.1. Слід зауважити, що в цих експериментах постійний набір вхідних параметрів (тобто без зміни  $w_{in}$ ,  $M_{out}$  і  $T_l$ ) виконується протягом усієї тривалості експерименту ( $0^\circ \leq \theta_{out} \leq 360^\circ$ ), як це робиться під час навчання моделі.

Таблиця 4.1 – Вхідні параметри, що враховуються для тестів прогнозування ML

Test	$w_{in}[rpm]$	$M_{out}[N\ m]$	$T_l[^\circ C]$
1	350	650	26
2	775	1525	31
3	1650	370	27

За кожним сценарієм проводяться експерименти на буровій установці для отримання даних з датчиків. Потім експериментальну ТЕ порівнюють з ТЕ, передбаченою FB, зосереджуючись на спектральних компонентах 0, 1, 39 і 40, визначених як найвпливовіші в розділі 3.

Що стосується моделей машинного навчання, розглянутих раніше, з посиланням на таблицю 4.2, SVM вибирається для компонента 0, RF і LGBM - для компонента 1, HGBM - для компонента 39, тоді як ERT і GBM - для компонента 40.

Таблиця 4.2 – Найефективніші моделі

k	$\tilde{A}_{-k}^*$	$\tilde{\varphi}_{-k}^*$
0	SVM	-
1	RF	LGBM
3	HGBM	HGBM
39	HGBM	HGBM
40	ERT	GBM
78	HGBM	RF
81	RF	RF
156	ERT	RF
162	ERT	ERT
240	ERT	ERT

Результати порівняння представлені на рис. 4.4, показані прямі криві ТЕ. Як правило, між кривими спостерігається хороша відповідність, із середньою відсотковою похибкою 2,6%, 3,1% і 4,7% по всій функції ТЕ для тестів 1, 2 і 3 відповідно. Хоча включення додаткових гармонійних внесків у FB потенційно може дати покращені результати, важливо оцінити пов'язане з цим збільшення обчислювального навантаження.

З практичної точки зору, розгляд більш ніж чотирьох внесків вимагав би збільшення часу циклу повільного завдання (наприклад, з 500 мкс до 1 мс), тим самим знижуючи продуктивність пропускну здатності управління, як детально проілюстровано на рис. 4.3.

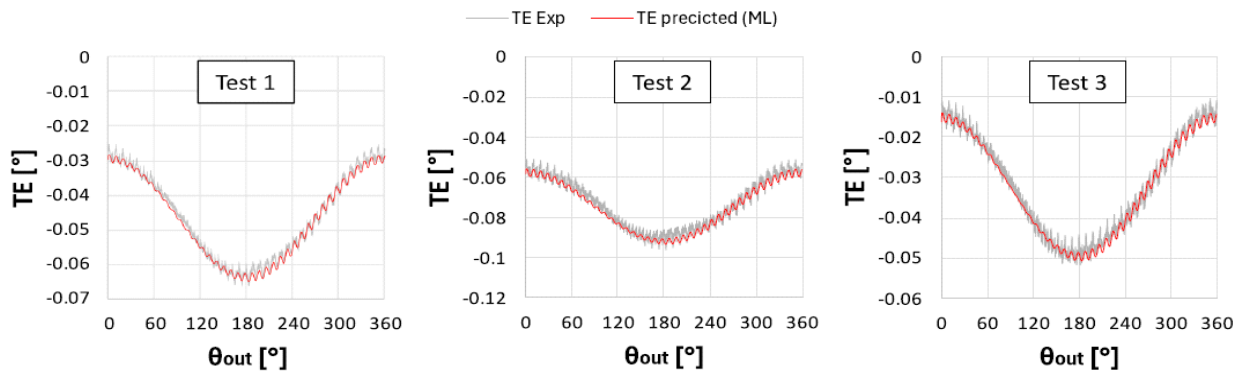


Рисунок 4.3 – Порівняння між експериментальними та прогнозованими функціями TE, ML у попередніх валідаційних тестах

Грунтуючись на результатах, наведених у попередньому розділі, тут потужності МН перевіряються шляхом введення безперервно змінних вхідних величин, а саме шляхом застосування змінного в часі руху і опорного навантаження профілі відповідно до рис. 4.1. Було два різних профілі руху які використовувалися під час експерименту.

#### 4.3 Компенсація профілю руху

Перший профіль отриманий безпосередньо в результаті спостереження за продуктивністю промислового робота KUKA KR 210 R2700 Prime (показаний на рис. 3.1 (розділ 3)) виконання операції з підбору та розміщення. У цьому випадку поведінка першого суглоба робота відстежується та записується у файл CSV, який згодом використовується на тестовому стенді. Для другого профілю руху використовується стандартний циклоїдальний закон, який зазвичай зустрічається в промисловій автоматизації, що генерується за допомогою наступного співвідношення:

$$\theta_{out}(t) = \theta_{out,0} + h \left( \frac{t - t_0}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right) \quad (4.2)$$

Закон руху визначається початковими умовами  $\theta_{out,0} = 0, t_0 = 0$ , і встановивши період часу  $T = 20$  с і кінцеву позицію  $h = 360^\circ$ , що забезпечує рознос повного кутового діапазону вихідного вала понад 20 с. Аналогічний закон використовується і для подачі динамічного навантаження на вихідний вал редуктора в тому ж інтервалі часу, досягаючи максимуму 370 Н м. Два розглянутих профілі руху зображені на рис. 3.4, тоді як їх характеристики детально описані в таблиці 4.3. Відповідно до розділу 3.1, обрані гармоніки для компенсації включають 0, 1 і 39.

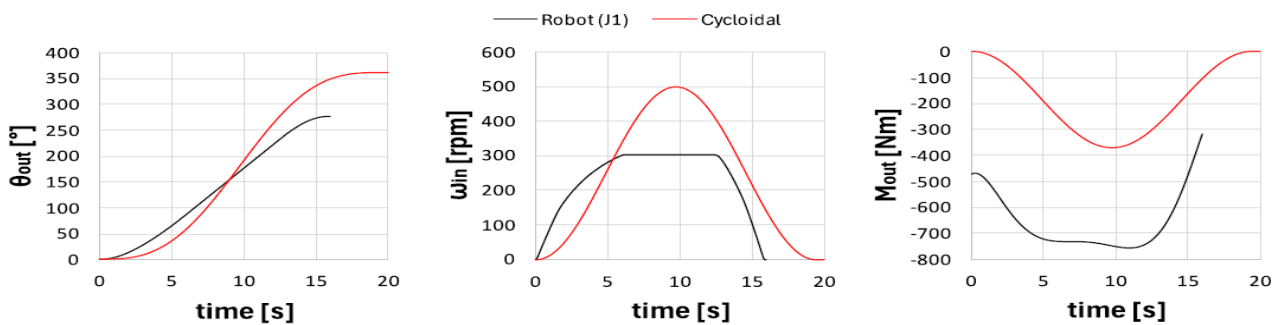


Рисунок 4.4 – Профілі руху і навантаження прийняті для валідації

Таблиця 4.3 – Характеристика профілів нав'язаного руху

Motion profile	$w_{in,max}[rpm]$	$M_{out,max}[N\ m]$	$T_l[^\circ C]$
Robot	303	759	31.6
Cycloidal	500	370	26.7

Було проведено два додаткові випробування для оцінки впливу включення компонентів 40 і 78 на різні умови експлуатації. Крім того, в цьому випадку в імпортованих моделях машинного навчання використовуються алгоритми, наведені в таблиці 4.1.

Позитивний ефект від включення компенсації на основі ML можна побачити на графіках, наведених на рис. 4.5, де початкові (некомпенсовані) ТЕ порівнюються з тими, що отримані при включенні компенсації. Зокрема, ТЕ було знижено більш ніж на 80% і 90% для роботизованого та циклоїдального профілю відповідно, що також видно з таблиці 4.4, де наведено як середній кореневий квадрат (RMS), так і максимальні значення для кожного випадку.

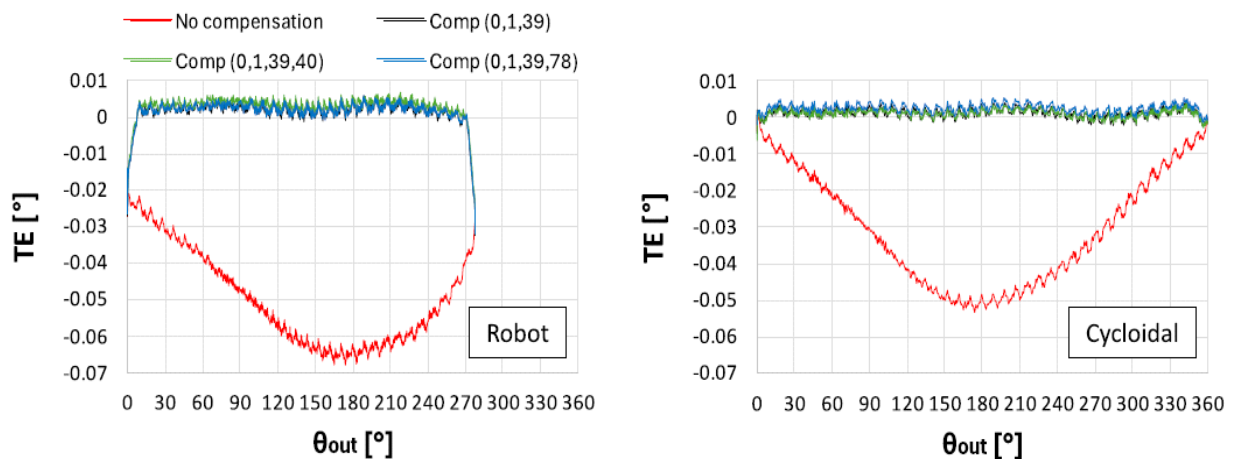


Рисунок 4.5 – Порівняння компенсованих і не компенсованих профілів руху.

Таблиця 4.4 – Отримані редукції ТЕ (максимальні значення виражаються у вигляді абсолютних величин)

Case	$TE_{RMS}$ [°]	$TE_{Max}$ [°]	Red. [%]
<b>Robot</b>			
No comp	0.0478	0.0681	-/-
Comp (0,1,39)	0.0080	0.0325	83.3/52.4
Comp (0,1,39,40)	0.0078	0.0309	83.6/54.7
Comp (0,1,39,78)	0.0079	0.0319	83.5/53.2
<b>Cycloidal</b>			
No comp	0.0282	0.0534	-/-
Comp (0,1,39)	0.0017	0.0044	94.0/91.7
Comp (0,1,39,40)	0.0017	0.0062	94.0/88.3
Comp (0,1,39,78)	0.0027	0.0020	90.5/96.3

Результати зображені на рис. 4.5 ілюструють експеримент, проведений з роботом закон передбачає субоптимальну компенсацію як на початковому, так і на кінцевому етапі сегменту.

Це виникає внаслідок прийняття більш агресивної швидкості закону, як видно на рис. 4.4, що призводить до передчасного перетину 100 поріг обертів. Нарешті, включення компонента 78 демонструє кращу продуктивність за робототехнічним законом порівняно з циклоїдальним, відповідно до попереднього аналізу, проведеного в розділі 3, що вказує на його високу залежність від.

В цілому, результати експериментів демонструють обґрунтованість запропонованого підходу, заснованого на машинному навчанні, демонструючи точні прогнози та значне зниження загальної ТЕ. Результати дають цінну інформацію про реальну застосовність і продуктивність моделі машинного навчання для компенсації ТЕ в промислових умовах.

Зокрема, запропонований метод пропонує ряд практичних і економічних переваг для системних інтеграторів і менеджерів обладнання на промисловому рівні.

Перш за все, отримані поліпшення точності позиціонування сприяють підвищенню операційної ефективності та продуктивності в промислових умовах, що призводить до потенційного збільшення обсягів виробництва з більш високою якістю продукції і скороченням відходів.

Аналогічні результати можуть бути отримані на багатоосьових системах, таких як серійні промислові роботи, де програмні інтерфейси конкретного виробника дозволяють передавати дані корекції в режимі реального часу (наприклад, до 250 Гц, як у структурі компенсації, наведеній у Ref. [46], та на основі модуля KUKA Robot Sensor Interface). Крім того, нинішній підхід усуває потребу в спеціальному сенсорному обладнанні на реальних машинах, що часто створює проблеми з установкою [47], де на роботу встановлено вторинний оптичний енкодер для отримання зворотного зв'язку з положенням на стороні суглоба) і значні додаткові витрати.

Він покладається на бібліотеки з відкритим вихідним кодом і стандартні формати обміну, що сприяє безшовній інтеграції в існуючі комерційні ПЛК без необхідності використання власних програмних модулів. Крім того, значна економія коштів досягається за рахунок оптимізації етапів розробки, налаштування та розгортання компенсатора руху.

Той же підхід може бути поширений і на прогнозоване технічне обслуговування, що дозволяє передбачити і вирішити проблеми зі зносом компонентів або здоров'ям на випередження, отже, запобігання дорогим простоям і збоєм обладнання.

Провівши експерименти, було виявлено, що ефективність запропонованої схеми попередньої фільтрації траєкторії для компенсації тертя перевірена на тому ж мікроверстаті з лінійним моторним приводом (див. рис. 2.5 (а) розділ 2). Спіральна криволінійна траєкторія інструменту, показана на рис. 4.6 (а), подається при подачі 50 [мм/сек]. Лінійний FL-фільтр (налаштований раніше) використовується для компенсації серводинаміки. В результаті навколо зміни швидкості виникають великі квадрантні збої через порушення тертя приводу X–Y, і вони видно в тенденції похибки контуру на рисунку 4.6 (с). Фільтр попереднього очищення компенсатора тертя FN тренується за допомогою рівняння (2.14) при кожному зміні швидкості (ітерації) на льоту для зміщення траєкторії і компенсації тертя.

Блоки ГМС 10 використовуються для уловлювання передковзного режиму тертя подачі-приводу. Як показано на рисунку 4.6, після перетину 15-ї швидкості крива гістерезису палиця/ковзання автоматично визначається, а опорна траєкторія змінюється таким чином, щоб повністю нейтралізувати збої в квадранті, як показано на рисунку 4.6 (а) і с. Похибки контуру зменшуються до 1[мм]. Поєднуючи лінійну серводинаміку та фільтри попереднього компенсатора тертя, можна досягти майже ідеального відстеження. Після тренування фільтри компенсації траєкторії можна використовувати на будь-якій траєкторії для покращення характеристик контурування.

Експерименти з мікрофрезеруванням проводяться для демонстрації важливості компенсації попереднього ковзання перед ковзанням у якості обробки поверхні на рисунку 4.6 (d). Увігнута поверхня ріжеться на заготовці A5052 на глибині 5 [мм] і радіальному зануренні 0,1 [мм] з частотою обертання шпинделя 15 [krpm] і подачею 0,02 [мм/оберт-зуб]. Вісь X змінює напрямок її руху в нижній частині поверхні. У цей момент починає спрацьовувати передковзне тертя, яке спричиняє похибки профілю поверхні понад  $\sim 20$ [ $\mu\text{m}$ ] (рис. 4.6 (d), виміряно

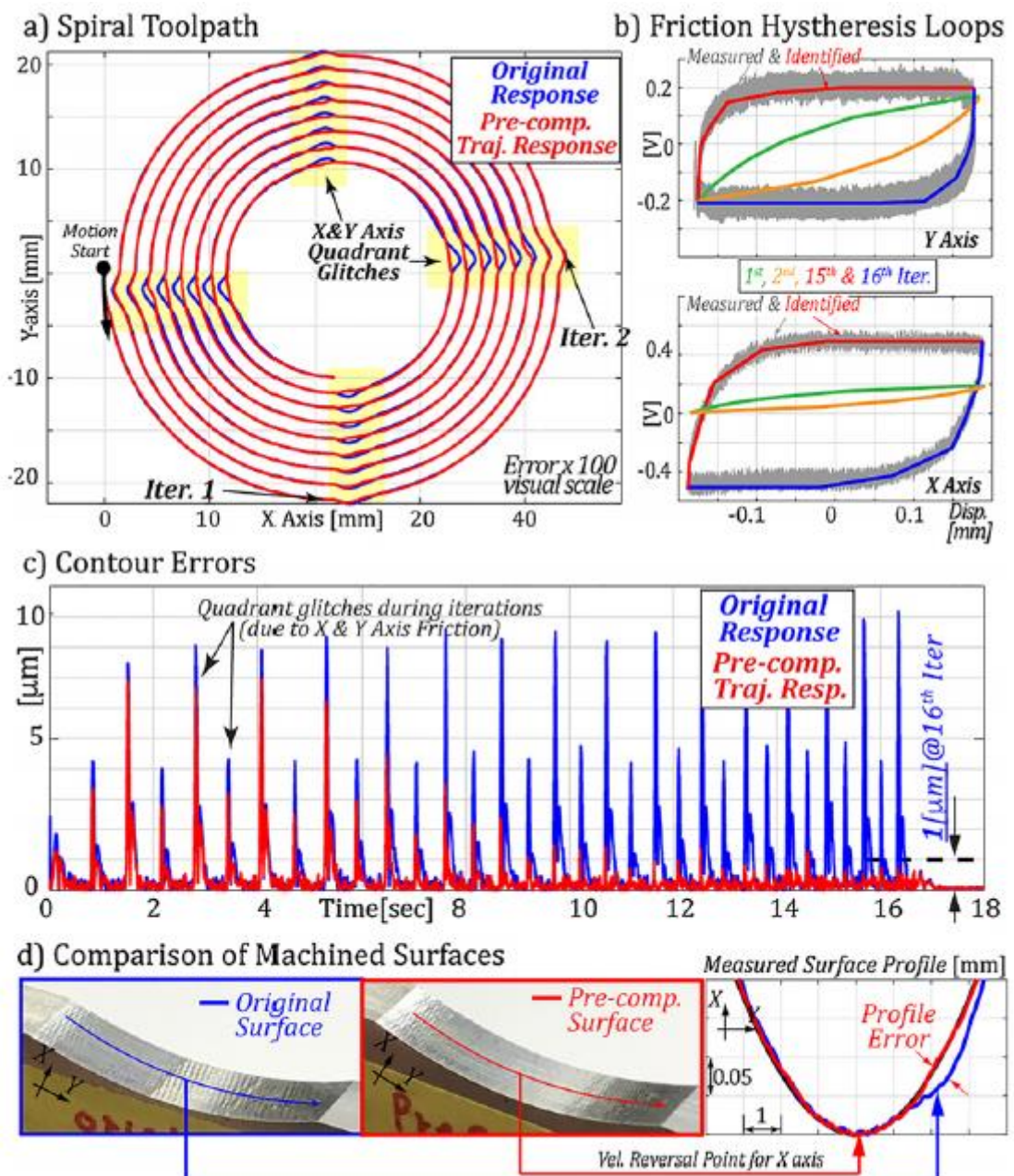


Рисунок 4.6 – Експериментальна компенсація тертя/ковзання

Також, помилки профілю виникають з невеликою затримкою від точки розвороту швидкості через відстань відриву тертя. Запропонована попередньо компенсована траєкторія усуває похибки тертя і тим самим дозволяє обробляти профіль поверхні, близький до ідеалу.

#### 4.4. Висновки до четвертого розділу

У цьому розділі розглядається моделювання та компенсація помилок положення в промислових сервомеханізмах. У дослідженні впроваджено використання алгоритмів машинного навчання для розробки комплексної моделі ТЕ, з особливим акцентом на редуктори ПШ. Отримані результати демонструють точні прогнози та суттєве зниження більш ніж на 90% як середньоквадратичного значення ТЕ, так і максимальних значень.

Підсумовуючи, це дослідження підкреслює потенціал використання підходу на основі даних для моделювання та компенсації помилок положення в промислових сервомеханізмах. Отримані результати відкривають шляхи для підвищення точності та продуктивності автоматизованих виробничих систем, демонструючи практичні переваги підходів, заснованих на машинному навчанні, у вирішенні проблем, пов'язаних із складними та нелінійними компонентами промислової автоматизації.

Зібраний набір навчальних даних та розроблені моделі машинного навчання відкрито передаються спільноті як спроба забезпечити міцну основу для майбутніх досягнень у стратегіях компенсації сервомеханізмів, керованих ПЛК.

Вони можуть включати вдосконалення запропонованих моделей машинного навчання або навіть розробку більш складних (з частковим акцентом на методах навчання з підкріпленням) для прогнозування зносу або проблем зі здоров'ям редуктора та їх пов'язаного впливу на ТЕ, а також забезпечення більш проактивних втручань з технічного обслуговування.

Крім того, інтеграція в існуючі контролери роботів може бути корисною, потенційно підвищуючи доступність запропонованого методу для ширшого спектру промислових умов.

Проведення довгострокових досліджень має важливе значення для оцінки ефективності та стійкості цього методу в реальних промислових умовах для підтвердження його довгострокових переваг та забезпечення його практичної доцільності.

## ВИСНОВКИ

В цій роботі було вияснено, що сучасне виробництво не може обійтися без електродвигунів, які використовуються в різних сферах. Різні типи електродвигунів використовуються для різних цілей, що дозволяє підвищити продуктивність, енергоефективність та економічність у будь-якому виробничому процесі. Завдяки моторам можливості виробництва постійно розширюються, що дозволяє використовувати більш складні і вдосконалені механізми, створювати нові можливості для розвитку.

У першому розділі описуються структури, виконання, види, основні принципи та методи керування сервомотором, а також висвітлюються його переваги, обмеження та можливості застосування. ШІМ-керування з використанням цифрової обробки сигналів виявляється ефективним у контролі положення, швидкості та траєкторії. Контроль струму, або контроль крутного моменту, вирізняється високою точністю регулювання крутного моменту, швидкою реакцією на зміни, економією енергії та впливом на точність позиціонування.

У другому розділі було розглянуто запропоновану попередньо компенсовану траєкторію, яка усуває похибки тертя і тим самим дозволяє обробляти профіль поверхні, близький до ідеалу. Значно підвищує динамічну точність верстатів за рахунок компенсування для сервоприводу замкнутого контуру та тертя ручки (перед ковзанням) і викликало помилки шляхом зміни опорної траєкторії.

У третьому розділі спочатку було проведено попередній аналіз для вивчення спектральних компонентів функцій ТЕ, виміряних на спеціалізованому випробувальному стенді, призначеному для оцінки впливу вхідної швидкості, прикладеного крутного моменту та температури масла. Після цього на інструментальній установці проводилась експериментальна кампанія для ефективного навчання декількох моделей машинного навчання, здатних передбачити варіації в основні піки ТЕ (амплітуда і фаза) виходячи з нав'язаних умов експлуатації.

У четвертому розділі розглядається моделювання та компенсація помилок положення в промислових сервомеханізмах. У дослідженні впроваджено використання алгоритмів машинного навчання для розробки комплексної моделі ТЕ, з особливим акцентом на редуктори RV. Отримані результати демонструють точні прогнози та суттєве зниження більш ніж на 90% як середньоквадратичного значення ТЕ, так і максимальних значень.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Na, J.; Huang, Y.; Pei, Q.; Wu, X.; Gao, G.; Li, G. Active Suspension Control of Full-Car Systems without Function Approximation. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 2020, 25, 779–791.
2. Wu, L.; Wang, L.; Zhang, C.; Shi, H. Dynamic Characteristics Analysis and Dual Motor Synchronous Control of Hydraulic Lifting System for Large Cranes. *J. Eng.* 2019, 2019, 203–207.
3. Lin, S.; Cai, Y.; Yang, B.; Zhang, W. Electrical Line-Shafting Control for Motor Speed Synchronisation Using Sliding Mode Controller and Disturbance Observer. *IET Control Theory Appl.* 2017, 11, 205–212.
4. Zeng, T.; Ren, X.; Zhang, Y. Fixed-Time Sliding Mode Control and High-Gain Nonlinearity Compensation for Dual-Motor Driving System. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2020, 16, 4090–4098.
5. Ling, Y.; Chu, W. Research on Movement Relationship and Synchronized Motion Control Strategy for the Attack Angle Device of the 2.4 m Transonic Wind Tunnel. In *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE, ICMA, Harbin, China, 7–10 August 2016*; pp. 249–253.
6. Odhano, S.A.; Pescetto, P.; Awan, H.A.A.; Hinkkanen, M.; Pellegrino, G.; Bojoi, R. Parameter Identification and Self-Commissioning in AC Motor Drives: A Technology Status Review. *IEEE Trans. Power Electron.* 2019, 34, 3603–3614.
7. Ruan, X.; Zhao, J. The PWM Servo and LQR Control of a Dual-Wheel Upright Self-Balancing Robot. In *Proceedings of the 2008 International Symposiums on Information Processing, Moscow, Russia, 23–25 May 2008*; pp. 586–590.
8. Marciu, S.; Bucur, G.; Moise, A.; Orhei, D.; Popescu, C. Automatic Positioning System for Photovoltaic Panels. In *Proceedings of the 2018 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Iasi, Romania, 28–30 June 2018*; pp. 1–5.
9. Wang, Y.; Hu, X.; Feng, Y.; Li, S. Design and Experimental Study of Dc Servomotor Controller. In *Proceedings of the 2020 3rd International Conference on*

Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE), Shenzhen, China, 24–26 April 2020; pp. 684–689.

10. Urakawa, Y. Application of Limited Pole-Placement Method to State Feedback System. In Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), Kashiwa, Japan, 7–9 March 2021.

11. Shinagawa, T.; Kumamoto, K. Base Robot User's Guide, 1st ed.; Hirata Corporation: Tokyo, Japan, 1998.

12. Raja, H.A.; Autso, S.; Kudelina, K.; Rjabtsikov, V.; Vaimann, T.; Kallaste, A.; Pomarnacki, R.; Hyunh, V.K. Digital Twin of Wind Generator for Modelling Various Turbine Characteristics. In Proceedings of the 2023 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), High Tatras, Slovakia, 25–27 September 2023; pp. 1–5.

13. Kudelina, K.; Raja, H.A.; Autso, S.; Naseer, M.U.; Vaimann, T.; Kallaste, A.; Pomarnacki, R.; Hyunh, V.K. Preliminary Analysis of Mechanical Bearing Faults for Predictive Maintenance of Electrical Machines. In Proceedings of the 2023 IEEE 14th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Chania, Greece, 28–31 August 2023; pp. 430–435.

14. Zhang, Y.J.; Ge, S.L.; Li, F.Y. Development of a Testing System for Torque Characteristics of Folding Hinges. In Proceedings of the 2020 5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT), Nanchang, China, 15–17 May 2020; pp. 84–88.

15. Shinagawa, T.; Kumamoto, K. Robot Controller User's Guide, 4th ed.; Hirata Corporation: Tokyo, Japan, 1999.

16. Jamaludin Z, Van Brussel H, Pipeleers G, Swevers J (2008) Accurate Motion Control of XY High-Speed Linear Drives Using Friction Model Feedforward and Cutting Forces Estimation. *Annals of the CIRP* 57(1):403–406.

17. Altintas Y, Verl A, Brecher C, Uriarte L, Pritschow G (2011) Machine Tool Feed Drives. *Annals of the CIRP* 60(2):779–796.

18. Van Brussel H, Van den Braembussche P (1998) Robust Control of Feed Drives with Linear Motors. *Annals of the CIRP* 47(1):325–328.
19. Kono D, Matsubara A, Yamaji I, Fujita T (2008) High-Precision Machining by Measurement and Compensation of Motion Error. *IJMTM* 48(10):1103–1110.
20. Altintas Y, Verl A, Brecher C, Uriarte L, Pritschow G (2011) Machine Tool Feed Drives. *Annals of the CIRP* 60(2):780–794.
21. Dumanli A, Sencer B (2018) Optimal High-Bandwidth Control of Ball-Screw Drives with Acceleration and Jerk Feedback. *Precision Engineering* 54:254–268.
22. Erkorkmaz K, Altintas Y (2001) High Speed CNC System Design. Part II: Modeling and Identification of Feed Drives. *IJMTM* 41(10):1487–1509.
23. E. Oliva, G. Berselli, M. Pellicciari, A.O. Andrisano, An engineering method for the power flow assessment in servo-actuated automated machinery: Mechatronic modeling and experimental evaluation, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 38 (2016) 31–41.
24. A.-D. Pham, H.-J. Ahn, High precision reducers for industrial robots driving 4th industrial revolution: state of arts, analysis, design, performance evaluation and perspective, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.* 5 (2018) 519–533.
25. S.-S. Yeh, H.-C. Su, Development of friction identification methods for feed drives of CNC machine tools, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 52 (2011) 263–278.
26. L.X. Xu, J.L. Zhong, Y. Li, L. Chang, Design and dynamic transmission error analysis of a new type of cycloidal-pin reducer with a rotatable output-pin mechanism, *Mech. Mach. Theory* 181 (2023) 105218.
27. Nabtesco, Precision gearboxes - component sets, 2024, URL: <https://www.nabtesco.de/en/products/precision-gearboxes-component-sets>.
28. K.-Y. Wu, Y.-P. Shih, J.-J. Lee, Kinematic error analysis of the rotor vector gear reducer with machining tolerances, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 42 (2020) 1–16.

29. H. Xu, Z. Shi, B. Yu, H. Wang, Dynamic measurement of the lost motion of precision reducers in robots and the determination of optimal measurement speed, *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.* 13 (3) (2019).
30. M. Belloni, P. Bilancia, R. Raffaelli, M. Peruzzini, M. Pellicciari, Design of a test rig for tuning and optimization of high dynamics servo-mechanisms employed in manufacturing automation, *Procedia Manuf.* 55 (2021) 48–55, FAIM 2021.
31. S. Ferrarini, P. Bilancia, R. Raffaelli, M. Peruzzini, M. Pellicciari, A method for the assessment and compensation of positioning errors in industrial robots, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 85 (2024) 102622.
32. S. Jin, S. Shang, S. Jiang, M. Cao, Y. Wang, Sensitivity analysis of RV reducer rotation error based on deep Gaussian processes, *Sensors* 23 (7) (2023).
33. M. Yamamoto, M. Iwasaki, H. Hirai, Y. Okitsu, K. Sasaki, T. Yajima, Modeling and compensation for angular transmission error in harmonic drive gearings, *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.* 4 (2) (2009) 158–165.
34. Matsubara A, Nagaoka K, Fujita T (2011) Model-Reference Feedforward Con-troller Design for High-Accuracy Contouring Control of Machine Tool Axes. *Annals of the CIRP* 60(1):415–418.
35. Yoon JY, Trumper DL (2014) Friction Modelling, Identification, And Compen-sation Based on Friction Hysteresis and Dahl Resonance. *Mechatronics* 24 (6):734–741.
36. Tiapkin, M.; Balkovoi, A.; Samygina, E. Current Controller Design of Precision Servo Drive. In *Proceedings of the 2020 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED)*, Moscow, Russia, 27–30 January 2020; pp. 1–6.
37. Yin, Y.; Liu, L.; Vazquez, S.; Xu, R.; Dong, Z.; Liu, J.; Leon, J.I.; Wu, L.; Franquelo, L.G. Disturbance and Uncertainty Attenuation for Speed Regulation of PMSM Servo System Using Adaptive Optimal Control Strategy. *IEEE Trans. Transp. Electrif.* 2023, 9, 3410–3420.
38. Samygina, E.K.; Rassudov, L.N.; Balkovoi, A.P. Comparison of Linear Position and Velocity Control Strategies for a Direct Servodrives. In *Proceedings of the*

2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), Moscow, Russia, 31 January–2 February 2018; pp. 1–5.

39. Harib, K.H.; Khousa, E.A.; Ismail, A. Field Oriented Motion Control of a 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor. In Proceedings of the 2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), Sharjah, United Arab Emirates, 15–17 November 2011; Volume 17555, pp. 1–7.

40. Szász, C. Fuzzy Strategy-Based Position Control of Field-Oriented PM-Hybrid Stepping Motor. In Proceedings of the 2007 IEEE International Fuzzy Systems Conference, London, UK, 23–26 July 2007; pp. 1–5.

41. H.-N. Nguyen, J. Zhou, H.-J. Kang, A calibration method for enhancing robot accuracy through integration of an extended Kalman filter algorithm and an artificial neural network, *Neurocomputing* 151 (P3) (2015) 996–1005.

42. M. Bai, M. Zhang, H. Zhang, M. Li, J. Zhao, Z. Chen, Calibration method based on models and least-squares support vector regression enhancing robot position accuracy, *IEEE Access* 9 (2021) 136060–136070.

43. F. Petropoulos, D. Apiletti, V. Assimakopoulos, M.Z. Babai, Forecasting: theory and practice, *Int. J. Forecast.* 38 (3) (2022) 705–871.

44. C.J. Willmott, K. Matsuura, Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance, *Clim. Res.* 30 (1) (2005) 79–82.

45. S. Ma, K. Deng, Y. Lu, X. Xu, Error compensation method of industrial robots considering non-kinematic and weak rigid base errors, *Precis. Eng.* 82 (2023) 304–315.

46. S. Ferrarini, P. Bilancia, R. Raffaelli, M. Peruzzini, M. Pellicciari, A method for the assessment and compensation of positioning errors in industrial robots, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 85 (2024) 102622.

47. P. Mesmer, M. Neubauer, A. Lechler, A. Verl, Robust design of independent joint control of industrial robots with secondary encoders, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 73 (2022) 102232.

48. Wahyunggoro, O.; Saad, N.B. Development of Fuzzy-Logic-Based Self Tuning PI Controller for Servomotor. In Proceedings of the 2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Hanoi, Vietnam, 17–20 December 2008; pp. 1545–1550.
49. Siregar, M.F.; Sihombing, P. Suherman Analysis of Fuzzy Logic Method for Load Lifting Robot. In Proceedings of the 2019 3<sup>rd</sup> International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM), Medan, Indonesia, 16–17 September 2019; pp. 125–129.
50. Starikov, A.; Lisin, S.; Rokalo, D. Technical Implementation of the High-Speed Response Servo Drive at the Programmable Logic Device. In Proceedings of the 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia, 21–25 October 2019; pp. 1–6.
51. Dejie, S.; Boxue, T. Design of Revs Curve Programmable Servo Control System. In Proceedings of the 2009 4th International Conference on Computer Science & Education, Nanning, China, 25–28 July 2009; pp. 578–581.
52. Rojas-Moreno, A. Building a Training Suitcase for Control Engineering. In Proceedings of the 2022 IEEE ANDESCON, Barranquilla, Colombia, 16–19 November 2022; pp. 1–6.
53. Long, Y.; Zhong, C. A Universal Numerical Control System Solution Based on High Speed Network. In Proceedings of the 2020 Chinese Automation Congress (CAC), Shanghai, China, 6–8 November 2020; pp. 7587–7592.
54. Liu, D.; Ruan, J.; Fan, S.; Zhang, H.; Bai, Y.; Wang, X.; Shi, J.; Guan, Y.; Zhang, S. A Control System for Atomic Fountain Clock Based on Field- Programmable Gate Array. In Proceedings of the 2023 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), Toyama, Japan, 15–19 May 2023; pp. 1–4.

55. Chen, G.M.; Hsu, C.F.; Lee, T.T. Adaptive Fuzzy Control with PI Learning Algorithm for Induction Servomotor Systems. In Proceedings of the The 14th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2005. FUZZ'05, Reno, NV, USA, 25 May 2005; pp. 530–535.
56. Regina, B.D.A.; Aguiar, M.J.R.; Ferreira, A.A. Comprehensive and Didactic DC Servomotor Control Platform. In Proceedings of the 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), Santos, Brazil, 1–4 December 2019.
57. Autso, S.; Saroka, V.; Karpovich, D.; Rassolkin, A.; Gevorkov, L.; Vaimann, T.; Kallaste, A.; Belahcen, A. Comparative Study of Field-Oriented Control Model in Application for Induction and Synchronous Reluctance Motors for Life-Cycle Analysis. In Proceedings of the 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), Moscow, Russia, 31 January–2 February 2018; pp. 1–5.
58. Saroka, V.; Autso, S. Use FOC Vector Control to Optimize the Control of a Galvanic Robot Manipulator. In Proceedings of the 2018 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, Lithuania, 26 April 2018; pp. 1–4.
59. Kumari, M.; Kumar, A. Design and Analysis of IoT Based Automatic Smart Tea Machine. In Proceedings of the 2023 6th International Conference on Information Systems and Computer Networks (ISCON), Mathura, India, 3–4 March 2023; pp. 1–4.
60. Eswaran, K.; Kumar, M.S.S.; Thangavelusamy, D.; Murugadoss, V. Smart Servomotor for Robotics and Its Cyber Security. In Proceedings of the 2020 Advanced Computing and Communication Technologies for High Performance Applications (ACCTHPA), Cochin, India, 2–4 July 2020; pp. 231–236.

61. Soniya, V.; Shankar, K.R.; Karishma, S.; Vamsi, D.; Prasad, R.V.H. IoT Based Smart Way of Watering Plants and Feeding Pets. In Proceedings of the 2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, 17–18 March 2023; Volume 1, pp. 744–749.
62. Ishak, M.K.; Kit, N.M. Design and Implementation of Robot Assisted Surgery Based on Internet of Things (IoT). In Proceedings of the 2017 International Conference on Advanced Computing and Applications (ACOMP), Ho Chi Minh City, Vietnam, 29 November 1 December 2017; pp. 65–70.
63. Siddiqua, A.; Anjum, A.; Kondapalli, S.; Kaur, C. Regulating and Monitoring IoT Controlled Solar Power Plant by ML. In Proceedings of the 2023 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), Coimbatore, India, 23–25 January 2023; pp. 1–4.
64. Tiapkin, M.; Balkovoi, A.; Samygina, E. Current Controller Design of Precision Servo Drive. In Proceedings of the 2020 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED), Moscow, Russia, 27–30 January 2020; pp. 1–6.
65. Li, S.; Xu, Y.; Zou, J. A Modified Predictive Current Control with Sensitivity Analysis for Permanent Magnet Synchronous Motor. In Proceedings of the 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, Sweden, 23–26 August 2020; pp. 1027–1032.
66. Yin, Y.; Liu, L.; Vazquez, S.; Xu, R.; Dong, Z.; Liu, J.; Leon, J.I.; Wu, L.; Franquelo, L.G. Disturbance and Uncertainty Attenuation for Speed Regulation of PMSM Servo System Using Adaptive Optimal Control Strategy. *IEEE Trans. Transp. Electrification*. 2023, 9, 3410–3420.
67. Liu, K.; Fang, Y.; Zhao, Y.; Han, Y. Accurate Speed Control for High-Power Servomotor Based on Adaptive Backstepping Control Approach. In Proceedings

of the 2007 International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, 5–8 August 2007; pp. 3668–3672.

68. Samygina, E.K.; Rassudov, L.N.; Balkovoi, A.P. Comparison of Linear Position and Velocity Control Strategies for a Direct Servodrive. In Proceedings of the 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), Moscow, Russia, 31 January–2 February 2018; pp. 1–5.

69. Hsu, C. Commissioning of Current Controller for Servo. In Proceedings of the IECON 2018—44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, DC, USA, 21–23 October 2018; Volume 1, pp. 2397–2403.

70. Li, F.; Xia, Q.; Qi, Z. The Importance Effect of the Undamped Natural Frequency to the Autopilot: Study on the Two-Loop Acceleration Autopilot. In Proceedings of the 2010 International Conference on Electronics and Information Engineering, Kyoto, Japan, 1–3 August 2010; Volume 1, pp. V1-371–V1-373.

## Додаток А

### Стаття у фаховому журналі (подана до редакції журналу «Вимірювальна та обчислювальна техніка у технологічних процесах»)

УДК 004.8

DOI:

**Андрій БАЛАГУР, Дмитро МАРТИНЮК, Наталія МОРКУН**

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0009-0009-3802-4685

0009-0002-3524-872X

0000-0002-1261-1170

e-mail: [andriy.xolibas@gmail.com](mailto:andriy.xolibas@gmail.com)

[martiniyuk.dim14@gmail.com](mailto:martiniyuk.dim14@gmail.com)

[nataliia.morkun@lnu.edu.ua](mailto:nataliia.morkun@lnu.edu.ua)

#### **МЕТОД КОМПЕНСАЦІЇ ТОЧНОСТІ РУХУ ПРОМИСЛОВИХ СЕРВОПРИВОДІВ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ**

*У статті висвітлюється проблема сучасного виробництва, яка не може обійтися без електродвигунів, котрі використовуються в різних сферах. Різні типи електродвигунів використовуються для різних цілей, що дозволяє підвищити продуктивність, енергоефективність та економічність у будь-якому виробничому процесі. Завдяки моторам можливості виробництва постійно розширюються, що дозволяє використовувати більш складні і вдосконалені механізми, створювати нові можливості для розвитку.*

*У роботі описуються структури, виконання, види, основні принципи та методи керування сервомотором, а також висвітлюються його переваги, обмеження та можливості застосування. ШІМ-керування з використанням цифрової обробки сигналів виявляється ефективним у контролі положення, швидкості та траєкторії. Контроль струму, або контроль крутного моменту, вирізняється високою точністю регулювання крутного моменту, швидкою реакцією на зміни, економією енергії та впливом на точність позиціонування.*

*У дослідженні впроваджено використання алгоритмів машинного навчання для розробки комплексної моделі ТЕ, з особливим акцентом на редуктори RV. Отримані результати демонструють точні прогнози та суттєве зниження більш ніж на 90% як середньоквадратичного значення ТЕ, так і максимальних значень.*

*Ключові слова: компенсація руху, сервомеханізм, помилка, прогнозоване моделювання, випробувальний стенд, машинне навчання.*

**Andriy BALAHUR, Dmytro MARTYNYUK, Natalia MORKUN**

Khmelnytskyi National University

#### **METHOD OF ACCURACY COMPENSATION OF THE MOVEMENT OF INDUSTRIAL SERVO DRIVES BASED ON MACHINE LEARNING**

*The article highlights the problem of modern production, which cannot do without electric motors used in various fields. Different types of electric motors are used for different purposes, increasing productivity, energy efficiency and cost-effectiveness in any production process. Thanks to motors, production possibilities are constantly expanding, which allows you to use more complex and improved mechanisms, create new opportunities for development.*

*The work describes the structures, execution, types, basic principles and methods of controlling the servo motor, as well as highlights its advantages, limitations and application possibilities. PWM control using digital signal processing is effective in controlling position, speed, and trajectory. Current control, or torque control, is characterized by high accuracy of torque regulation, quick response to changes, energy saving and impact on positioning accuracy.*

*The study implemented the use of machine learning algorithms for the development of a complex TE model, with a special emphasis on RV gearboxes. The obtained results demonstrate accurate predictions and a significant reduction of more than 90% in both TE rms and peak values.*

*Keywords: motion compensation, servomechanism, error, predictive modeling, test bench, machine learning.*

## Постановка проблеми

Сучасне виробництво не може обійтися без електродвигунів, які використовуються в різних сферах. Різні типи електродвигунів використовуються для різних цілей, що дозволяє підвищити продуктивність, енергоефективність та економічність у будь-якому виробничому процесі [1]. Завдяки моторам можливості виробництва постійно розширюються, що дозволяє використовувати більш складні і вдосконалені механізми, створювати нові можливості для розвитку.

Одним із шляхів розвитку виробництва є використання роботизованих систем, де безпосередньо використовуються серводвигуни [2]. Сервомотори в роботах використовуються для підвищення точності або плавності роботи механізатора, в залежності від завдання, яке він виконує. Тому управління приводами повинно мати аналогічну природу, дозволяючи досягати необхідних цілей. Однак, чим складніше спосіб управління приводом, тим більш складною буде система управління, що призведе до додаткових витрат, але в той же час підвищить виробничі характеристики [3].

Управління серводвигунами не тільки змінилося в останні роки, але і продовжує розвиватися, революціонізуючи різні галузі, зокрема робототехніку та автоматизацію. Спочатку управління цими двигунами здійснювалося за допомогою аналогових методів, але з розвитком цифрових технологій управління стало більш точним і універсальним [4].

В даний час використовуються різні технології управління серводвигунами, включаючи цифрові системи обробки сигналів, системи зворотного зв'язку, польове управління та системи управління, інтегровані з Industry 4.0. Всі ці види управління сервомоторами використовуються для досягнення різних результатів, кожен з яких має свої переваги і недоліки, які розглядаються в цих роботах [5].

## Аналіз останніх джерел

В даний час сервомеханізми є ключовими компонентами, що використовуються в широкому спектрі промислових секторів завдяки їх вражаючим динамічним характеристикам руху та можливості легкої переналаштування їх завдань, що дозволяє швидко адаптувати загальні виробничі системи до нових запитів і форматів [6].

Вони широко застосовуються для приведення в дію роботизованих систем і верстатів, а також у різних виробничих процесах, таких як текстиль, поліграфія, лиття під тиском, обробка металів тиском і харчова промисловість [7]. Зростаючі стандарти якості продукції вимагають підвищення точності руху багатьох виробничих систем, таких як роботизована точна обробка та складання, метрологічне обладнання, верстати з числовим програмним керуванням (ЧПУ) [8] та верстати для лазерного різання. Редуктори можуть бути особливо складними [9]. В першу чергу це пов'язано зі складним характером вузлів редукторів, що складаються з численних деталей і взаємних складних контактних взаємодій, характер яких може бути не ідеально передбачуваним, оскільки вони строго пов'язані з виготовленням деталей (наприклад, форма зуба і допуски). Складність посилюється при використанні компактних рішень, таких як редуктори з обертовими векторами (RV), які поєднують планетарний ступінь з циклоїдальним ступенем для досягнення більш високих коефіцієнтів зниження (зазвичай в діапазоні від 30 до 300, як видно з каталогів виробників) [10].

Як правило, динамічна поведінка редукторів швидкості варіюється в залежності від їх кінематичної архітектури і безлічі робочих параметрів, включаючи швидкість, стійкий крутний момент, температуру мастила і ступінь деградації. Складна взаємодія цих факторів вимагає комплексного підходу при спробі змоделювати і зрозуміти їх вплив на ТЕ.

Чисто теоретичні моделі, як ті, що запропоновані в Бібліограф.[11], може недостатньо вловити чутливість параметра, необхідну для прогнозування та компенсації цих нелінійних ефектів у реальних додатках. Крім того, додаткові проблеми виникають у зв'язку з тим, що численні геометричні та функціональні параметри обраного комерційного редуктора залишаються прихованими для користувача, обмежуючи застосовність наданих формул.

Отже, нещодавні дослідження все частіше використовують спеціалізоване обладнання для тестування та збагачення поведінкових моделей, також і отримання розуміння цих складних взаємодій [12]. Незважаючи на те, що згадані роботи зробили значний прогрес у динамічній характеристиці редукторів, у звітних дослідженнях зазвичай враховується зменшена кількість параметрів (наприклад, комбінація швидкості та прикладеного навантаження або знос, за винятком температури масла).

Експерименти, проведені на своєчасно обладнаних випробувальних стендах, дають великі дані і пропонують більш повне розуміння досліджуваної системи в порівнянні з прямими вимірюваннями на промислових машинах.

Тим не менш, відображення ТЕ редуктора в широкій операційній області (тобто з урахуванням 3-4 вхідних параметрів) може зайняти багато часу. Це пояснюється великою кількістю необхідних експериментів (навіть при середньому числі рівнів, призначених кожному параметру), під впливом обраного методу апроксимації, спрямованого на побудову точних емпіричних співвідношень, вдаючись до методів метамоделювання.

У цьому контексті машинне навчання (ML) виявилось цінним інструментом для досягнення хорошого балансу між кількістю експериментів і точністю моделі. Алгоритми машинного навчання можуть аналізувати історичні дані, виявляти закономірності та прогнозувати поведінку системи, що робить їх придатними для моделювання складних, нелінійних динамічних систем. У літературі машинне навчання використовується для розробки прогнозних моделей, які можуть компенсувати помилки, покращувати стабільність і безперервно оптимізувати роботу систем управління і промислових серійних механізмів.

Машинне навчання також було застосовано для прогнозування похибок точності позиціонування промислових роботів у їхньому робочому просторі та відмов під час роботизованих завдань, або для виконання оптимальної генерації траєкторії та компенсації помилок шляху, так і на верстатах з ЧПУ.

**Метою роботи є:** розробка методів компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання.

### Виклад основного матеріалу

Перш ніж заглибитися в процес компенсації, перевіряються можливості розробленого ФБ щодо прогнозування роботи редуктора ТЕ в межах розглянутої операційної області.

Для оцінки можливостей прогнозування моделі машинного навчання в Twin-CAT було обрано три додаткові сценарії, що виходять за рамки початкового навчального набору даних, що включають 1026 зразків. Відповідні параметри наведені в таблиці 1. Слід зауважити, що в цих експериментах постійний набір вхідних параметрів (тобто без зміни  $w_{in}$ ,  $M_{out}$  і  $T_l$ ) виконується протягом усієї тривалості експерименту ( $0^\circ \leq \theta_{out} \leq 360^\circ$ ), як це робиться під час навчання моделі.

Таблиця 1 – Вхідні параметри, що враховуються для тестів прогнозування ML

Test	$w_{in}[rpm]$	$M_{out}[Nm]$	$T_l[^\circ C]$
1	350	650	26
2	775	1525	31
3	1650	370	27

Що стосується моделей машинного навчання, розглянутих раніше, з посиланням на таблицю 2, SVM вибирається для компонента 0, RF і LGBM - для компонента 1, HGBM - для компонента 39, тоді як ERT і GBM - для компонента 40.

Таблиця 2 – Найефективніші моделі

k	$\hat{A}_{\cdot k}^*$	$\hat{\varphi}_{\cdot k}^*$
0	SVM	-
1	RF	LGBM
3	HGBM	HGBM
39	HGBM	HGBM
40	ERT	GBM
78	HGBM	RF
81	RF	RF
156	ERT	RF
162	ERT	ERT
240	ERT	ERT

За кожним сценарієм проводяться експерименти на буровій установці для отримання даних з датчиків. Потім експериментальну ТЕ порівнюють з ТЕ, передбаченою FB, зосереджуючись на спектральних компонентах 0, 1, 39 і 40.

З практичної точки зору, розгляд більш ніж чотирьох внесків вимагав би збільшення часу циклу повільного завдання (наприклад, з 500 мкс до 1 мс), тим самим знижуючи продуктивність пропускну здатності управління, як детально проілюстровано на рисунку 1.

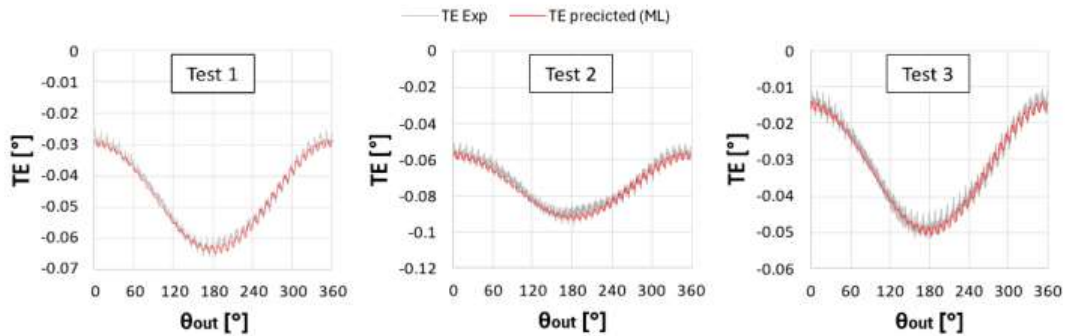


Рисунок 1 – Порівняння між експериментальними та прогнозованими функціями ТЕ, ML у попередніх валідаційних тестах

#### Аналіз ефективності запропонованого методу

Підсумовуючи, це дослідження підкреслює потенціал використання підходу на основі даних для моделювання та компенсації помилок положення в промислових сервомеханізмах. Отримані результати відкривають шляхи для підвищення точності та продуктивності автоматизованих виробничих систем, демонструючи практичні переваги підходів, заснованих на машинному навчанні, у вирішенні проблем, пов'язаних із складними та нелінійними компонентами промислової автоматизації.

Зібраний набір навчальних даних та розроблені моделі машинного навчання відкрито передаються спільноті як спроба забезпечити міцну основу для майбутніх досягнень у стратегіях компенсації сервомеханізмів, керованих ПЛК.

Вони можуть включати вдосконалення запропонованих моделей машинного навчання або навіть розробку більш складних (з частковим акцентом на методах навчання з підкріпленням) для прогнозування зносу або проблем зі здоров'ям редуктора та їх пов'язаного впливу на ТЕ, а також забезпечення більш проактивних втручань з технічного обслуговування.

Крім того, інтеграція в існуючі контролери роботів може бути корисною, потенційно підвищуючи доступність запропонованого методу для ширшого спектру промислових умов.

#### ВИСНОВКИ

Загалом в роботі описуються структури, виконання, види, основні принципи та методи керування сервомотором, а також висвітлюються його переваги, обмеження та можливості застосування. ШПМ-керування з використанням цифрової обробки сигналів виявляється ефективним у контролі положення, швидкості та траєкторії. Контроль струму, або контроль крутного моменту, вирізняється високою точністю регулювання крутного моменту, швидкою реакцією на зміни, економією енергії та впливом на точність позиціонування.

Було розглянуто запроповану попередньо компенсовану траєкторію, яка усуває похибки тертя і тим самим дозволяє обробляти профіль поверхні, близький до ідеалу. Значно підвищує динамічну точність верстатів за рахунок компенсування для сервоприводу замкнутого контуру та тертя ручки (перед ковзанням) і викликало помилки шляхом зміни опорної траєкторії.

Потім було проведено попередній аналіз для вивчення спектральних компонентів функцій ТЕ, виміряних на спеціалізованому випробувальному стенді, призначеному для оцінки впливу вхідної швидкості, прикладеного крутного моменту та температури масла. Після цього на інструментальній установці проводилась експериментальна кампанія для ефективного навчання декількох моделей машинного навчання, здатних передбачити варіації в основні піки ТЕ (амплітуда і фаза) виходячи з нав'язаних умов експлуатації.

Також в роботі розглядається моделювання та компенсація помилок положення в промислових сервомеханізмах. У дослідженні впроваджено використання алгоритмів машинного навчання для розробки

комплексної моделі ТЕ, з особливим акцентом на редуктори RV. Отримані результати демонструють точні прогнози та суттєве зниження більш ніж на 90% як середньоквадратичного значення ТЕ, так і максимальних значень.

### Література

1. Na, J.; Huang, Y.; Pei, Q.; Wu, X.; Gao, G.; Li, G. Active Suspension Control of Full-Car Systems without Function Approximation. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 2020, 25, 779–791.
2. Wu, L.; Wang, L.; Zhang, C.; Shi, H. Dynamic Characteristics Analysis and Dual Motor Synchronous Control of Hydraulic Lifting System for Large Cranes. *J. Eng.* 2019, 2019, 203–207.
3. Lin, S.; Cai, Y.; Yang, B.; Zhang, W. Electrical Line-Shafting Control for Motor Speed Synchronisation Using Sliding Mode Controller and Disturbance Observer. *IET Control Theory Appl.* 2017, 11, 205–212.
4. Zeng, T.; Ren, X.; Zhang, Y. Fixed-Time Sliding Mode Control and High-Gain Nonlinearity Compensation for Dual-Motor Driving System. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2020, 16, 4090–4098.
5. Ling, Y.; Chu, W. Research on Movement Relationship and Synchronized Motion Control Strategy for the Attack Angle Device of the 2.4 m Transonic Wind Tunnel. In *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE, ICMA, Harbin, China, 7–10 August 2016*; pp. 249–253.
6. E. Oliva, G. Berselli, M. Pellicciari, A.O. Andrisano, An engineering method for the power flow assessment in servo-actuated automated machinery: Mechatronic modeling and experimental evaluation, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 38 (2016) 31–41.
7. A.-D. Pham, H.-J. Ahn, High precision reducers for industrial robots driving 4th industrial revolution: state of arts, analysis, design, performance evaluation and perspective, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.* 5 (2018) 519–533.
8. S.-S. Yeh, H.-C. Su, Development of friction identification methods for feed drives of CNC machine tools, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 52 (2011) 263–278.
9. L.X. Xu, J.L. Zhong, Y. Li, L. Chang, Design and dynamic transmission error analysis of a new type of cycloidal-pin reducer with a rotatable output-pin mechanism, *Mech. Mach. Theory* 181 (2023) 105218.
10. Nabtesco, Precision gearboxes - component sets, 2024, URL: <https://www.nabtesco.de/en/products/precision-gearboxes-component-sets>.
11. K.-Y. Wu, Y.-P. Shih, J.-J. Lee, Kinematic error analysis of the rotor vector gear reducer with machining tolerances, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 42 (2020) 1–16.
12. H. Xu, Z. Shi, B. Yu, H. Wang, Dynamic measurement of the lost motion of precision reducers in robots and the determination of optimal measurement speed, *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.* 13 (3) (2019).

### References

1. Na, J.; Huang, Y.; Pei, Q.; Wu, X.; Gao, G.; Li, G. Active Suspension Control of Full-Car Systems without Function Approximation. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 2020, 25, 779–791.
2. Wu, L.; Wang, L.; Zhang, C.; Shi, H. Dynamic Characteristics Analysis and Dual Motor Synchronous Control of Hydraulic Lifting System for Large Cranes. *J. Eng.* 2019, 2019, 203–207.
3. Lin, S.; Cai, Y.; Yang, B.; Zhang, W. Electrical Line-Shafting Control for Motor Speed Synchronisation Using Sliding Mode Controller and Disturbance Observer. *IET Control Theory Appl.* 2017, 11, 205–212.
4. Zeng, T.; Ren, X.; Zhang, Y. Fixed-Time Sliding Mode Control and High-Gain Nonlinearity Compensation for Dual-Motor Driving System. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2020, 16, 4090–4098.
5. Ling, Y.; Chu, W. Research on Movement Relationship and Synchronized Motion Control Strategy for the Attack Angle Device of the 2.4 m Transonic Wind Tunnel. In *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE, ICMA, Harbin, China, 7–10 August 2016*; pp. 249–253.
6. E. Oliva, G. Berselli, M. Pellicciari, A.O. Andrisano, An engineering method for the power flow assessment in servo-actuated automated machinery: Mechatronic modeling and experimental evaluation, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 38 (2016) 31–41.
7. A.-D. Pham, H.-J. Ahn, High precision reducers for industrial robots driving 4th industrial revolution: state of arts, analysis, design, performance evaluation and perspective, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.* 5 (2018) 519–533.
8. S.-S. Yeh, H.-C. Su, Development of friction identification methods for feed drives of CNC machine tools, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 52 (2011) 263–278.
9. L.X. Xu, J.L. Zhong, Y. Li, L. Chang, Design and dynamic transmission error analysis of a new type of cycloidal-pin reducer with a rotatable output-pin mechanism, *Mech. Mach. Theory* 181 (2023) 105218.
10. Nabtesco, Precision gearboxes - component sets, 2024, URL: <https://www.nabtesco.de/en/products/precision-gearboxes-component-sets>.
11. K.-Y. Wu, Y.-P. Shih, J.-J. Lee, Kinematic error analysis of the rotor vector gear reducer with machining tolerances, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 42 (2020) 1–16.

12. H. Xu, Z. Shi, B. Yu, H. Wang, Dynamic measurement of the lost motion of precision reducers in robots and the determination of optimal measurement speed, *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.* 13 (3) (2019).

РЕЦЕНЗІЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Дипломник: Балагур Андрій Ігорович

Тема: Метод компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання

Спеціальність: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень -; кількість сторінок записки 75

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі розроблено метод компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі описуються структури, виконання, види, основні принципи та методи керування сервомотором, а також висвітлюються його переваги, обмеження та можливості застосування. У другому розділі було розглянуто запропоновану попередньо компенсовану траєкторію, яка усуває похибки тертя і тим самим дозволяє обробляти профіль поверхні, близький до ідеалу. У третьому розділі спочатку було проведено попередній аналіз для вивчення спектральних компонентів функцій ТЕ, виміряних на спеціалізованому випробувальному стенді, призначеному для оцінки впливу вхідної швидкості, прикладеного крутного моменту та температури масла. У четвертому розділі розглядається моделювання та компенсація помилок положення в промислових сервомеханізмах. У дослідженні впроваджено використання алгоритмів машинного навчання для розробки комплексної моделі ТЕ.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: немає.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному рівні.

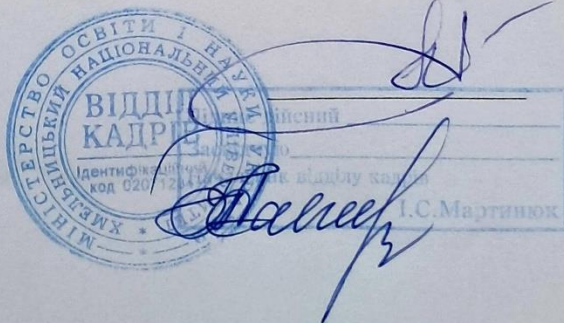
8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи вважаю, що робота заслуговує оцінки «добре» 4,00 (С)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Лисенко Сергій Миколайович, доктор технічних наук, професор кафедри КПС

“ 11 ” 12 2024р.



Завідувачу кафедри АКІТтаР  
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Балагур А.І.

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТРм-23-1

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

02.12.2024р

дата

Б/І  
підпис

## Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Андрій БАЛАГУР

**Співавтор:**

**Назва:** МКР Балагур

**Науковий керівник:** Наталя МОРКУН

**Підрозділ:** Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

**Коефіцієнт подібності 1:** 0%

**Коефіцієнт подібності 2:** 0%

**Мікропробіли:** 4

**Заміна букв:** 2

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 4

**Дата створення звіту:** 2024-12-11 09:10:54.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.


Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

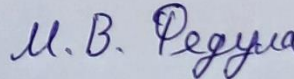
Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2024-12-11

Дата

  
експерт

  
М. В. Федуща

# Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%**

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Помилки в документах: 9%**

ID: 157653 Назва: МКР Метод компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання Додано в БД: 2024-12-11 Автора: Андрій БАЛАГУР Керівники: Наталя МОРКУН Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	111822	830	501 (0%)	8 (1%)

## Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ  
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА  
РОБОТОТЕХНІКИ  
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод компенсації точності руху промислових сервоприводів на основі машинного навчання

Автор: Балагур Андрій Ігорович

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Науковий керівник: Моркун Наталя Володимирівна, доктор технічних наук, професор

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	<b>відповідає</b>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

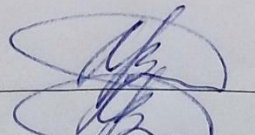
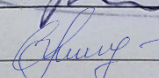
3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 0% і адресується до 70 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_

Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Наталя МОРКУН