

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розроблення та дослідження автоматизованої системи керування процесом екструзії в смарт виробництвах

Виконав: студент

VI курсу, групи КТм-61

174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та

спеціальності робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

	(підпис)	Колеснік О.Р.	(прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	Микитишин А.Г.	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	Чихіра І.В.	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	(підпис)	Голотенко О.С.	(прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	Капаціла Ю.Б.	(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Голотенко О.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«___» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Колесніку Олександрю Ростиславовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення та дослідження автоматизованої системи керування процесом екструзії в смарт виробництвах

Керівник роботи Микитишин Андрій Григорович, канд. техн. наук, доцент кафедри КТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «12» листопада 2025 року № 4/7-962

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи Технічні вимоги щодо процесу екструзії

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Аналітична частина

Технологічна частина

Конструкторська частина

Науково-дослідна частина

Спеціальна частина

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Титульний слайд

Актуальність роботи

Завдання роботи

Основна частина

Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та	доц. Тотосько О.В.		
безпека в надзв. ситуаціях			

7. Дата видачі завдання 12 листопада 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Колеснік О.Р.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Микитишин А.Г.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Об'єм графічної частини дипломної роботи становить _____.

Об'єм пояснювальної записки складає ____ друкованих сторінок формату А4.

В роботі використано ____ літературних джерел.

В роботі було розроблено систему керування настільним екструдером для витягування оптичного волокна. Система реалізована на базі програмованого логічного контролера, який керує процесом екструзії, регулюючи температуру та змінюючи швидкість двигунів, при цьому контролюючи визначальний фактор, а саме силу натягу.

Для коректної і якісної роботи такої системи було промодельовано процес екструзії в системі MATLAB де визначили всі параметри ПІД контролера для забезпечення якісного процесу виробництва. Також для більш якісного передбачення було спроектовано додатковий елемент компенсатора, який дозволяє зменшити похибку реакції системи на зміну технологічних параметрів.

Впровадження такої системи керування для настільних виробничих систем забезпечить не тільки можливість проводити виробництво, але і працювати у вигляді стенда для вивчення ПІД регуляції та машинного навчання на реальних автоматизованих об'єктах.

Ключові слова: КОНТРОЛЕР, ЕКСТРУЗІЯ, ВОЛОКНО, НАТЯГ, ОПТИМІЗАЦІЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	6
1.1. Огляд існуючих аналогів настільного екструзійного пристрою	6
1.2. Огляд програми керування системою для робочого столу.....	10
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	18
2.1. Система контролю натягу волокна для екструзії.....	18
2.2. Оптимізація системи контролю натягу та вдосконалення її точності.....	22
3 КОСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	29
3.1. Розробка пристрою для екструзії волокон	29
3.2. Керування настільним екструдером за допомогою ПЛК.	31
3.3. Під'єднання нагрівальних елементів до ПЛК.....	33
3.4. Під'єднання двигуна постійного струму до ПЛК.	36
3.5. Під'єднання лазерного мікрометра Keyence до ПЛК.....	38
3.6. Під'єднання кінцевих вимикачів до ПЛК.....	39
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	41
4.1 Розробка системи керування процесом натягу волокна	41
4.2. Аналіз внутрішнього циклу ПІД-регулятора на швидкість барабанної обробки.....	43
4.3. Проектування цифрового компенсатора	52
5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	54
5.1 Моделювання вежі оптичного волокна	54

5.2. Повторна вибірка та субпакетування.	57
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ... 63	
6.1 Вимоги охорони праці під час роботи з електроустаткуванням.....	63
6.2 Вимоги безпеки під час виконання робіт	68
6.3 Вимоги безпеки після закінчення робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування	70
6.4 Розрахунок захисного заземлення	72
ВИСНОВКИ.....	78
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	79

ВСТУП

Виробництво оптичних волокон, що є ключовим для технологій інтернет-комунікацій, використовує безперервний процес, відомий як екструзія волокна. У цьому процесі скляна заготовка плавиться в печі, точно вимірюється та охолоджується [4]. Додаткові етапи, що включають хімічне покриття та процеси затвердіння, використовуються для підвищення швидкості виробництва та зміцнення волокон [4]. Ці виробничі установки зазвичай охоплюють кілька поверхів.

Кілька параметрів, таких як діаметр волокна, температура плавлення та натяг, є критично важливими для досягнення бажаних характеристик волокна. Розробка настільних систем екструзії для такого виробництва і можливістю вивчення таких процесів в процесі навчання є важливою задачею на сьогоднішній час.

Розробки в настільній екструзії волокон проводились деякими авторами, які були були піонерами в розробці першого настільного пристрою для екструзії волокон дослідницького класу (Desktop Fiber Extrusion Device (FrED)), розробленого для того, щоб дозволити користувачам маніпулювати різними параметрами процесу, досліджувати різні стратегії керування та збирати дані для розширеної аналітики [5], [6], [7], [8].

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Огляд існуючих аналогів настільного екструзійного пристрою

Настільний комп'ютер FrED освітнього рівня було розроблено для забезпечення легкого доступу до складного лабораторного обладнання шляхом перетворення його на доступний, компактний та надійний настільний пристрій. Загальна схема досліджуваної технології приведена на рис. 1.1.

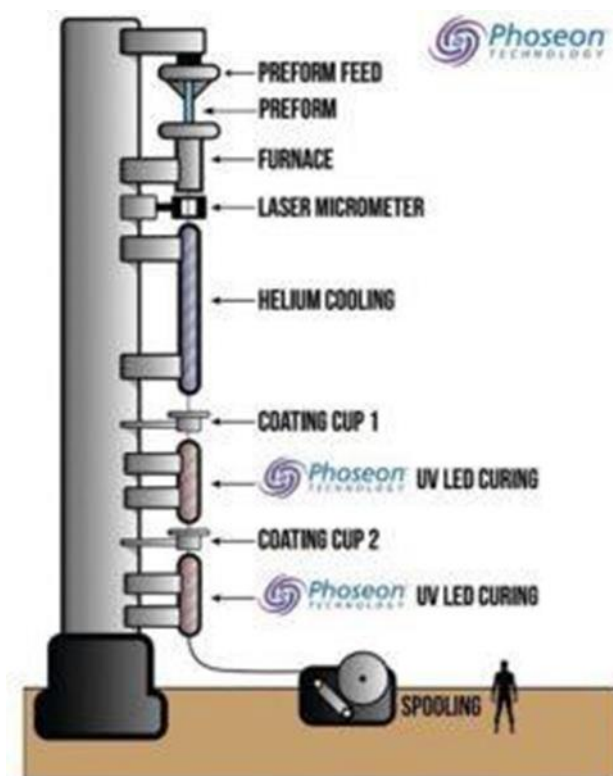


Рисунок 1.1 - Промисловий процес виробництва оптичного волокна, який може включати багатоповерхові приміщення [4].

Клавдій та ін. розробили тривимірну структуру для онлайн-лабораторій, яка слугує основою для структури Desktop FrED, як показано на рисунку 1.1. [3]. Ця структура підвищує універсальність FrED, перетворюючи його з простого продукту на комплексний набір послуг, який

може охоплювати широкий спектр застосувань, що виходять за рамки просто екструзії волокна

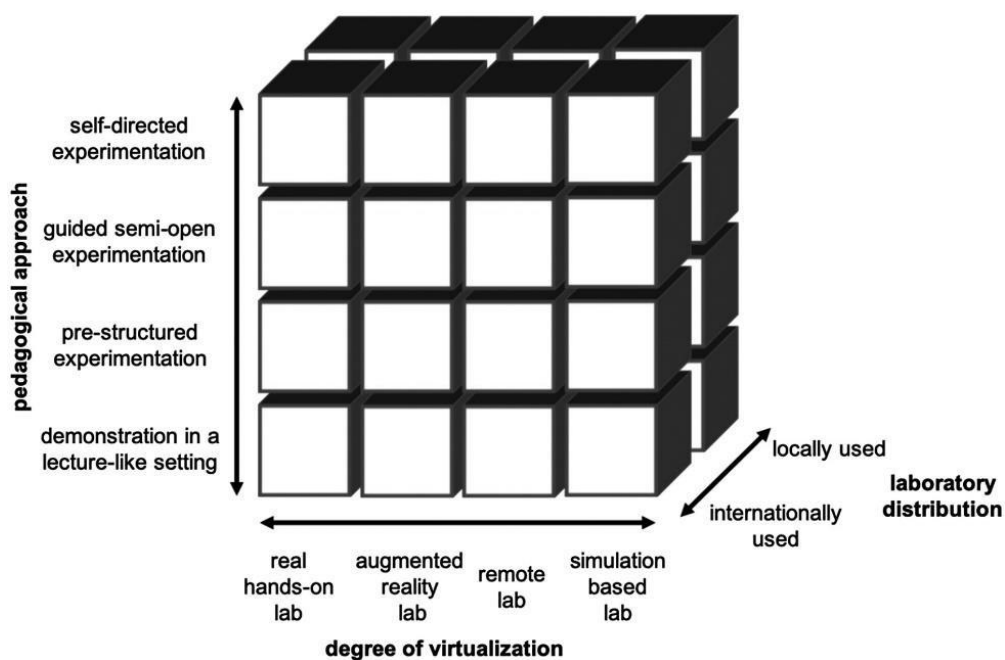


Рисунок 1.2 - Тривимірна структура для онлайн-лабораторій, адаптована для Desktop FrED для задоволення різноманітних освітніх потреб та вимог учнів [3].

Спочатку FrED розроблений для пропонування структурованих практичних експериментальних наборів. Ці набори постачаються з детальними інструкціями, адаптованими до конкретних результатів навчання. З розширенням використання FrED існує потенціал для еволюції навчальних пропозицій від фіксованих до напіввідкритих або навіть самостійних форматів навчання. Така адаптація може зробити технологію доступною для студентів з обмеженими фінансовими ресурсами шляхом інтеграції таких варіантів, як дистанційне або імітаційне лабораторне середовище. Це може включати «стенд FrED», оснащений камерами та передавачами даних, або цифрових двійників FrED, з якими студенти можуть взаємодіяти через свої персональні комп'ютери.

Настільний екструзійний пристрій для волокон дослідницького класу (FrED) був спочатку розроблений у 2017 році Девідом Кімом та Браяном Ентоні спеціально для цілей професійної освіти [10]. Пізніше його було використано Сангвуном та ін. у 2020 році для дослідження методів глибокого навчання з підкріпленням [11], а також Куїффі та ін. у 2021 році для навчання виробничого персоналу [12]. Ця версія FrED розроблена для зменшення масштабу та економії громіздких і дорогих установок, які традиційно використовуються для навчання промислових оптичних волокон. Примітно, що вона спрощує процес, пропускаючи етапи нанесення покриття та замінюючи скляну заготовку гарячим клеєм-олівцем, який безпечніший та легший для нагрівання та екструджування [5]. Пристрій оснащений різними датчиками для збору даних, необхідних для аналітики, та для полегшення різноманітних методів управління процесами (рис.1.3) [5].

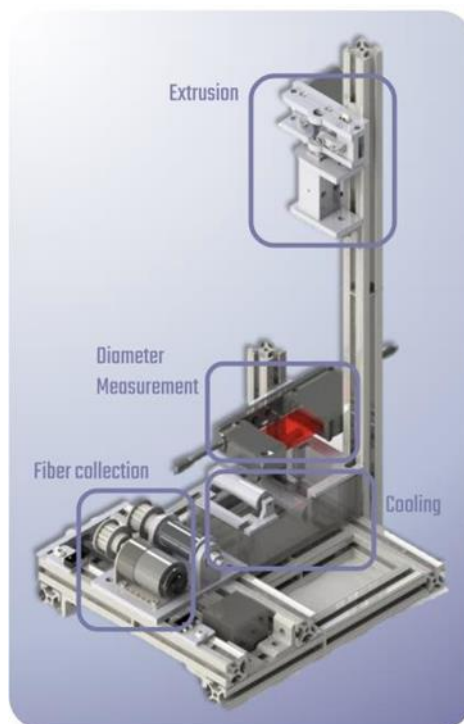


Рисунок 1.3 - CAD-рендеринг дослідницького FrED, що ілюструє підсистеми екструзії, вимірювання діаметра, охолодження та збору волокон [5]

Як показано на рисунку 1.4, FRED дослідницького класу складається з чотирьох основних підсистем: екструдера, блоку охолодження, вимірювання діаметра та системи збору [10] [12]. Екструдер працює шляхом нагрівання заготовки з гарячого клею-олівця за допомогою нагрівальних елементів, вбудованих у виготовлений металевий блок. Потім розм'якшена заготовка проштовхується через менший вихідний отвір за допомогою крокового двигуна, який регулює швидкість екструзії [10] [12]. Коли заготовка виходить, вона стає менш в'язкою та втягується в систему збору, яка включає двигун постійного струму для обертання котушки для збору та кроковий двигун, з'єднаний з ходовим гвинтом для полегшення зворотно-поступального руху, необхідного для рівномірного розподілу волокна [10] [12]. Діаметр волокна контролюється регулюванням натягу та твердне шляхом охолодження у резервуарі з водою. Система вимірювання діаметра постійно контролює та записує діаметр волокна, інтеграція цих даних в алгоритм керування процесом зі зворотним зв'язком для досягнення бажаних характеристик [10] [12].

Збір даних є невід'ємною частиною роботи системи та включає три датчики: резистивний температурний детектор (RTD) для контролю та обмеження нагрівання, лазерний мікрометр для точного вимірювання діаметра волокна для керування із зворотним зв'язком у замкнутому контурі та пару кінцевих вимикачів для регулювання поступального руху котушки [10] [12].

Спочатку для контролю діаметра волокна використовувалася базова модель збереження маси, враховуючи відомі швидкості екструзії та намотування, хоча коливання температури та механічного часу призводили до невідповідностей [11]. Для підвищення точності було впроваджено замкнутий цикл керування, використовуючи пропорційний контролер для швидкості намотування двигуна постійного струму та пропорційно-інтегральний контролер для управління розбіжностями діаметра [11]. Ця

установка продемонструвала ефективність у підтримці узгоджених вимірювань діаметра. Подальші покращення були досягнуті завдяки впровадженню системи керування з глибоким підкріплювальним навчанням (DRL), яка підвищила продуктивність відстеження помилок діаметра [11]. Також було зазначено, що попереднє навчання даних може значно скоротити час онлайн-навчання для цього методу керування [11].

Незважаючи на свою складність та корисність, вартість цієї передової системи становить 54 281 долар США [11], що відображає її розвиток у відповідку епоху, коли очні заняття були нормою.

1.2. Огляд програми керування системою для робочого столу

Перехід до онлайн-середовища навчання вимагав переоцінки настільного пристрою для екструзії волокон (FrED) дослідницького класу через його непомірну вартість та складність для широкого розгортання. Щоб вирішити ці проблеми, Бредлі та ін. взялися за переробку FrED, щоб зробити його легшим та економічно ефективним.

Використовуючи технології швидкого прототипування, такі як лазерне різання акрилу та 3D-друк методом виготовлення плавленими нитками (FFF), а також інтегруючи легкодоступні комерційні компоненти, команда досягла значного зниження виробничих витрат. Спочатку ціна оновленого FrED 2022 становила 5428 доларів, але його було знижено до 270,12 доларів, що на 95% менше. Тепер пристрій важить 5 фунтів (2,4 кг) і складається зі 152 деталей, що робить його не тільки економічним, але й портативним та доступним для ширшого освітнього використання.

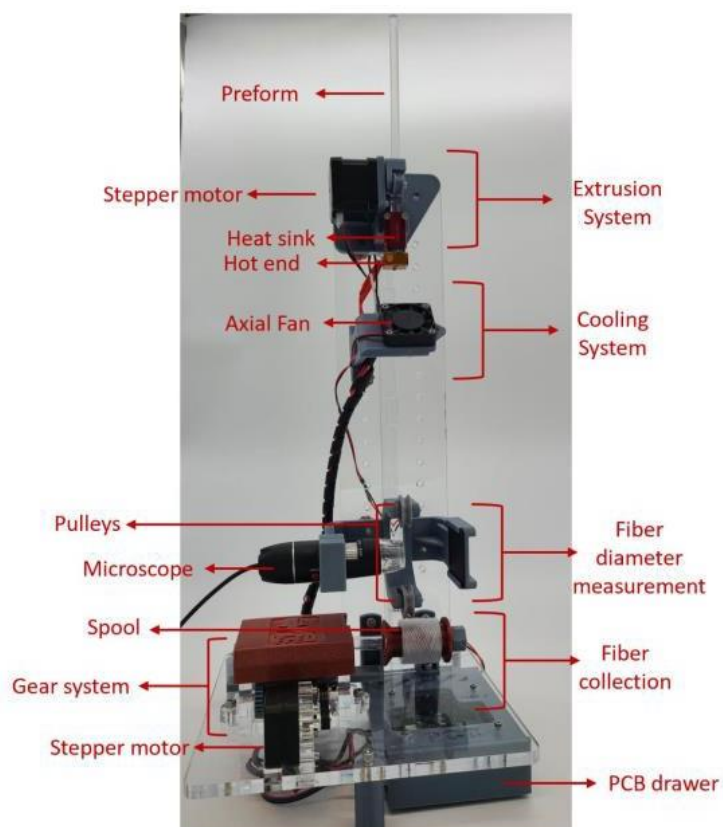


Рисунок 1.4 - Повне складання робочого столу FrED 2022, демонстрація його 6 основних підсистем.

Оновлений пристрій працює на базі Teensy, сумісної з Arduino плати розробки. Користувачі можуть програмувати пристрій, завантажуючи код C++ через роз'єм micro USB, передбачений на платі Teensy. Така гнучкість дозволяє широко налаштовувати його та адаптувати до різних освітніх потреб.

Значною інновацією в Desktop FrED 2022 є впровадження системи вимірювання діаметра на основі камери. Ця система використовує мікроскопічну камеру з регульованим діапазоном масштабування 40-1000x, фактично замінюючи найдорожчий компонент FrED дослідницького класу — лазерний мікрометр, який зазвичай коштує понад 3000 доларів. Ця адаптація не тільки зменшує витрати, але й підтримує точність, необхідну для ефективних навчальних демонстрацій.

Окрім самого пристрою, команда ініціювала проект FrED Factory, переобладнавши старе складське приміщення в кампусі MIT на виробничий об'єкт. Ця нова установка включає 3D-принтери та інше необхідне обладнання для підтримки розробки та запланованого річного виробництва до 400 одиниць. Об'єкт також був організований таким чином, щоб включати належні інструменти та достатній складський простір, що забезпечує ефективну роботу та масштабованість виробництва Desktop FrED 2022. Цей стратегічний крок підтримує мету розширення практичної інженерної освіти в усьому світі, роблячи передові виробничі інструменти більш доступними та недорогими.

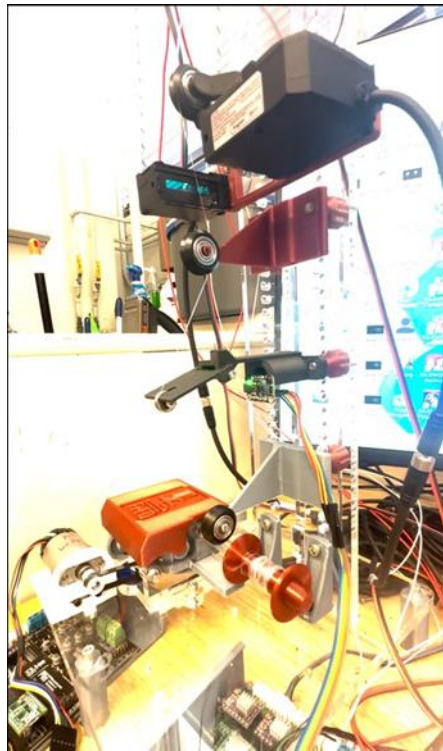


Рисунок 1.5 – Загальний вигляд настільного FrED, що використовувався у нашій роботі, демонструє датчик натягу та лазерний мікрометр.

Системи керування такого типу зазвичай були розгорнуті на настільному комп'ютері FrED. Фундаментальна робота Девіда Кіма у

співпраці зі Sterlite, спрямована на підвищення точності та прецизійності процесів виробництва оптичного волокна, розпочалася з його фундаментальної статті про проектування та виготовлення настільного комплексу для виробництва оптичного волокна для освітніх цілей. Цей комплект, відомий як FRED, ефективно відтворював промисловий процес виробництва оптичного волокна в меншому масштабі, виконуючи кілька цілей: він забезпечував глибше розуміння процесу виробництва волокна, сприяв швидкому прототипуванню нових стратегій керування для екструзії волокна та слугував практичним навчальним інструментом для студентів, які вивчають керування та інтелектуальне виробництво (рис. 1.6).

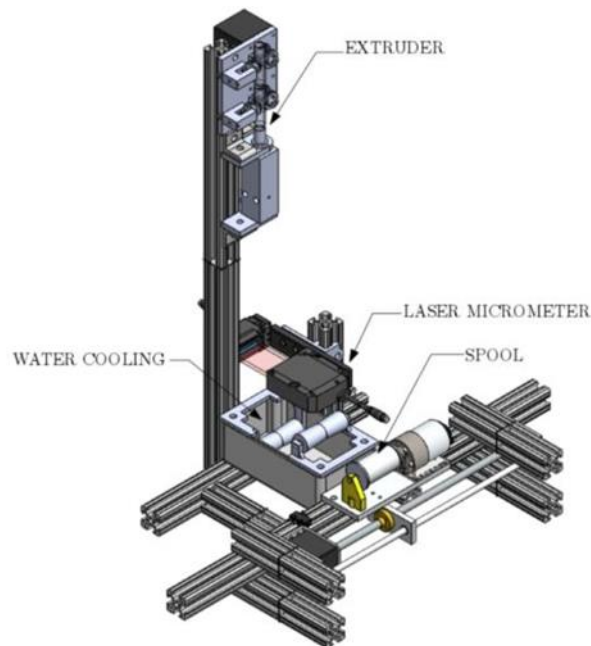


Рисунок 1.6 - CAD-модель застарілого дизайну FrED.

Система FrED складалася з чотирьох основних компонентів: екструдера, системи охолодження, котушки та датчиків. Основною роллю екструдера було нагрівання та застосування зусилля для екструдування філаменту, тоді як система охолодження була розроблена для швидкого охолодження волокна, щоб запобігти будь-якому прилипанню до поверхонь.

Система катушок відповідала за збір екструдованого волокна з контрольованою швидкістю обертання, що було вирішальним для контролю діаметра волокна. Датчики були стратегічно розташовані для контролю температури екструдера та інших критичних параметрів.

Інженерний підхід включав тестування пристрою з пропорційною системою керування зі зворотним зв'язком щодо посилення. Автор використав рівняння збереження маси для моделювання процесу виробництва волокна, що вплинуло на реалізацію пропорційного контролера посилення. Значення коефіцієнта посилення 0,5 призвело до похибки усталеного стану 0,01 мм та стандартного відхилення 0,061 мм, встановивши орієнтир продуктивності, який буде орієнтиром для подальших досліджень та публікацій, пов'язаних з цим проектом. Це початкове дослідження заклало основу для майбутніх досягнень у технології виробництва настільних волокон, підкресливши її потенціал як в освітніх, так і в промислових застосуваннях.

У наступній дослідницькій роботі, було розширено сферу механізмів керування пристроєм екструзії волокна шляхом включення методу глибокого навчання з підкріпленням (DRL). Цей передовий підхід дозволив контролеру адаптивно відстежувати динамічно змінний діаметр цілі під час процесу екструзії, що продемонструвало значний стрибок у стратегіях керування виробничими системами.

Було розгорнуто складну структуру DRL, використовуючи чотири мережі довгої короткочасної пам'яті (LSTM). Ці мережі склалися з двох пар мереж: актора та критика, а також з їхніх відповідних цільових мереж — цільового актора та цільового критика. Кожна пара відіграє вирішальну роль у процесі навчання та адаптації. Мережа акторів відповідає за пропонування дій на основі поточних вхідних даних про стан, які вона отримує, що безпосередньо впливають на операційні параметри системи. І навпаки, мережа критиків оцінює дію, запропоновану актором, шляхом оцінки «Q-

значення» – метрики, яка представляє очікувані майбутні винагороди за цю дію.

Механізм роботи системи поділено на три ключові підпроцеси: ініціалізація, потік керування та потік навчання. Під час ініціалізації мережі LSTM налаштовуються з початковими вагами та встановлюються базові параметри.

У потоці керування дані в режимі реального часу безперервно збираються датчиками системи, які контролюють різні аспекти процесу екструзії, такі як температура, натяг та діаметр. Ці дані відображають поточний стан системи, який мережа акторів використовує для розрахунку найбільш підходящої дії для наближення екструдера до цільового діаметра. Після виконання дії реакція системи оцінюється за допомогою оновлених показників датчиків, і винагорода розраховується на основі відхилення від цільового діаметра та інших показників операційної ефективності. Ці спостереження, дії та отримані винагороди потім зберігаються у структурованому масиві історичної пам'яті H , що сприяє створенню багатого набору даних для навчання мережі (рис. 1.7).

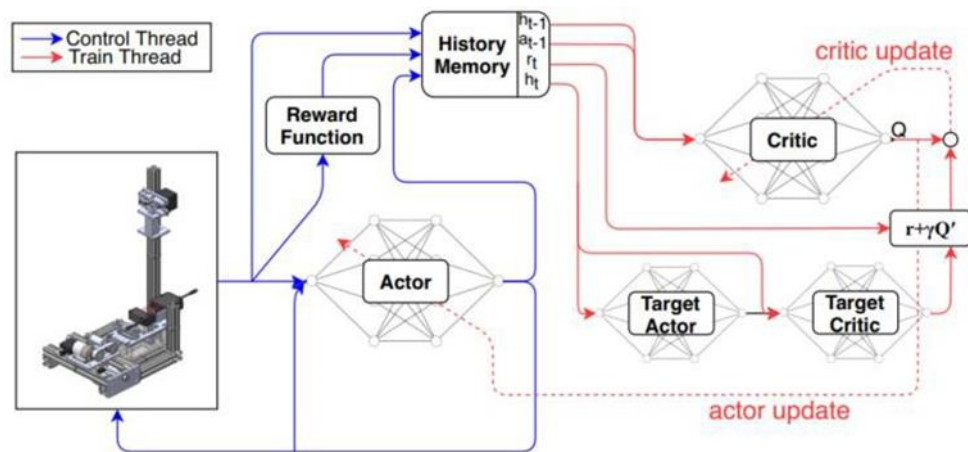


Рисунок 1.7 - Алгоритм навчання системи керування настільним екструдером.

Тим часом, у навчальному потоці, система DRL покращує свою продуктивність завдяки безперервному навчанню. Міні-партія досвіду періодично вибірково вибирається з історичної пам'яті H . Ця партія використовується мережею критика для обчислення Q -значень, які є оцінками очікуваних винагород від виконання певної дії в заданому стані. Ці обчислені Q -значення потім порівнюються з цільовими значеннями, що періодично оновлюються з цільових мереж, які трохи відстають від первинних мереж, щоб забезпечити стабільні цілі під час навчання. Розбіжність між обчисленими Q -значеннями та цільовими значеннями мінімізується за допомогою зворотного поширення, що ефективно підвищує точність оцінки критика. Одночасно мережа акторів коригується для максимізації Q -значення, ближче узгоджуючи запропоновані дії з оптимальними траєкторіями керування (рис. 1.8).

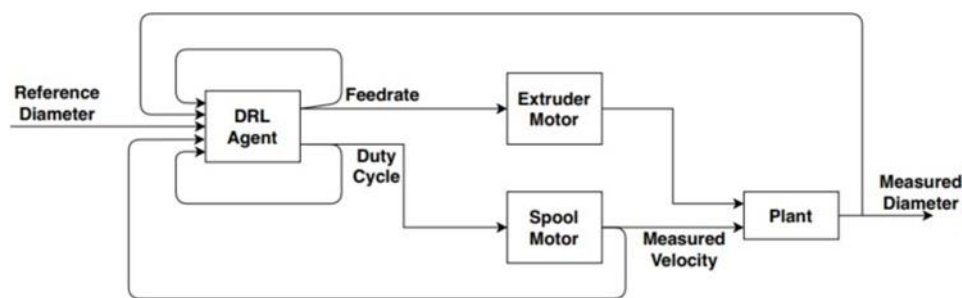


Рисунок 1.8 - Блок-схема системи керування глибоким навчанням з підкріпленням.

Рисунок 1.8 візуально інкапсулює загальну архітектуру алгоритму навчання, ілюструючи взаємодію між мережами актора, критика, цільового актора та цільового критика, а також їхні ролі в циклі безперервної адаптації.

Рисунок 1.9 надає детальну блок-схему системи керування глибоким навчанням з підкріпленням, що виділяє операційний потік від вхідних даних датчиків до вихідних даних дій, що базується на динамічній взаємодії між потоками керування та навчання, які разом покращують точність та адаптивність процесу екструзії волокна. Ця вдосконалена система керування

не лише демонструє застосування DRL у промислових процесах, але й встановлює новий стандарт для розумних виробничих практик в екструзії волокна та потенційно в інших галузях виробництва.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Система контролю натягу волокна для екструзії

Для покращення контролю над діаметром волокна в настільному пристрої для екструзії волокна (FrED) інтеграція датчика натягу стала ключовим удосконаленням. У попередніх ітераціях FrED цей компонент був відсутній, що обмежувало точність, з якою система могла регулювати процес екструзії. Давачі натягу відіграють вирішальну роль у контролі механічного напруження, що діє на волокно, забезпечуючи важливий зворотний зв'язок для коригування параметрів процесу для підтримки бажаних характеристик волокна.

Комерційно доступні датчики натягу, хоча й ефективні, часто є непомірно дорогими, зазвичай коштуючи близько 1000 доларів США [16]. Щоб вирішити цю проблему та зробити установку більш доступною та економічно ефективною, було представлено нову конструкцію з використанням комбінації торсійної пружини та давача часу прольоту VL530LX, загальною вартістю всього 7 доларів США. Такий підхід значно знижує фінансовий бар'єр для впровадження передових технологій датчиків в освітніх та невеликих промислових установах.

Давач натягу замінює традиційний тензодатчик механізмом торсійної пружини. Основна робота цього датчика включає кілька ключових кроків:

1. Прикладання сили: Коли волокно проходить через шків, воно прикладає силу до важеля, з'єданого з торсійною пружиною. Величина прикладеної сили залежить від натягу волокна.
2. Вимірювання зміщення: ДатчикToF, стратегічно розташований, фіксує, наскільки сильно зміщується важіль волокном. Це зміщення є прямим результатом натягу, що створюється рухомим волокном.

3. Розрахунок кутового зміщення: Використовуючи геометрію системи, визначається зміна кута плеча, викликана натягом волокна. Торсійна пружина забезпечує відновлювальну силу, яка протидіє цьому зміщенню.

4. Розрахунок сили: Зміна кута, що визначається датчиком, допомагає розрахувати силу, що діє на волокно торсійною пружиною. Ця сила пропорційна зміщенню та жорсткості пружини.

5. Визначення натягу: З розрахункової сили, що діє пружина, визначається натяг у самому волокні. Це вимірювання є критично важливим, оскільки воно впливає на якість та властивості екструдованого волокна.

6. Зворотний зв'язок для оптимізації процесу: Дані про натяг потім передаються назад у систему керування FrED. Цей цикл зворотного зв'язку має вирішальне значення для регулювання таких параметрів, як швидкість екструзії та швидкість охолодження, з метою оптимізації якості волокна.

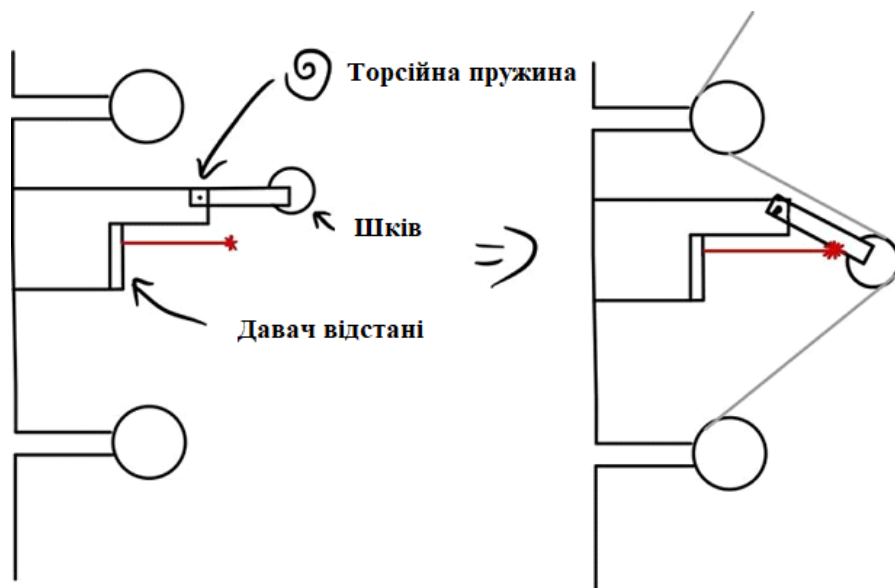


Рисунок 2.1 - Основні принципи роботи давача натягу.

Тримач шківа розроблений для ефективної підтримки цієї розширеної функціональності. Він має круглий тримач, через який проходить гвинт з

буртиком, що діє як точка повороту, так і як надійне кріплення для шківів. Таке розташування дозволяє шківу вільно обертатися, сприяючи плавному проходженню волокна. Опорний шток тримача виготовлений якомога тоншим, що максимізує простір для шляху волокна, забезпечуючи водночас доступність та ефективність роботи системи шківів.

Завдяки інтеграції цих механічних та електронних удосконалень, оновлена система FrED не лише покращує точність контролю діаметра волокна, але й є прикладом економічно ефективного підходу до інтеграції передових сенсорних технологій у виробничі системи. Така схема не лише розширює функціональність пристрою, але й сприяє ширшому впровадженню в освітніх установах, де бюджетні обмеження часто обмежують доступ до високотехнологічного обладнання.

Спочатку в конструкції датчика натягу використовувалася плоска основа, як показано на рисунку. Ця конфігурація була обрана через її простоту та легкість складання. Однак незабаром стало очевидним, що така конструкція створює значні проблеми з точки зору точності та легкості виконання геометричних розрахунків, критично важливих для вимірювання натягу (рис. 2.2). Плоска основа не забезпечувала необхідної стабільності або точного вирівнювання, необхідного для оптимального функціонування датчика часу прольоту (ToF).



Рисунок 2.2 - Конструкція першого давача натягу

Щоб подолати ці проблеми, конструкцію було переглянуто, включивши видовжену основу-стовпчик. Ця модифікація мала на меті підвищити структурну стабільність та покращити вирівнювання датчика відносно шляху волокна. Видовжена основа також сприяла точнішим кутовим вимірюванням, які є важливими для датчика ToF для точного розрахунку зміщення, спричиненого натягом у волокні.

Процес удосконалення бази включав кілька ітерацій. Кожна ітерація мала на меті оптимізувати кут падіння та відстань між датчиком ToF та точкою, де волокно чинило силу на вимірювальний кронштейн. Ці параметри є критично важливими, оскільки вони безпосередньо впливають на здатність датчика точно вимірювати переміщення.

Для вдосконалення конструкції було використано наступні дизайнерські рішення.

1. Підвищена стабільність. Подовжена основа забезпечила стабільнішу платформу для встановлення датчика, зменшуючи вібрації та рухи, які могли призвести до помилок вимірювання.

2. Покращене вирівнювання давачів. Розширюючи основу, можна точно регулювати вирівнювання датчика ToF відносно шляху волокна. Правильне вирівнювання є критично важливим для забезпечення точного виявлення датчиком переміщення важеля.

3. Точні геометричні розрахунки. Нова конструкція основи дозволила виконувати простіші та точніші геометричні розрахунки. Збільшена довжина колони основи полегшила краще розуміння кутів, утворених натягом волокна, що є вирішальним для перетворення даних датчика на змістовні значення натягу.

4. Ітеративне тестування дизайну. Кожна ітерація проектування була ретельно протестована для перевірки геометричних розрахунків та функціональності датчика ToF. Цей ітераційний процес був важливим для

забезпечення того, щоб кожне коригування проекту позитивно вплинуло на загальну точність та надійність давача натягу.

Завдяки цим удосконаленням функціональність датчика натягу була значно покращена, що зробило його надійнішим і точнішим інструментом для вимірювання натягу волокна в настільному пристрої для екструзії волокон (FrED). Цей процес розробки підкреслює важливість ітеративного проектування та тестування для досягнення добре каліброваної та ефективної системи вимірювання.

2.2. Оптимізація системи контролю натягу та вдосконалення її точності.

Конструкція датчика натягу пройшла кілька ітерацій, кожна з яких була спрямована на вдосконалення функціональності та точності системи перед остаточним визначенням оптимальної конфігурації. Основною метою цих ітерацій проектування було забезпечення точного визначення геометричних параметрів, необхідних для розрахунку натягу, що дозволило б миттєво отримувати точні та надійні дані про натяг.

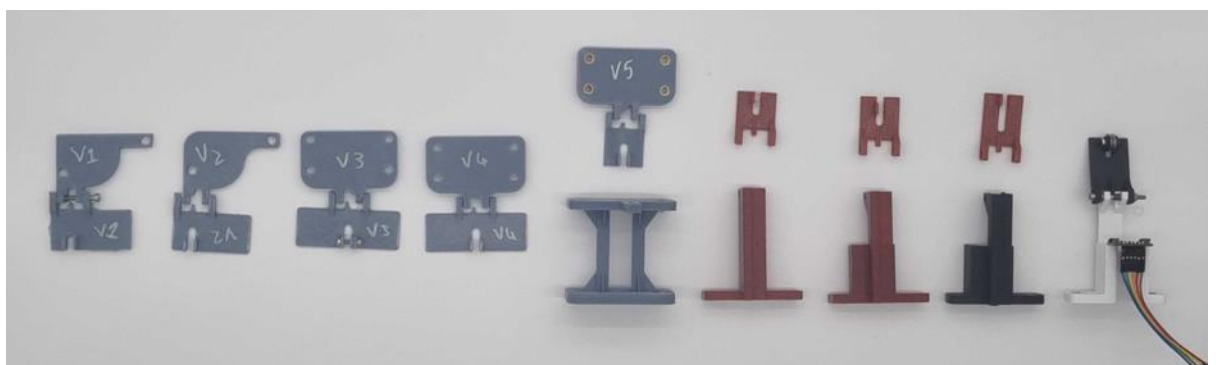


Рисунок 2.3 - Покращення дизайну в різних версіях

Ключові технічні вдосконалення:

1. Уточнення геометричних кутів У остаточному проекті ретельно визначено всі кути, що використовуються в геометричних розрахунках. Ця ясність була вирішальною для забезпечення не лише точності, але й постійної відтворюваності вимірювань натягу. Правильно визначені кути допомогли точно розрахувати силу, що створюється торсійною пружиною, на основі зміщення, виміряного датчиком, що безпосередньо впливало на точність показників натягу.

2. Вирішення проблем з точністю датчиків Спочатку конструкція зіткнулася з труднощами точного зчитування відстаней за допомогою датчика наближення. Ця проблема була критичною, оскільки неточності у вимірюваннях відстані могли призвести до значних помилок у розрахунку натягу. Завдяки ретельному налаштуванню розташування датчика та, можливо, вдосконаленню інтерфейсу датчика, конструкцію було оптимізовано для забезпечення більш надійних та точних показників відстані. Це вдосконалення було життєво важливим для забезпечення того, щоб вимірювання натягу відображали справжні механічні напруження на волокні.

3. Оптимізація для технологічності Поряд із підвищенням точності вимірювання, конструкцію також було оптимізовано для технологічності. Це означало спрощення процесу складання, зменшення кількості компонентів та вибір матеріалів, які були б простими в обробці, довговічними та економічно ефективними. Такі зусилля з оптимізації скоротили загальний час виробництва, тим самим підвищивши можливість виробництва датчика у більших масштабах. Такий підхід не лише зробив пристрій доступнішим, але й забезпечив його ефективне відтворення без шкоди для якості.

4. Ефективність збору даних Завдяки оптимізації вимірювань кутів та відстані система змогла ефективніше збирати дані про натяг. Ця ефективність була надзвичайно важливою для обробки в режимі реального

часу та отримання зворотного зв'язку в застосунках, де необхідні коригування.

Процес екструзії потрібно було виконувати швидко, щоб виправити або оптимізувати характеристики волокна.

Кульмінацією цих ітерацій проектування став давач натягу, який був не тільки точним і надійним, але й оптимізованим для ефективного виробництва та інтеграції в настільний пристрій для екструзії волокон (FrED). Кожна ітерація приносила покращення в технічні аспекти пристрою, від фізичної конструкції до електронної інтеграції, зрештою забезпечуючи виняткову ефективність датчика за експлуатаційних вимог екструзії волокон. Цей процес розробки підкреслює важливість ітеративного проектування та цілеспрямованих удосконалень для досягнення високопродуктивного та комерційно життєздатного продукту (рис. 3.4, 3.5).



Рисунок 3.4 - Остаточний проект давача натягу.

Використання давача натягу в настільному пристрої для екструзії волокна (FrED) дозволило отримати комплексний збір даних щодо діаметра, швидкості намотування та натягу протягом тривалого періоду. Цей збір даних сприяв детальному аналізу робочої динаміки пристрою, зокрема взаємодії цих змінних з часом.

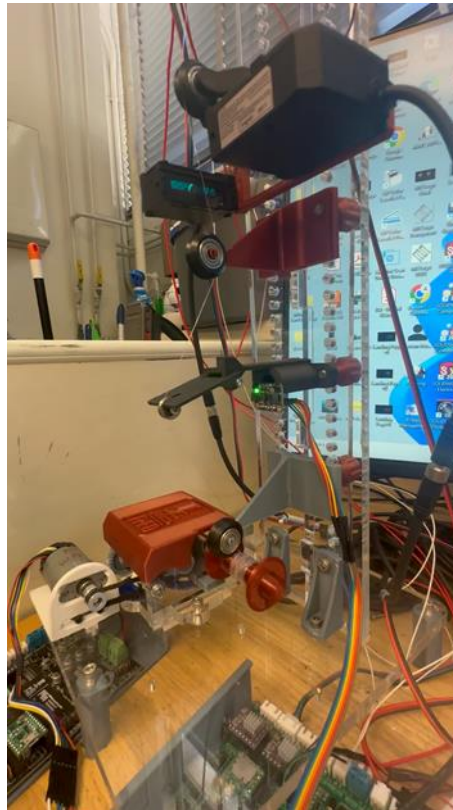


Рисунок 3.5 - Зображення, що показує положення датчика натягу на FrED.

Детальні спостереження та стратегія контролю:

1. Задане значення та ПІД-регулювання Діаметр волокна підтримувався на попередньо визначеному рівні. Це значення було вирішальним, оскільки воно диктувало регулювання швидкості намотування за допомогою системи пропорційно-інтегрально-диференціального (PID) керування. PID-контролер динамічно регулював швидкість намотування, щоб підтримувати діаметр на заданому рівні. Таке регулювання в режимі реального часу забезпечувало стабільність розмірів волокна, що відповідали вимогам якості та специфікацій.

2. Моніторинг напруги Натяг у різних точках ретельно спостерігався разом із регулюванням швидкості намотування. Ці дані були вирішальними для розуміння того, як зміни швидкості намотування впливають на механічне

напруження волокна. Кожна точка даних про натяг була записана, що забезпечувало багатий набір даних для аналізу.

3. Візуалізація та аналіз даних Для подальшого дослідження зв'язку між швидкістю намотування та натягом було нанесено 100 точок даних, що представляють ці змінні.

Це візуальне представлення допомогло виявити тенденції та аномалії у взаємозв'язку (рис. 2.6).

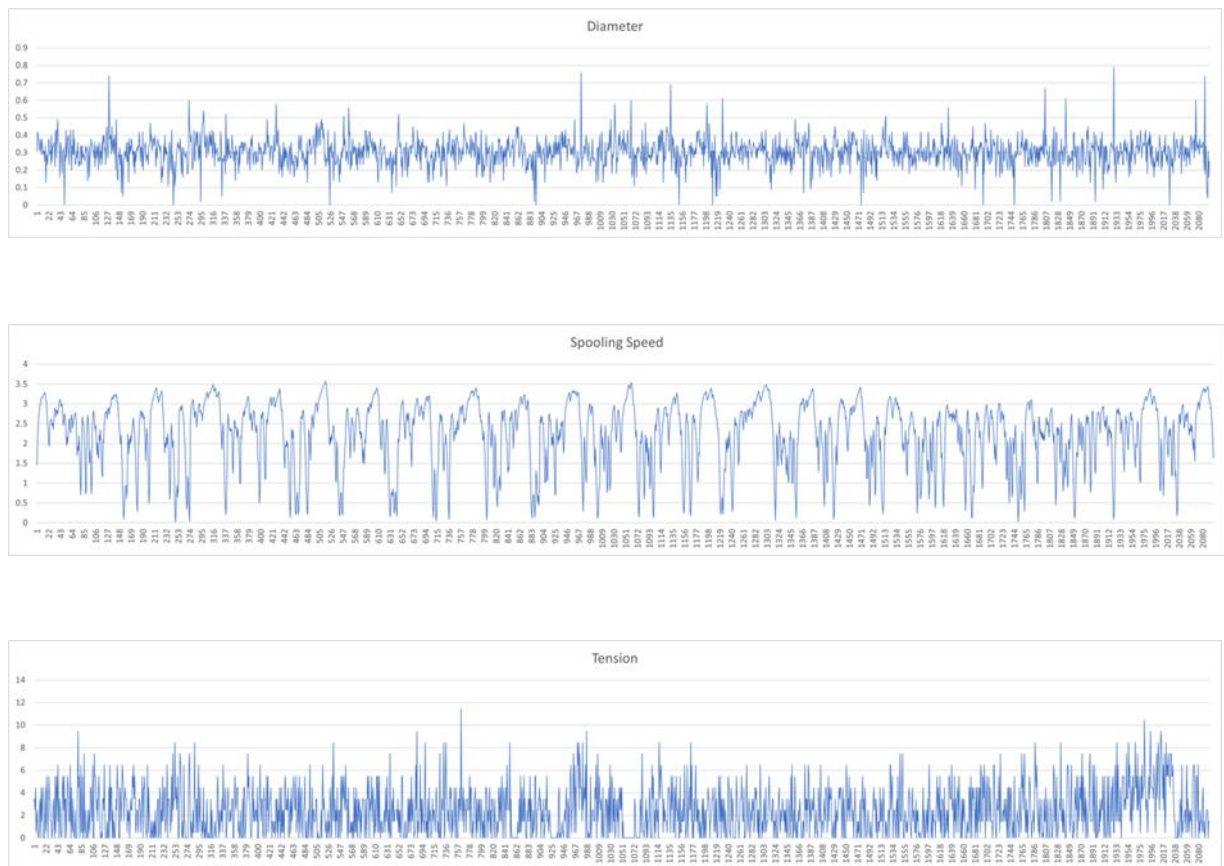


Рисунок 2.6 - Візуальне представлення тенденцій та аномалій, відзначених під час експериментів.

Цікаво, що аналіз показав, що зменшення швидкості намотування корелює зі збільшенням натягу в певних місцях вздовж шляху намотування. Це спостереження суперечило нашій початковій гіпотезі, яка передбачала пряму пропорційну залежність між швидкістю намотування та натягом.

Презентація результатів впровадження:

Дані та їх значення проілюстровано на кількох рисунках нижче. Ці рисунки наочно відображають тенденції та аномалії, виявлені під час експериментів. Побудувавши графік залежності між швидкістю намотування та натягом, ми змогли візуально підтвердити неочікувану поведінку системи у відповідь на зміни робочих параметрів.

Результати, підкреслюють складний баланс, необхідний у процесі намотування, та важливість точних механізмів керування для підтримки оптимального натягу та швидкості. Отримані результати спростовують попередні припущення та сприяють глибшому розумінню механічної динаміки, пов'язаної з екструзією волокна.

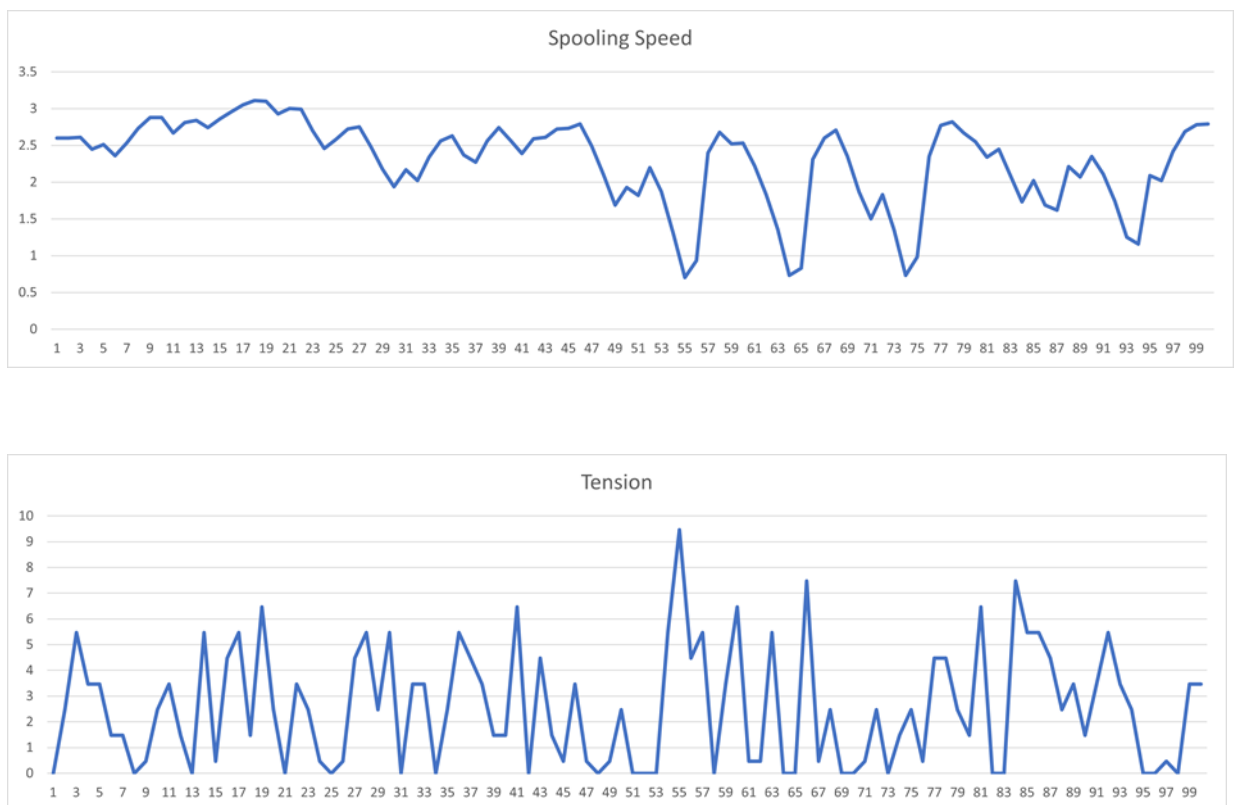


Рисунок 3.7 - Візуальне представлення тенденцій та аномалій, відзначених під час експериментів для 100 випадкових точок даних.

Цей детальний збір та аналіз даних не лише дають уявлення про фундаментальні операції FrED, але й підкреслюють цінність моніторингу та контролю в режимі реального часу у виробничих процесах. Зроблені спостереження мають значне значення для розробки більш складних стратегій контролю та для підвищення загальної ефективності та якості процесу екструзії волокна.

3 КОСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Розробка пристрою для екструзії волокон

Настільний пристрій для екструзії волокон (FrED) є вертикального типу, який проводить процес витягування оптоволокна методом екструзії. Загальний вигляд такого пристрою показано на рис. 3.1.

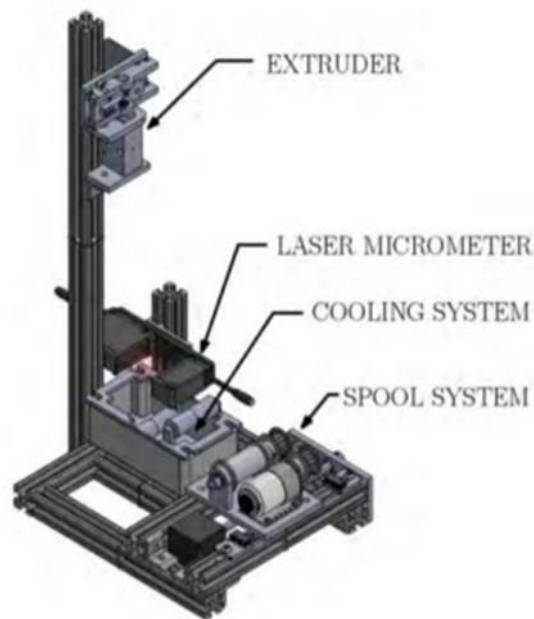


Рисунок 3.1 - Настільний пристрій для екструзії волокон

Аналогічно до вежі для виробництва оптичного волокна, преформа (клеювий олівець) нагрівається за допомогою нагрівального елемента, як показано на рисунку 3.2, а потім преформа проштовхується через нагрівальний елемент за допомогою крокового двигуна. Нагріте волокно потім проходить через систему охолодження, а потім збирається на котушці, яка приводиться в рух двигуном постійного струму. Двигун постійного струму розміщений на каретці, яка рухається осьово, розподіляючи зібране волокно по всій котушці, а межі руху каретки контролюються кінцевими вимикачами. Діаметр виготовленого волокна вимірюється лазерним

мікрометром і використовується як вхідний сигнал для замкнутого контуру керування зворотним зв'язком.

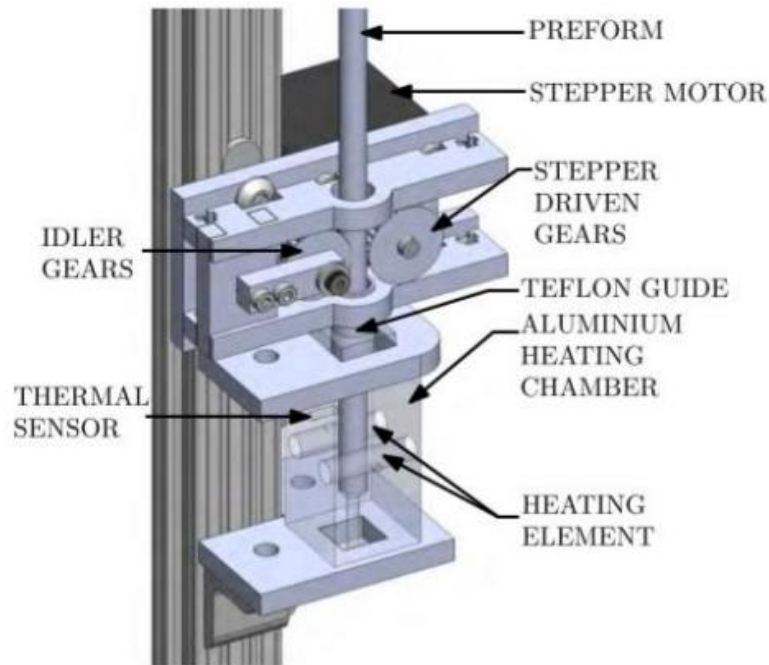


Рисунок 3.2 - Екструзійна система Фреда

FrED використовував кілька датчиків для вимірювання різних параметрів та створення петлі зворотного зв'язку, яка контролює діаметр системи. Петля зворотного зв'язку, показана на рис. 3.3, де вихідний сигнал пропорційно-інтегрального (ПІ) контролера, який використовується для керування швидкістю обертання двигуна котушки, базується на похибці відношення виміряного діаметра до цільового діаметра волокна. Крім того, система керувалася за допомогою скрипта Arduino, що моделює простий контролер із замкнутим циклом.

В рамках поточного проекту зі Sterlite щодо розгортання моделі машинного навчання, розробленої для їхньої вежі для витяжки оптичного волокна, на промисловому ПЛК для автоматичного керування процесом екструзії та підтримки постійного діаметра волокна, FrED використовується

як перевірка концепції процесу розгортання. У наступному розділі детально описано процес підключення різних компонентів та елементів FrED до ПЛК.

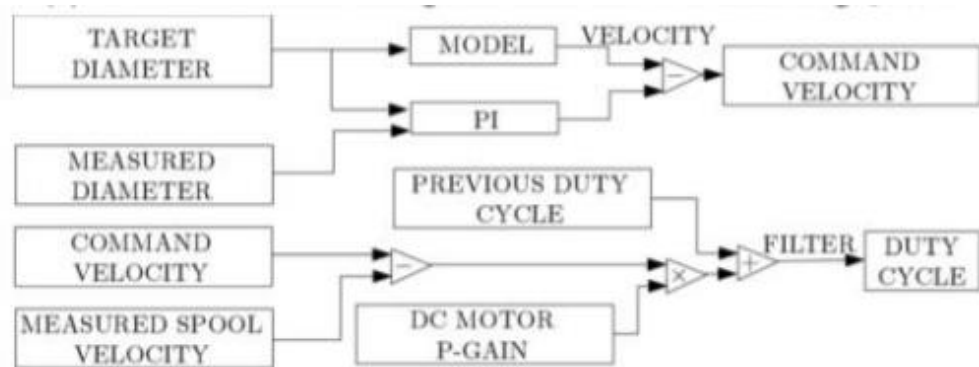


Рисунок 3.3 - Контролер зворотного зв'язку пристрою для екструзії ВОЛОКОН

3.2. Керування настільним екструдером за допомогою ПЛК.

Протягом цього дослідницького проєкту для керування FrED використовувався промисловий ПЛК CompactLogix 5380 компанії Allen-Bradley. CompactLogix 5380 показано нижче на рис. 3.4-3.7.

Цей ПЛК — це автономний контролер, що постачається з шасі, на якому інші модулі можуть бути підключені до ПЛК через об'єднувальну панель або через складніші системи з пристроями, підключеними до нього через мережу EtherNet. ПЛК контролюється та керується за допомогою власного програмного забезпечення Studio 5000™ та підключається до ноутбука або настільного комп'ютера через з'єднання EtherNet у нижній частині ПЛК.

До ПЛК CompactLogix 5380 підключено 4 модулі, а саме: модуль входу постійного струму 5069-IB16F, модуль виходу постійного струму 5069-OB16F, модуль лічильника та модуль аналогового входу 5069-IY4.



Рисунок 3.4 - ПЛК CompactLogix 5380 від Allen-Bradley.

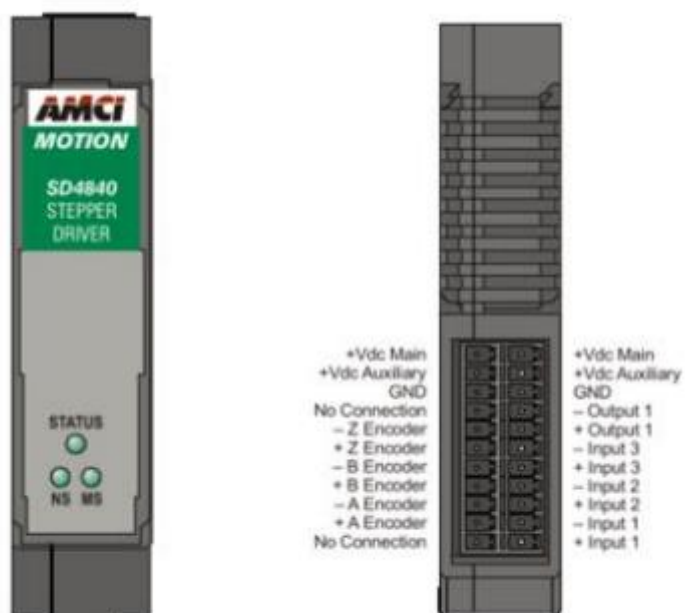


Рисунок 3.5 - Передня та задня панелі драйвера крокового двигуна AMCI.

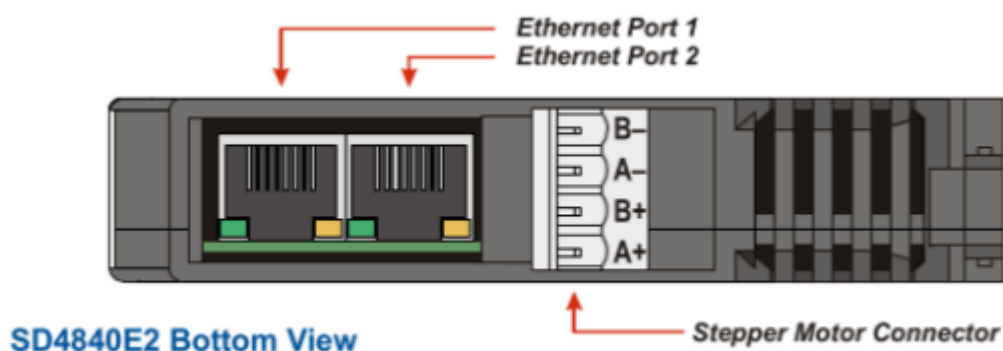


Рисунок 3.6 - Вигляд знизу драйвера крокового двигуна AMCI.

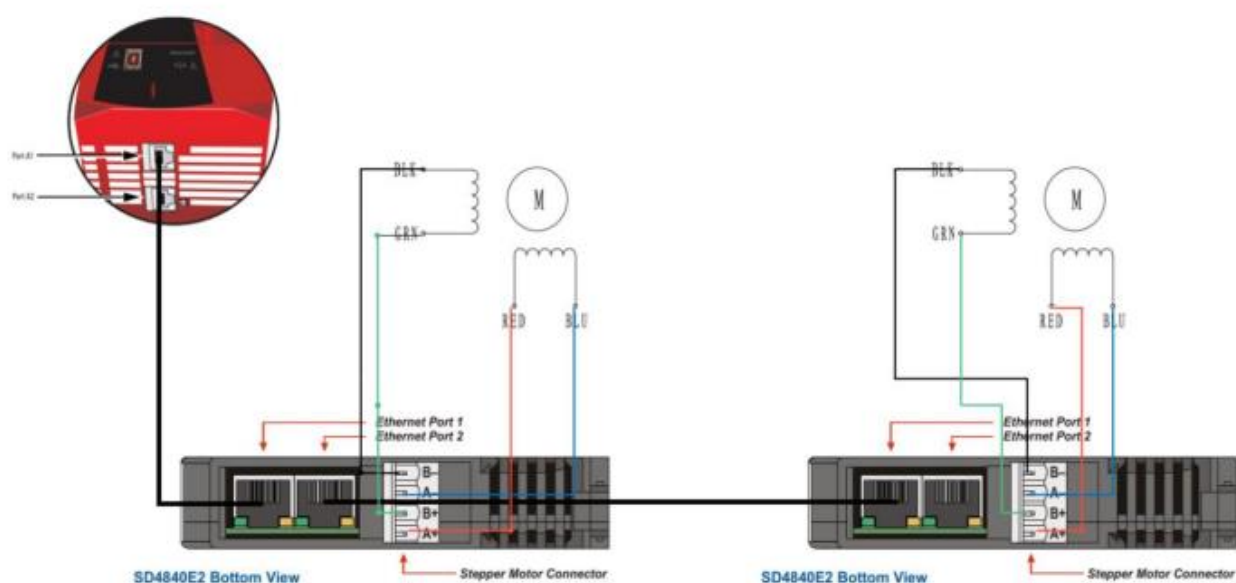


Рисунок 3.7 - Підключення крокових двигунів до драйверів AMCI.

3.3. Під'єднання нагрівальних елементів до ПЛК.

Нагрівач, який використовується для нагрівання преформи (клей-олівця) для створення профілю «шийка вниз» для виготовлення волокна, використовує два внутрішні нагрівальні елементи. Для підключення двох нагрівальних елементів до ПЛК використовувалися дві плати подвійного високопотужного керування LGDehome 5V – 36V. Дві плати живилися від зовнішнього джерела живлення, а їхній вихід був підключений до

відповідних нагрівальних елементів. Використана плата показана нижче на рис. 3.8.

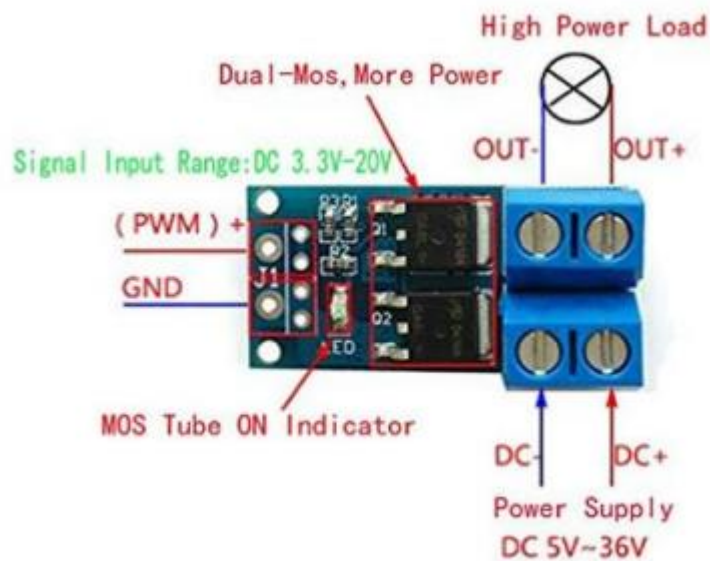


Рисунок 3.8 - Плата високопотужного приводу LGDehome

Сигнал широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що надходить на плату, за допомогою якого сигнал надсилається на нагрівальний елемент і нагрівається клейовий олівець, контролюється модулем виходу постійного струму ПЛК. Електричні схеми з'єднання між нагрівальними елементами, платами приводів і ПЛК, а також програма Studio 5000, яка використовується для керування нагрівальними елементами, показані нижче на рис. 3.9 та 3.10 відповідно.

вимірювати температуру нагрівача, як показано на рис. 3.11 нижче. Червоним квадратиком позначено місце підключення до модуля.

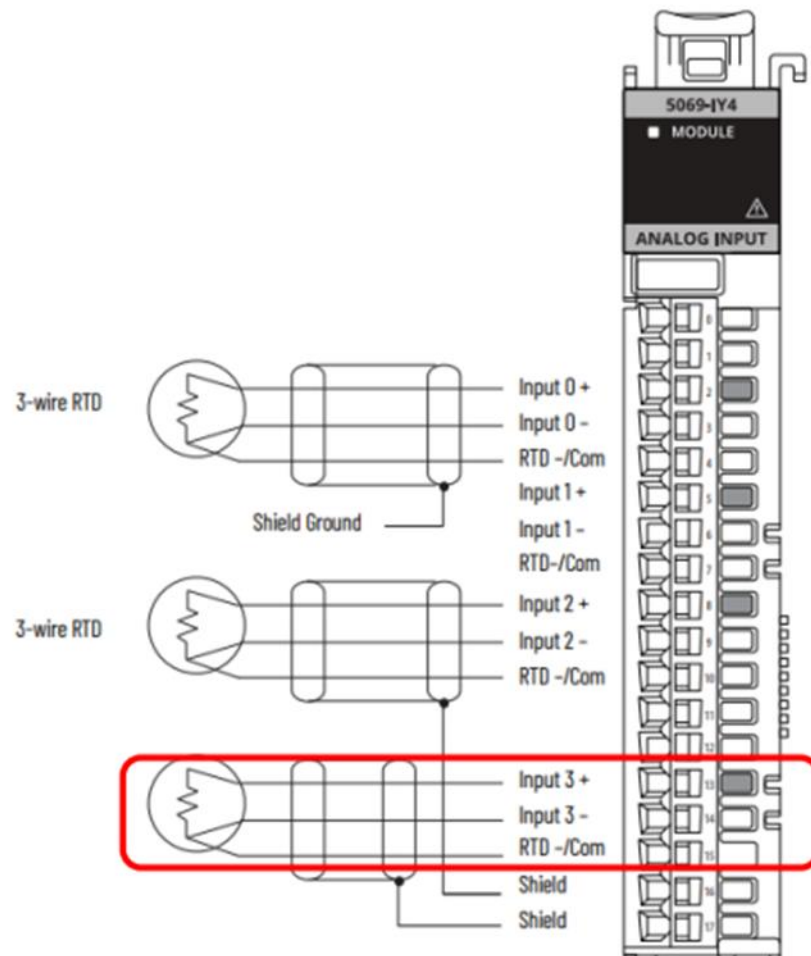


Рисунок 3.11 - Вхід нагрівального елемента до модуля аналогового входу на ПЛК.

3.4. Під'єднання двигуна постійного струму до ПЛК.

Двигун постійного струму, мотор-редуктор Polulu 37D Meatal, підключено до ПЛК за допомогою тієї ж плати LGDehome, що показана вище на рисунку 19, щоб ним можна було керувати через ПЛК за допомогою ШІМ-сигналів. Мотор-редуктор 37D постачається з енкодером, який не

потрібен для з'єднання між двигуном та ПЛК. Плата LGDehome отримує живлення для зовнішнього джерела живлення, а її вихід підключено до двигуна постійного струму, а ШІМ-сигнал надходить до модуля виходу постійного струму ПЛК. Електричне креслення для підключення

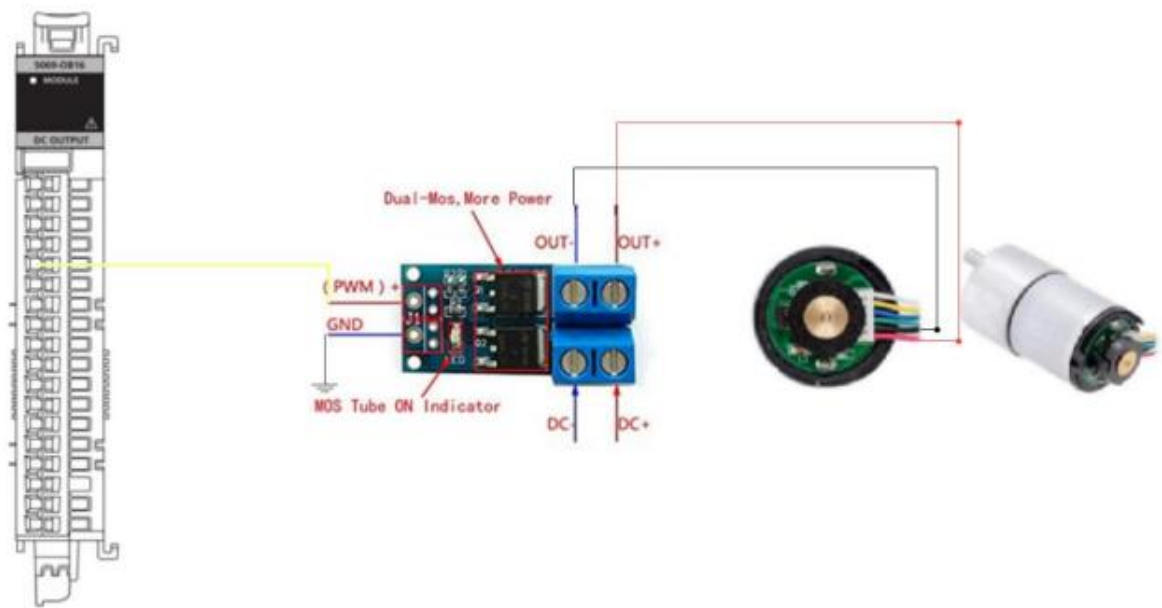


Рисунок 3.12 - Електрична схема підключення двигуна постійного струму до ПЛК.

Зв'язки між різними елементами та програмою Studio 5000, що використовується для керування двигуном постійного струму, показані нижче на рисунках 24 та 25 відповідно. Двигун постійного струму керується функціональним блоком SRTP (Split Range Time Proportional), який приймає вихідний сигнал 0-100% контуру ПІД-регулятора та керує вихідними контактами за допомогою періодичного сигналу.

3.5. Під'єднання лазерного мікрометра Keyence до ПЛК.

Головка лазерного мікрометра Keyence IG-028 у парі з підсилювальним блоком IG-1000 підключені до модуля аналогового входу на ПЛК. Підключення лазерного мікрометра 54 показано нижче на рисунку 26. Коричневий та синій дроти, що подають живлення на датчик, підключені до зовнішнього джерела живлення, а світло-синій дрід, який має аналоговий вихід + та аналоговий вихід GND, підключено до модуля аналогового входу ПЛК.

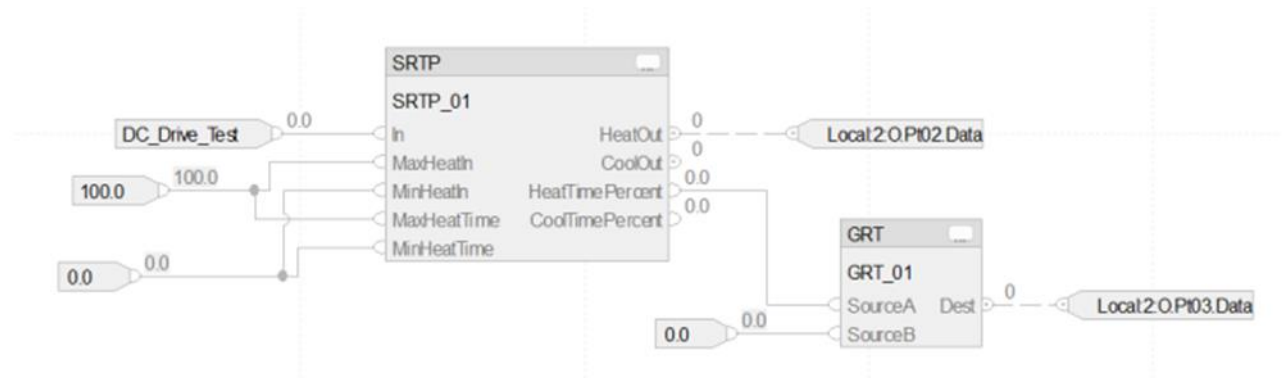


Рисунок 3.13 - Програма Studio 5000 для керування двигуном постійного струму.

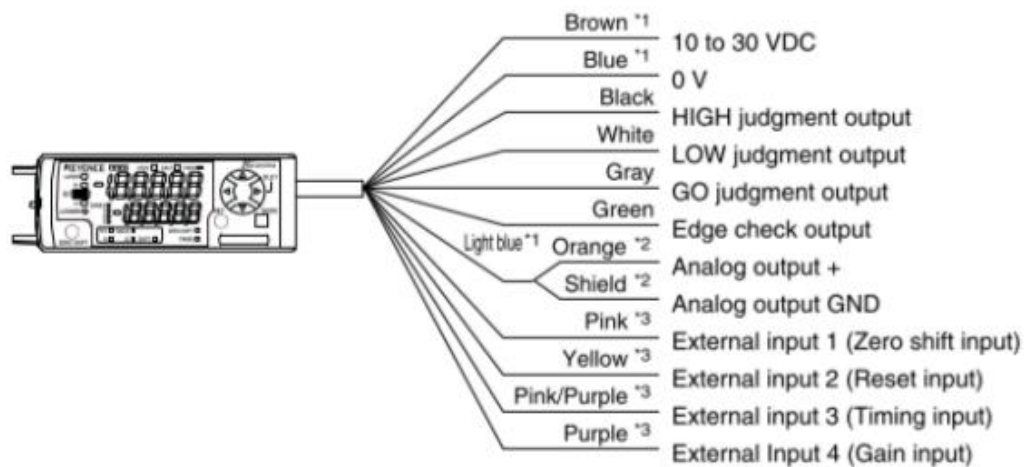


Рисунок 3.14 - Схема підключення лазерного мікрометра Keyence.

3.6. Під'єднання кінцевих вимикачів до ПЛК.

Два кінцеві вимикачі на FrED керують поступальним рухом каретки, яка перевозить котушку. Схема базового кінцевого вимикача показана на рисунку 27. Живлення від зовнішнього джерела живлення підключається до одного виводу кінцевого вимикача, а інший вивід підключається до вхідного модуля постійного струму ПЛК, як показано на рисунку 28. Вищеописаний процес повторюється для іншого кінцевого вимикача.

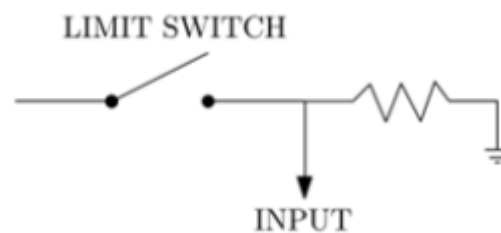


Рисунок 3.15 - Схема електричного кола кінцевого вимикача.

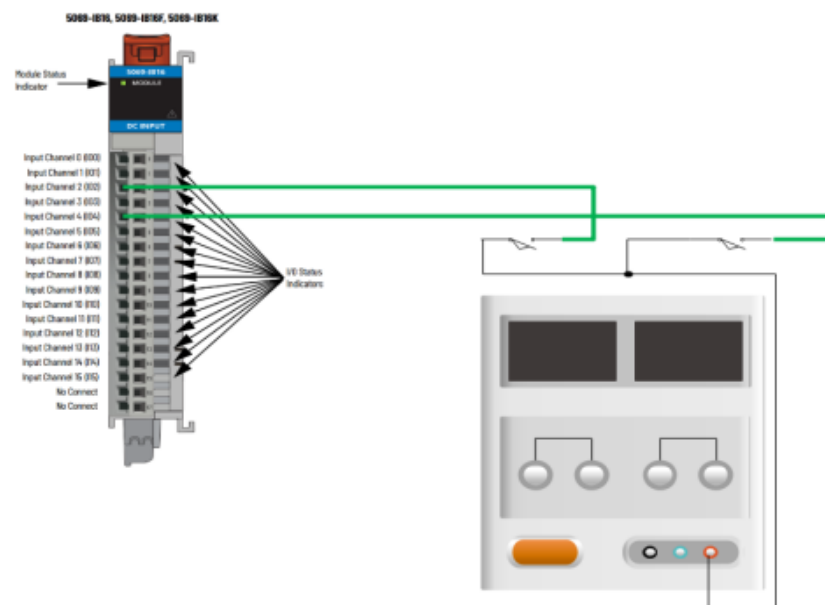


Рисунок 3.16 - Підключення кінцевих вимикачів до ПЛК.

Коли каретка досягає кінця свого руху та торкається кінцевого вимикача, кінцевий вимикач замикається, що надсилає сигнал напруги до ПЛК. ПЛК, відповідно, надсилає сигнал до драйвера крокового двигуна для зміни напрямку руху двигуна, щоб волокно могло бути зібране по всій довжині котушки. ПЛК з усіма з'єднаннями показано нижче на рис. 3.17.



Рисунок 3.17 - ПЛК з усіма підключеннями.

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

4.1 Розробка системи керування процесом натягу волокна

В ітеративному вдосконаленні настільного пристрою для екструзії волокон (FrED) значним прогресом стало включення складної системи керування із зворотним зв'язком у замкнутому циклі. Ця система ретельно розроблена для регулювання діаметра екструдованого волокна, забезпечуючи дотримання заданої геометричної точності. Нижче описано архітектуру керування із замкнутим циклом, реалізовану в системі FrED (рис. 4.1).

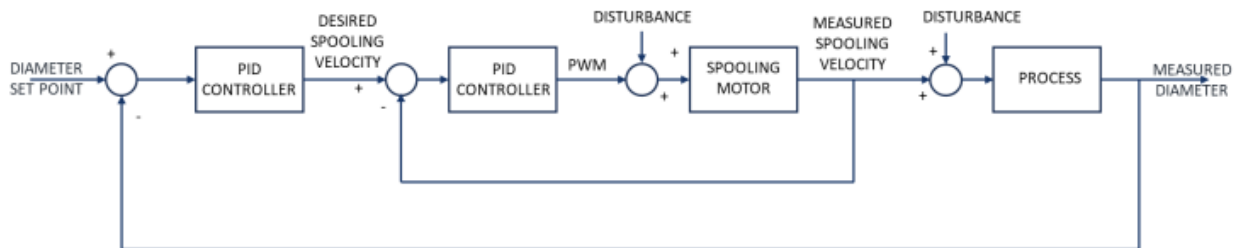


Рисунок 4.1 - Діаграма керування зі зворотним зв'язком реалізованого ПІД-керування для FrED.

Задане значення діаметра. На початку циклу керування знаходиться «Задана точка діаметра», яка визначається бажаними характеристиками діаметра волокна. Цей цільовий показник є критично важливим для забезпечення відповідності виробленого волокна суворим стандартам, необхідним для його цільового застосування.

Виявлення помилок. Невід'ємною частиною процесу керування є механізм виявлення помилок, який функціонує як компаратор. Він послідовно вимірює відхилення між «Заданим значенням діаметра» та «Вимірним діаметром», забезпечуючи кількісну оцінку розбіжності, відому як «сигнал помилки».

Алгоритм керування. Після отримання сигналу помилки спрацьовує алгоритм керування в мікроконтролері системи. Використовуючи стратегії пропорційно-інтегрально-диференціального (PID) керування, алгоритм обчислює необхідні коригувальні дії для зменшення відхилення діаметра.

Система виконавчих механізмів. Після прийняття рішення про керування, система керування, яка може включати крокові двигуни, нагрівальні елементи або регулятори натягу, впроваджує коригувальні заходи. Ці коригування точно налаштовуються для впливу на параметри екструзії, що безпосередньо впливає на діаметр волокна.

Процес екструзії. Центральним у системі є процес екструзії волокна — перетворення сировини на волокно заданого діаметра. Саме на цьому етапі вступають у дію фізичні зміни, що здійснюються системою керування, маніпулюючи динамікою екструзії для узгодження діаметра волокна із заданим значенням.

Сенсорний зворотний зв'язок. Вирішальним фактором для циклу зворотного зв'язку є включення високоточного датчика. Цей датчик безперервно контролює діаметр волокна після екструзії та передає ці дані назад на етап виявлення помилок, тим самим завершуючи цикл зворотного зв'язку.

Цикл зворотного зв'язку. Дані, отримані в режимі реального часу в результаті вимірювання діаметра, повертаються назад у систему керування, що дозволяє здійснювати постійне динамічне коригування. Цей механізм зворотного зв'язку є стрижнем системи, що сприяє процесу самокорекції, який гарантує, що діаметр волокна залишається в межах заданих рівнів допуску.

Вбудована у FrED, ця система керування із замкнутим циклом зворотного зв'язку являє собою вершину інженерії керування процесами. Вона дозволяє контролювати та регулювати параметри екструзії в режимі реального часу, тим самим підтримуючи постійний діаметр волокна. Таке

автоматизоване керування є важливим у галузі, де розмірна точність безпосередньо впливає на характеристики матеріалу, і свідчить про подальший розвиток автоматизації у виробничих технологіях. Система не лише оптимізує якість продукції, але й підкреслює перехід до інтелектуальних виробничих систем як в академічних, так і в промислових умовах.

4.2. Аналіз внутрішнього циклу ПІД-регулятора на швидкість барабанної обробки

Впровадження внутрішнього пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) контуру керування швидкістю намотування настільного екструзійного пристрою для волокна (FrED) мало на меті підвищити точність і стабільність процесу намотування. Тут ми аналізуємо вплив ПІД-контролера на швидкість намотування, порівнюючи її з продуктивністю за базових налаштувань керування з використанням постійного сигналу широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Цей аналіз підтверджується детальними графіками, що ілюструють зміни швидкості за різних налаштувань керування.

Налаштування керування та спостереження:

1. Без ПІД-регулювання (рис. 4.2).
 - Стратегія контролю: Постійний ШІМ-сигнал 30/255.
 - Спостережувана продуктивність Середня зафіксована швидкість намотування становила 2,06 обертів за секунду (об/с) зі стандартним відхиленням 0,06 об/с. Ця дисперсія вказує на відносно більше коливання швидкості, що свідчить про те, що процес намотування за цього методу керування менш стабільний і передбачуваний.

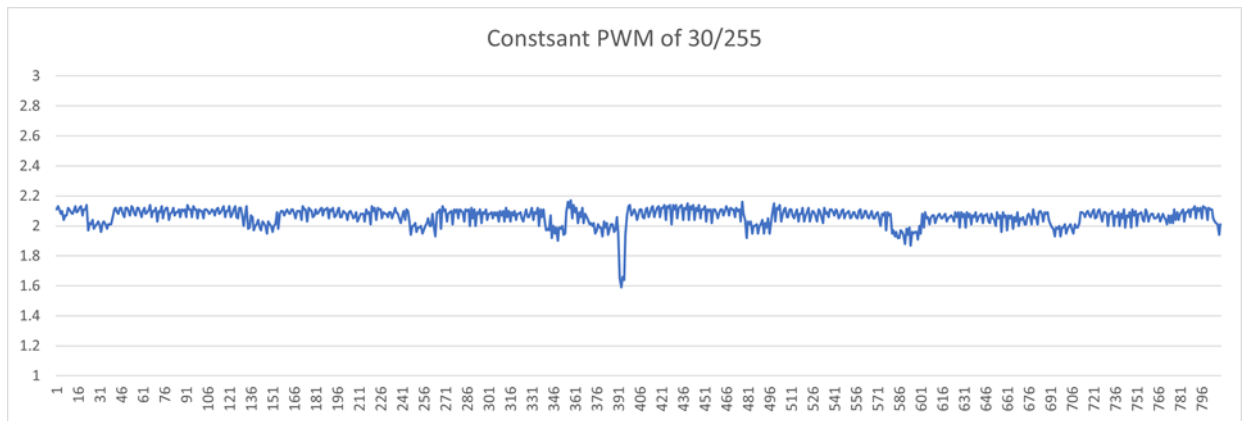


Рисунок 4.2 - Швидкість на різних часових мітках при постійному ШІМ 30.

2. З ПІД-регулюванням (задане значення 2 RPS, рис. 4.3):

- Стратегія контролю ПІД-регулятор було налаштовано на підтримку заданого значення 2 обертів за секунду.

- Спостережувана продуктивність Під PID-регулюванням середня швидкість точно відповідала заданому значенню 1,99 об/с, а стандартне відхилення значно зменшилося до

0,03 RPS. Це покращення стандартного відхилення підкреслює підвищену стабільність і точність, що забезпечується ПІД-контролером.

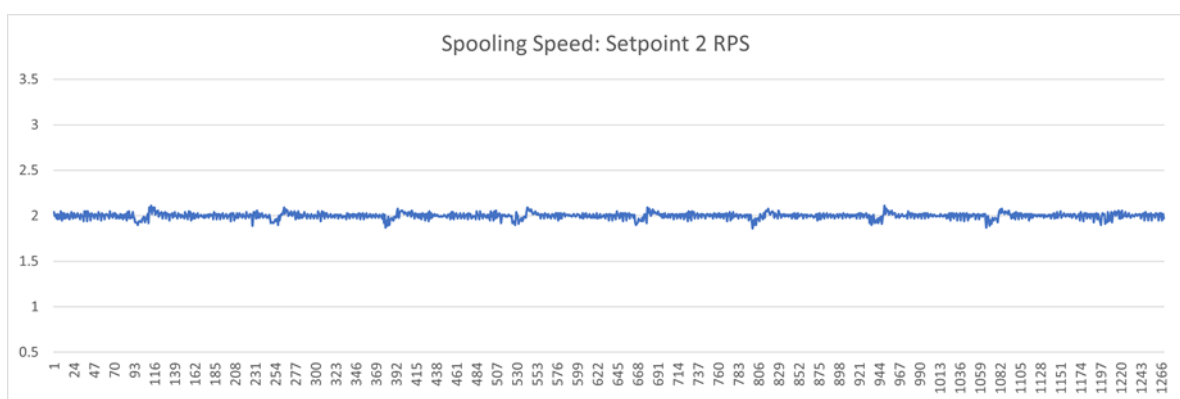


Рисунок 4.3 - Швидкість на різних мітках часу при заданій точці 2 RPS.

3. З ПІД-регулюванням (задане значення 1,5 об/с, рис. 4.4):

- Стратегія контролю ПД-регулятор було налаштовано на нижчу уставку 1,5 обертів за секунду.
- Спостережувана продуктивність Середня досягнута швидкість становила рівно 1,5 об/с зі стандартним відхиленням 0,03 об/с, що знову демонструє ефективність контролера у досягненні та підтримці бажаного заданого значення зі зменшеною мінливістю.

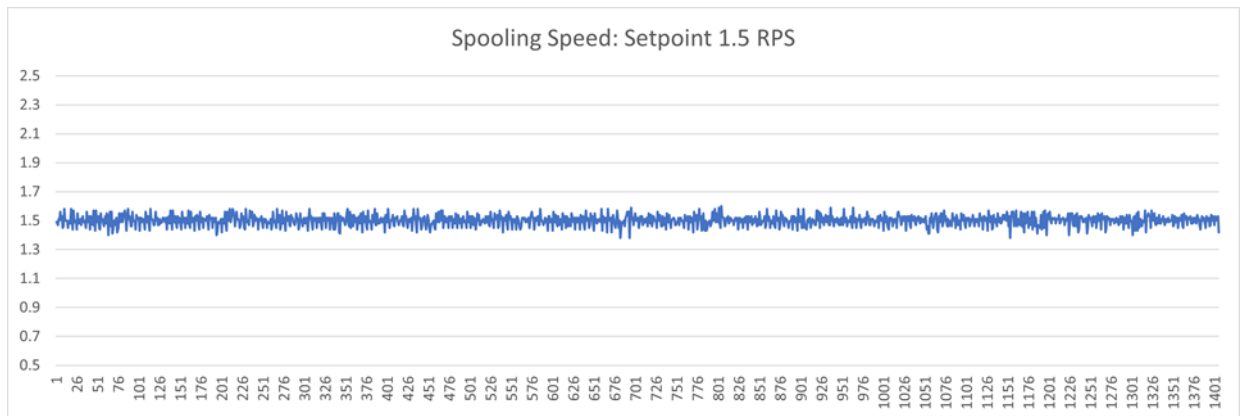


Рисунок 4.4 - Швидкість на різних мітках часу при заданому значенні 1,5 обертів за секунду.

4. З ПД-регулюванням (задане значення 1 RPS, рис. 4.5):
 - Стратегія контролю ПД-регулятор було налаштовано на задане значення 1 обертів за секунду.
 - Спостережувана продуктивність Середня швидкість відповідала заданому значенню при 1 оберті за секунду, з дещо вищим стандартним відхиленням 0,04 обертів за секунду порівняно із заданими значеннями 1,5 та 2 обертів за секунду. Незважаючи на незначне збільшення відхилення, результати все ще свідчать про надійну роботу керування на нижчих швидкостях.

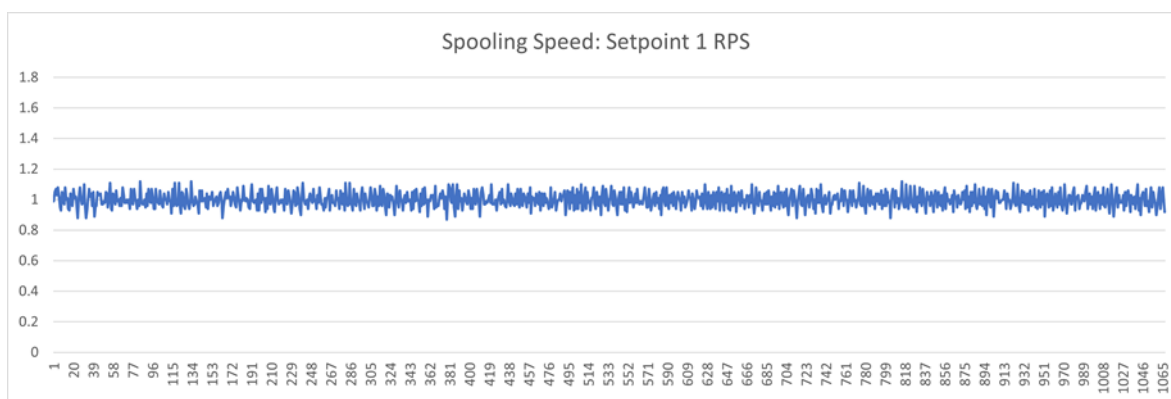


Рисунок 4.5 Швидкість на різних мітках часу при заданій точці 1 RPS.

Впровадження контуру ПІД-керування значно покращило керування швидкістю котушки порівняно з базовим ШІМ-керуванням. Ключові покращення, що спостерігаються, включають:

- Зменшена мінливість. Нижчі стандартні відхилення під час ПІД-керування вказують на зменшення коливань швидкості, що сприяє більш стабільному та передбачуваному процесу котушки.
- Точне відстеження заданих значень. Середні швидкості, зареєстровані за різних заданих значень, демонструють здатність ПІД-контролера точно досягати та підтримувати задані швидкості, що має вирішальне значення для забезпечення якості та однорідності екструдованого волокна.
- Підвищена стабільність процесу. Підвищена стабільність за різних заданих значень під PID-регулюванням свідчить про те, що процес можна надійно контролювати в різних робочих умовах, підвищуючи загальну ефективність процесу екструзії волокна.

Графіки, що супроводжують ці результати, візуально відображатимуть покращення узгодженості та точності, що забезпечуються ПІД-регулюванням, ілюструючи щільнішу кластеризацію точок даних навколо заданих значень та вузьчі діапазони зміни швидкості. Загалом, реалізація ПІД-контуру в системі керування швидкістю котушки FrED виявилася дуже

ефективною, що свідчить про значне покращення експлуатаційних можливостей пристрою.

Застосування зовнішнього пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) контуру керування для керування діаметром волокон, що виробляються настільним пристроєм для екструзії волокон (FrED), являє собою стратегічне вдосконалення, спрямоване на підвищення точності та стабільності процесу екструзії. У цьому розділі детально описано вплив впровадження ПІД-контуру на керування діаметром, порівнюючи його продуктивність з базовим сценарієм без ПІД-керування. Результати такі:

4.3. Розробка системи керування

Метою проектування системи керування, є розробка компенсатора $D(z)$, який забезпечить час встановлення одиничного кроку менше 2 секунд за допомогою MATLAB. Відповідні значення компенсатора, які забезпечать час встановлення одиничного кроку менше 2 секунд, можуть бути досягнуті шляхом автоматичного налаштування всієї системи за допомогою інструментарію керування MATLAB. Інструмент кореневого місця інструментарію використовується спеціально для підтвердження отриманих значень $D(z)$.

Було проведено розрахунок передавальної функції для якісного налаштування процесу екструзії волокна.

$$G_p(s) = \frac{44.23}{s^2 + 0.65s + 0.136} \quad (4.1)$$

Блок-діаграма, що представляє замкнуту систему одношнекового екструдера з $G_p(s)$ та одиничним зворотним зв'язком, показана на рис. 4.6.

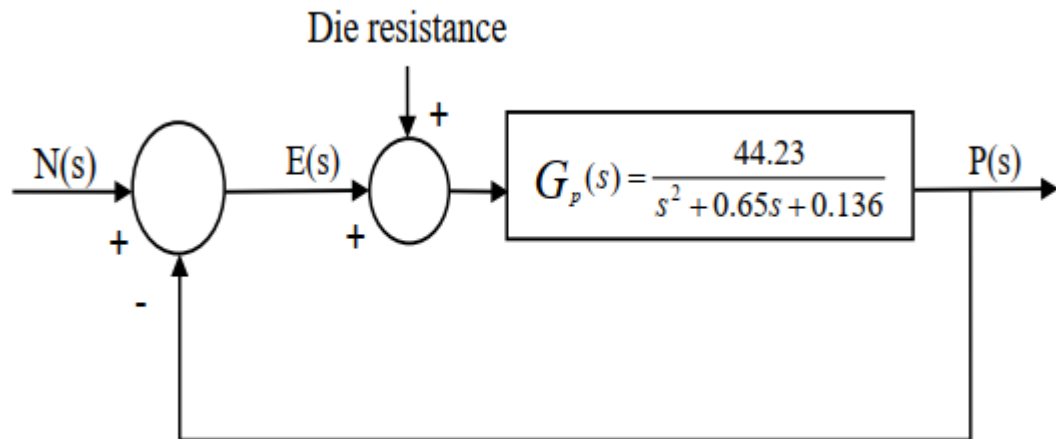


Рисунок 4.6 - Схема системи керування екструдером.

Специфікація проекту.

1. Відсоткове перевищення менше ніж 5,50% відносно одиничного крокового вхідного сигналу.
2. Час встановлення одиничний, ступінчастий.
3. Час наростання до одиничного ступінчастого вхідного сигналу менше 5,0 секунд. Перший підхід оригінальної системи на ступінчастий вхід. Наступний код MATLAB допомагає досягти цього.

```
num=44.23;  
den=[1 0.65 0.136];  
Gp=tf(num,den)  
Transfer function:
```

$$\frac{44.2}{s^2 + 0.65s + 0.136}$$

Модель безперервного нуля/полюса/підсилення.

Східчаста характеристика $G(s)$ задається в MATLAB як `Step(Gs)`

і показано на рис. 4.7.

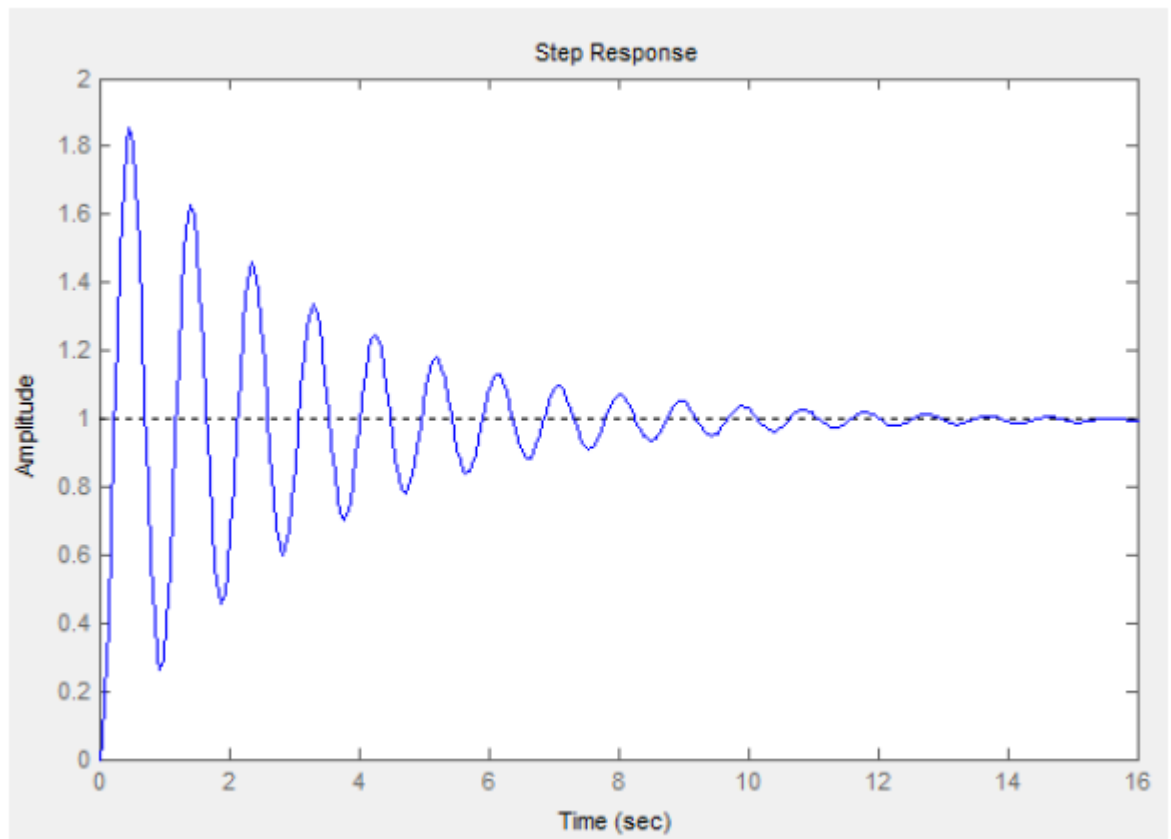


Рисунок 4.7 – Діаграма відклику функції $G(s)$.

На рис. 4.7 показано одиничну перехідну характеристику для некомпенсованої системи з перевищенням 85,8%, часом встановлення 11,9 с та часом наростання 0,162 с. Для забезпечення стабільності системи в систему буде введено відповідний компенсатор шляхом налаштування за допомогою інструментарію системи керування MATLAB. Блок-схема системи керування з $G_c(s)$ показана на рис. 4.8.

Результат налаштування системи керування одношнековою екструзією пластику з розімкнутою передавальною функцією $G_p(s)$ з використанням графіка кореневого місця інструментарію системи керування MATLAB показано на рис. 4.9. З налаштованої діаграми MATLAB на рис. 4.9 отримано відповідний компенсатор для одношнекової екструзії волокна

виду, наведеного в 4.1.

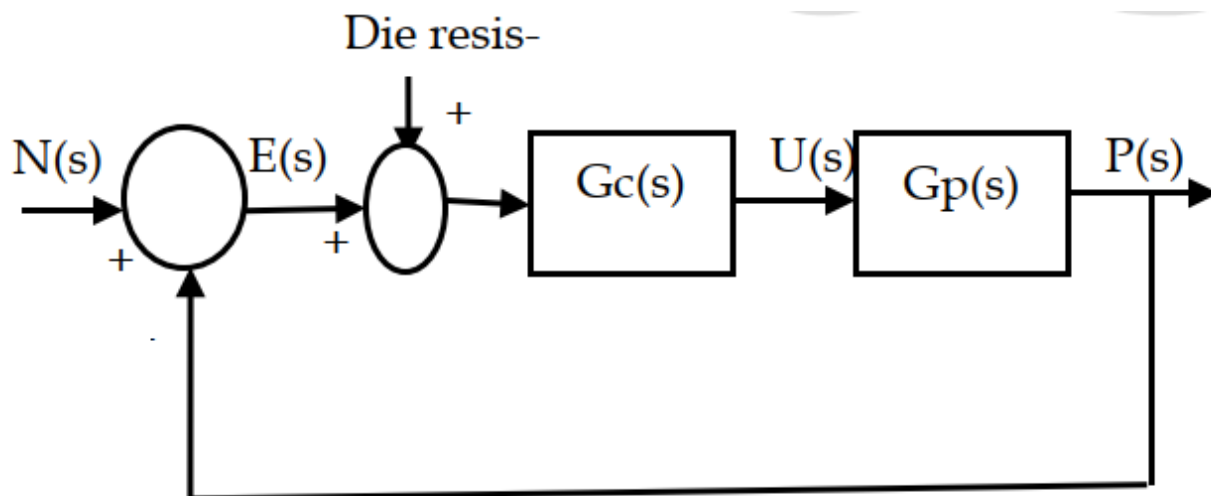


Рисунок 4.8 - Блок-схема екструдера з компенсатором $G_c(s)$

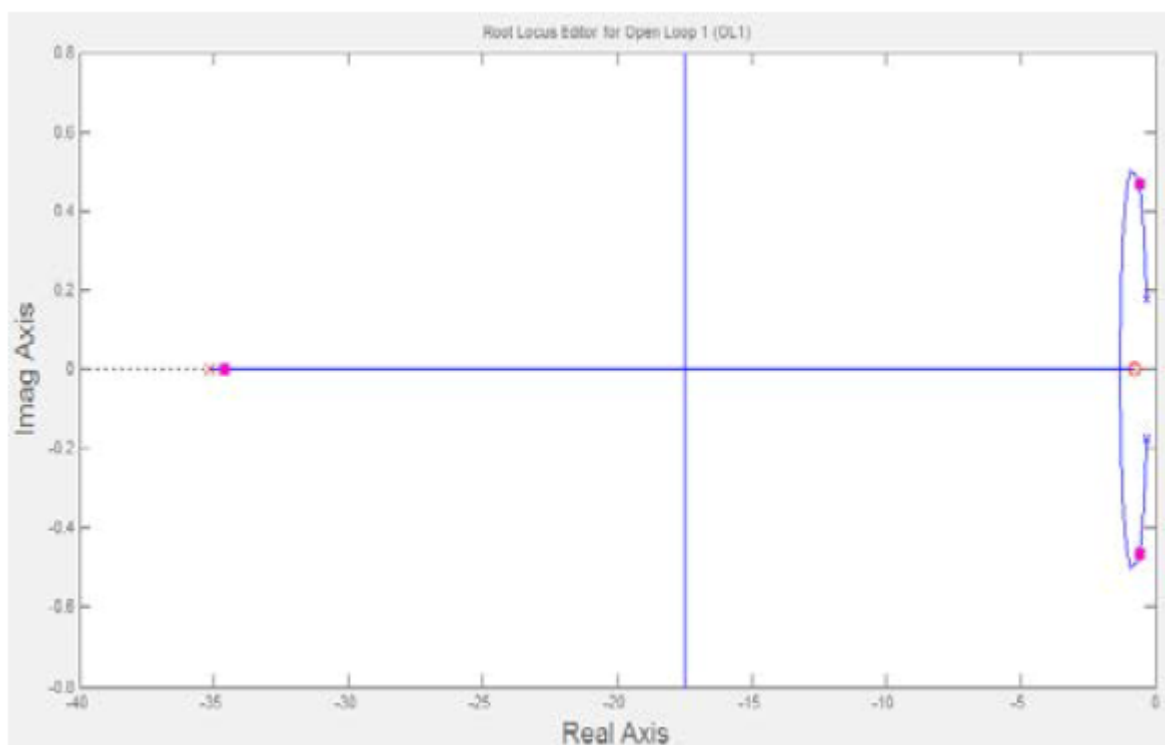


Рисунок 4.9 - Графік кореневого місця налаштованої системи

$$G_c(s) = K \frac{(s + a)}{s + b} \quad (4.1)$$

де K – коефіцієнт підсилення, a – нуль компенсатора, а b – полюс компенсатора. $K = 0,419$, $a = 0,801$, $b = 35,2$. Заміна – враховуючи ці значення в рівнянні 4.1, отримуємо:

$$G_c(s) = 0.419 \frac{(s + 0.801)}{s + 35.2} \quad (4.2)$$

Ступінчаста характеристика компенсованої системи в неперервному часі показана на рис. 4.10.

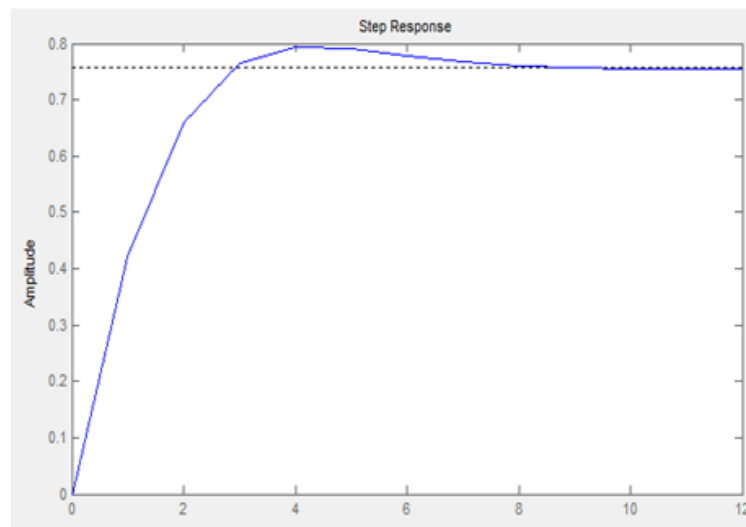


Рисунок 4.10 - Одинична перехідна характеристика компенсованої системи в неперервному часі.

На рис. 4.10 показано перехідну характеристику одиниці для одношнекової системи керування екструзією пластику, коли до неї додано компенсатор $G_c(s)$. Перерегулювання становить 4,92%, час встановлення – 6,7 с, а час наростання – 2,02 с для компенсованої системи.

4.3. Проектування цифрового компенсатора

Цифровий компенсатор $D(z)$ тепер можна отримати з (3.2) за допомогою правила Тастіна. Воно стверджує, що:

$$s = \frac{2}{T} \frac{(z-1)}{(z+1)} \quad (4.3)$$

де, $T=0,01$ с.

$$D(z) = C \frac{(z-A)}{z-B} \quad (4.4)$$

$$D(z) = 0.419 \frac{\left(\frac{2}{T} \frac{(z-1)}{(z+1)}\right) + 0.801}{\left(\frac{2}{T} \frac{(z-1)}{(z+1)}\right) + 35.2} = \frac{0.35772(z-0.992)}{(z-0.700)} \quad (4.5)$$

Рівняння 4.5 – це цифровий контролер, розроблений для системи. Замкнута передавальна функція системи в області z задається як:

$$G(z) = \frac{0.00078938(z+0.9978)(z-0.992)}{(z-7052)(z^2-1.9882z+0.9882)} \quad (4.6)$$

На рис. 4.11 показано ступінчасту характеристику компенсованої системи в дискретному часі.

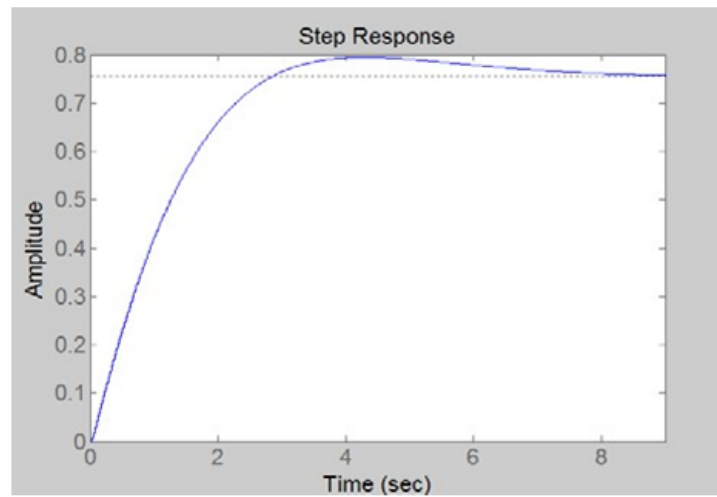


Рисунок 4.11 - Східчаста характеристика компенсованої системи в дискретному часі.

5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1 Моделювання вежі оптичного волокна

Моделювання витяжної вежі оптичного волокна. Цей розділ базується на роботі, виконаній Віктором Рейєсом та Джорджем Ченом [17]. Під час процесу екструзії волокна, детально описаного в розділі 2.2, дані записуються та реєструються промисловими комп'ютерами у значно великі файли CSV. Кожен файл містить дані за один тиждень, де записуються та зберігаються параметри процесу, такі як виміряна BFD, натяг, потужність печі, швидкість преформи, швидкість кабстана та інші. Модель, створена Рейєсом та Ченом, використовувала чотири вхідні дані для моделювання діаметра виробленого волокна. Ці вхідні дані - швидкість преформи, швидкість кабстана, температура гелію та потужність печі. Однак цей дослідницький проект, з метою оптимізації моделі для витяжної вежі, використовує оновлений чорний ящик для моделювання витяжної вежі, показаний на рис. 5.1 нижче.

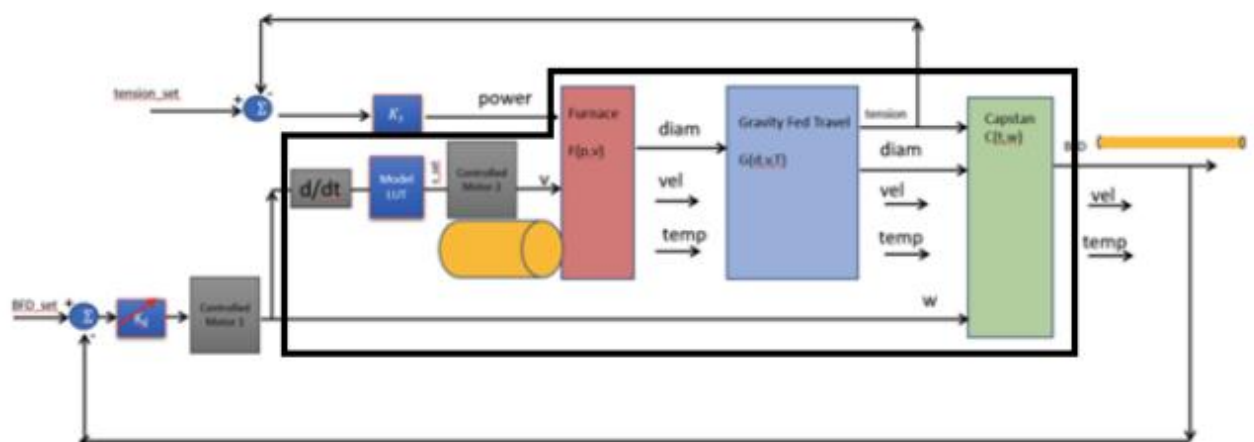


Рисунок 5.1 Оновлена чорна скринька для моделі лебідкової вежі.

Оновлена модель чорної скриньки враховує контролер швидкості заготовки. Контролер швидкості заготовки містить дискретну таблицю пошуку, яка співвідносить нахил швидкості вала зі швидкістю заготовки. Оскільки контролер швидкості заготовки використовує лише дискретні операції, його було включено до моделі чорної скриньки для оптимізації моделі. В результаті, навчена модель має 5 входів порівняно з 4 згаданими раніше, з додаванням змінної `rampupslopevalflt`, яка відповідає нахилу швидкості вала, і навчається на двох виходах: BFD та натягу. Крім того, дані за кожен тиждень розглядалися як пакет, а кожна суміжна область виробничих даних між 1500 та 8000 точками даних вважалася підпакетом. Підпакекти були обмежені максимальною довжиною пакету 8000 точок даних, щоб нормалізувати розмір вхідних даних для нейронної мережі та полегшити її навчання. Знімок даних за один тиждень показано нижче на рис. 5.2 та 5.3 для вхідних та вихідних даних відповідно.

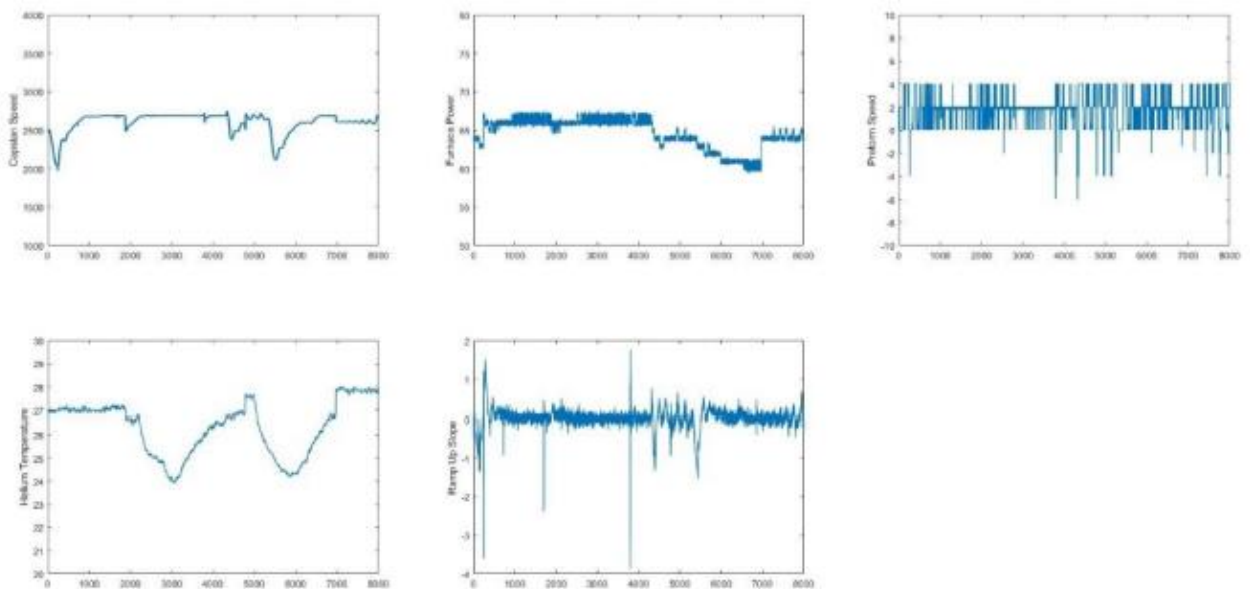


Рисунок 5.2 - Дані часових рядів для 5 вхідних даних

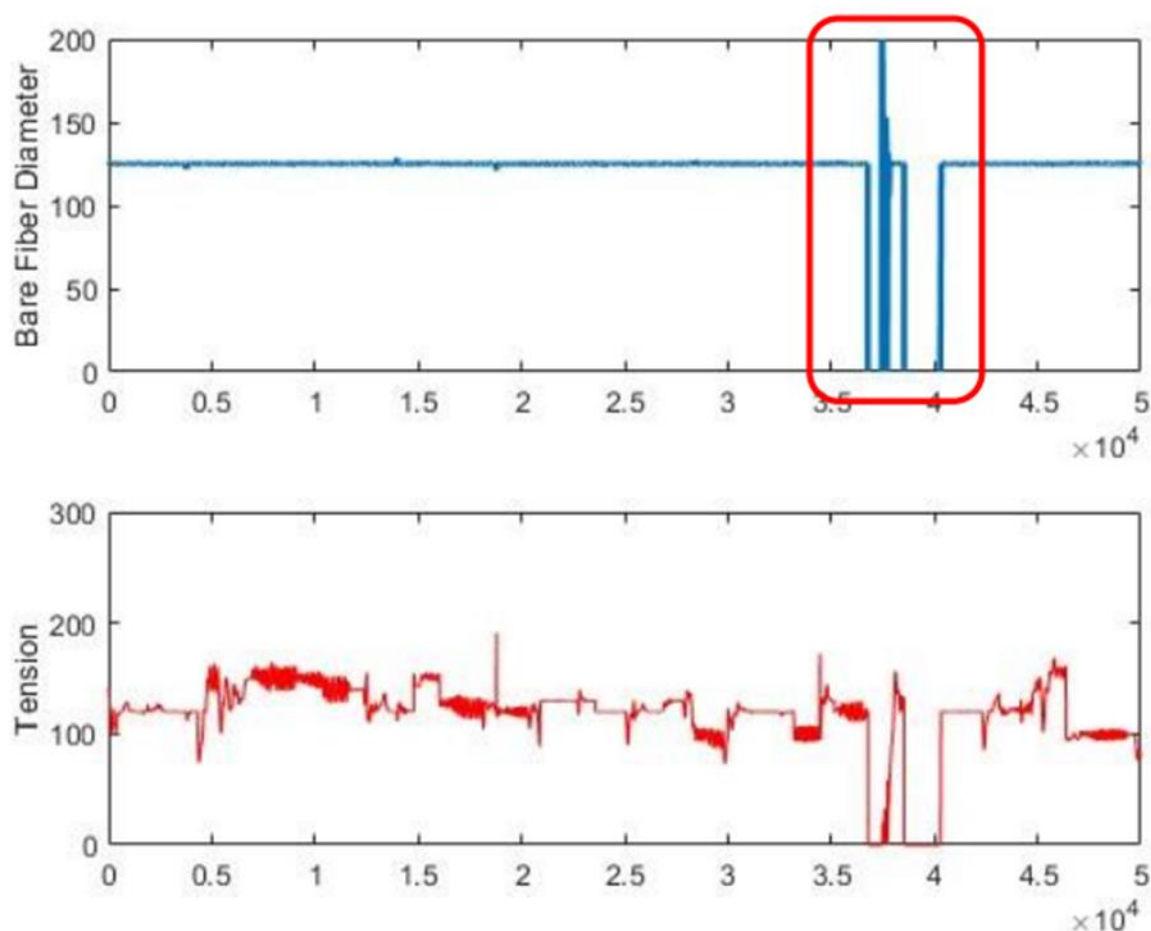


Рисунок 5.3 - Дані часових рядів для вихідних даних моделі

Розриви волокна трапляються протягом усього виробничого процесу, як показано на рис. 5.3. Розриви можуть бути результатом перегріву, дефектів покриття та інших нерівностей у матеріалі покриття. [19] Розриви також є частиною природи процесу, оскільки, коли волокно збирається на котушках і котушка досягає необхідної ваги, процес необхідно зупинити, щоб котушка була замінена новою, і процес екструзії відновився. Цей процес виконується вручну операторами, які вручну зупиняють процес, змінюють котушку, а потім знову запускають башту в експлуатацію. Цей процес призводить до того, що частини даних мають варіації, оскільки система намагається стабілізуватися на необхідному діаметрі 125 мікрон. Щоб видалити перехідні дані, коли система має досягти заданого значення 125

мікрон, верхня та нижня межі даних були встановлені на рівні 124 та 126 мікрон відповідно. Це призведе до кращого навчання моделі на виході BFD, оскільки не потрібно враховувати перехідні процеси в системі під час навчання моделі.

5.2. Повторна вибірка та субпакування.

Sterlite має дві вежі-візитівки, які досліджуються в цьому дослідницькому проєкті, а саме Tower 48 (T48) та Tower 51 (T51). Tower 48 має дані за дванадцять тижнів, тоді як T51 має дані за п'ять тижнів. Вважалося, що дані, отримані від Sterlite у вигляді великих CSV-файлів, кожен з яких представляє дані за один тиждень, вибірково обробляються з інтервалом 500 мілісекунд (мс). Вся цінна робота, виконана зі Sterlite, базувалася на припущенні, що дані були точно вибірково обрано. Однак, після ретельної перевірки даних, було виявлено, що дані були вибірково обрано випадковим чином, що впливало на точність навчання моделі. Код MATLAB для обробки даних, доступний у Додатку В, був змінений, щоб врахувати випадкову вибірку даних. Для аналізу впливу повторної вибірки даних для рівномірної вибірки, для BFD було згенеровано середньоквадратичну помилку (MSE), отриману шляхом навчання моделі на тижні даних та тестування протягом усіх інших тижнів. На рисунках 33 та 34 нижче показано MSE для навчання, проведеного на T48 та T51 відповідно. З рисунків нижче видно, що рівномірна вибірка призводить до кращого навчання моделі, що, у свою чергу, призводить до нижчої MSE під час тестування моделі протягом інших тижнів.

Крім того, дані були розділені на підпартії для зручності навчання моделі, причому кожна суміжна область виробництва волокна з кількістю точок даних понад 1500 вважається підпартією.

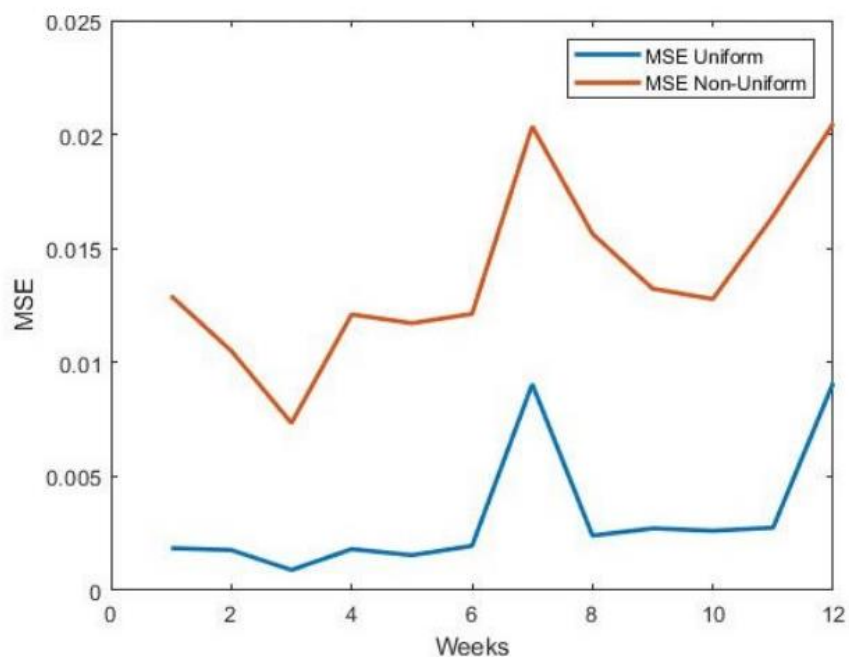


Рисунок 5.4 - Вплив даних повторної вибірки на MSE для T48

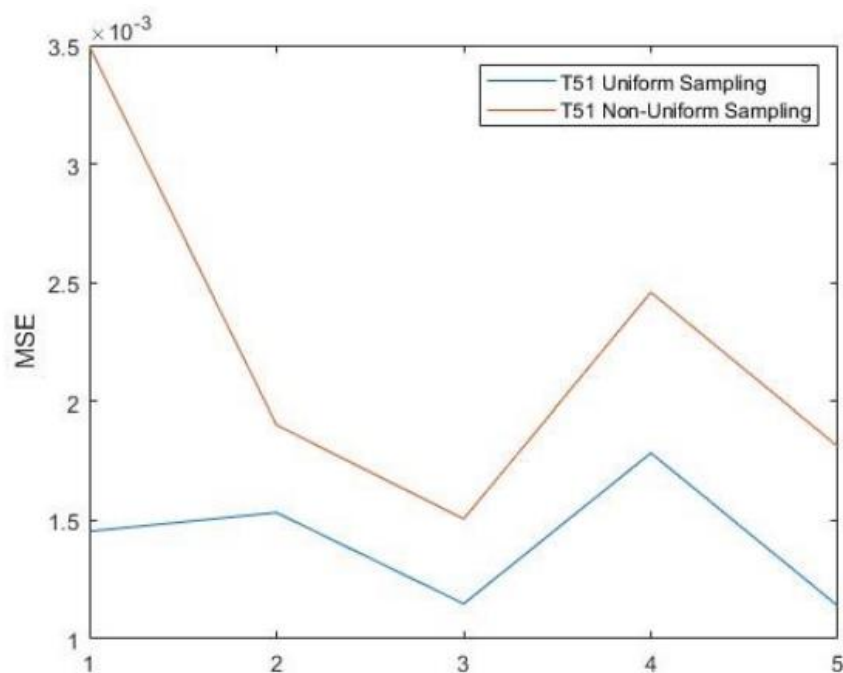


Рисунок 5.5 - Вплив даних повторної вибірки на MSE для T51

Підпартії були обмежені максимальною довжиною підпартії 8000 точок для нормалізації вхідних даних для навчальної моделі. Спочатку, як зазначено, підпартування було проведено за діаметром з верхньою та

нижньою межами 124 та 126 мікронів відповідно. Результати підпартування за методом BFD показано нижче на рис. 5.6.

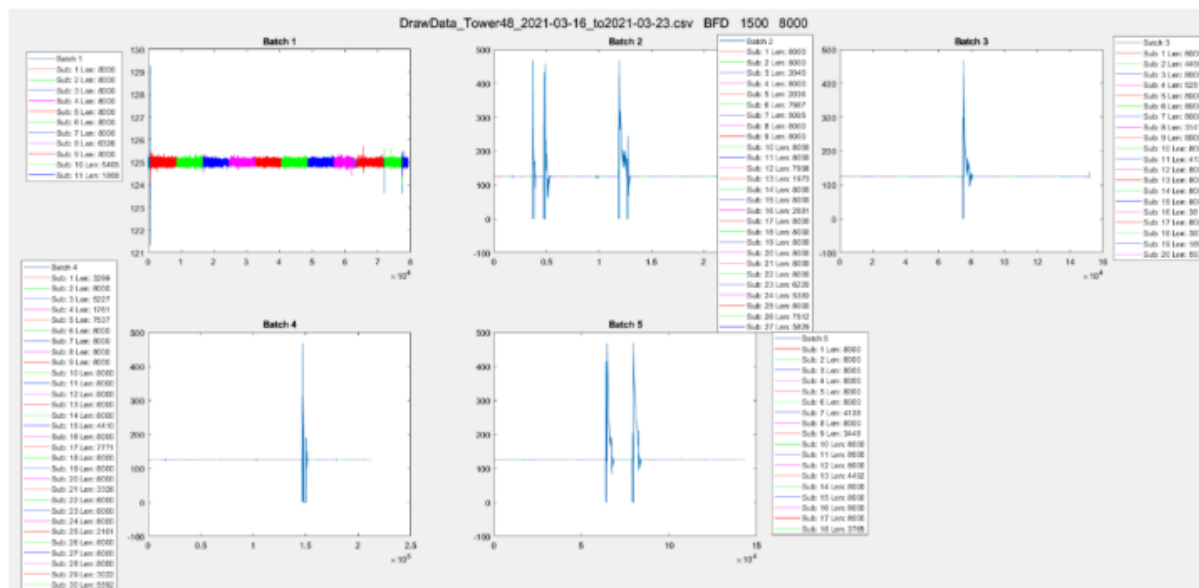


Рисунок 5.6 - Піддозування на BFD

Використання вищезгаданого підпакування дало задовільні результати під час навчання моделі на одному виході BFD. Однак, коли та сама обробка даних та підпакування використовувалися для навчання моделі на двох виходах, BFD та натягу, модель не сходилася. Результати навчання моделі з використанням 5 входів на 2 виходах показано нижче на рис. 5.7.

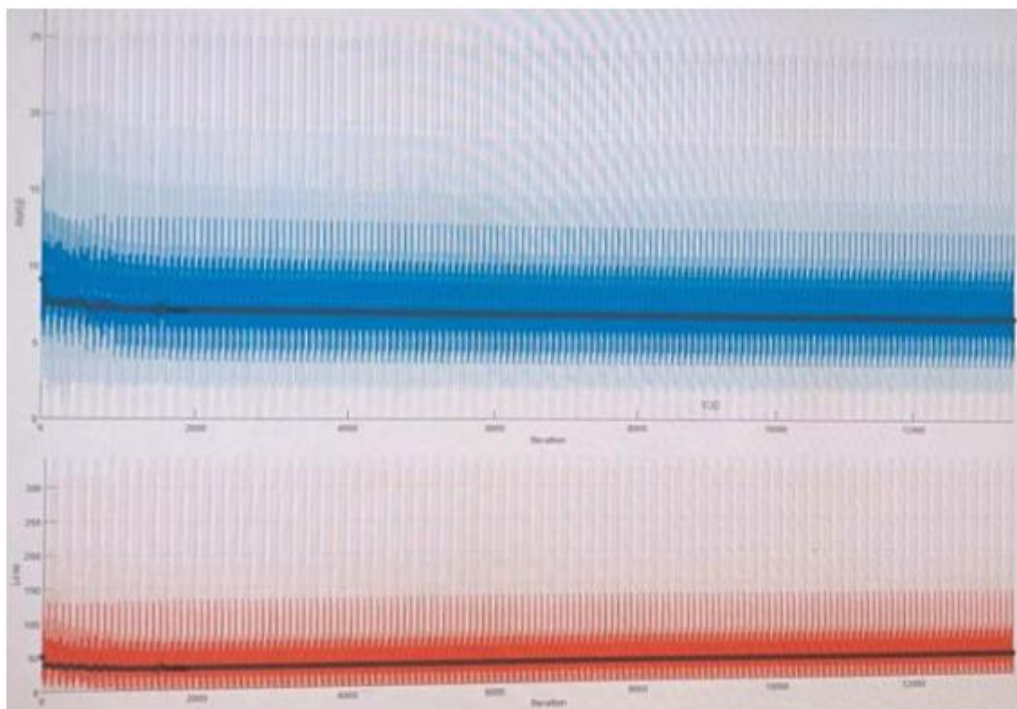


Рисунок 5.7 - Навчання моделі на двох виходах з використанням BFD Sub-Batching

Дані були досліджені далі, щоб визначити причину незбіжності моделі, і було виявлено, що дані про натяг не узгоджуються з даними BFD, і що в даних про натяг значно більше варіацій та шуму, що є причиною, чому модель не збігалася на двох вихідних даних. На рисунку 37 нижче показано дані часових рядів як для BFD, так і для натягу, що підкреслює шум у даних про натяг, описаних вище.

Було проведено експеримент із субдозуванням, щоб побачити його вплив на модель, де субдозування було виконано на BFD, а потім на натягу, щоб врахувати високий рівень шуму та варіації в даних про натяг. Дані про натяг зазвичай мають значення в діапазоні від 120 до 160 Н, тому верхня та нижня межі, що використовуються для даних про натяг, становлять 100 та 200 відповідно. Результати субдозування на основі даних про натяг показано нижче на рис. 5.9.

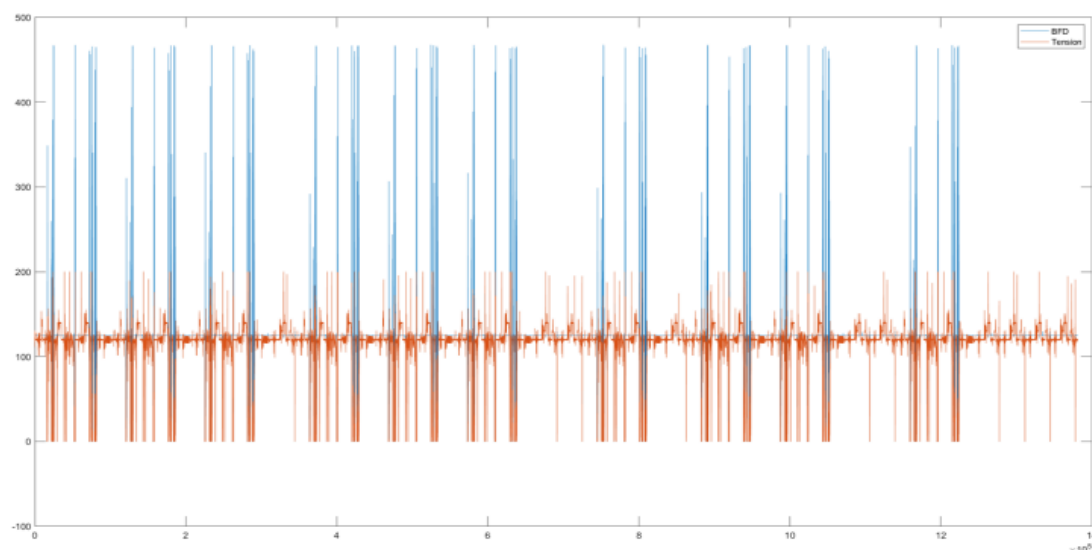


Рисунок 5.8 - Дані часових рядів для BFD та Tension, взяті з даних за один тиждень для T48

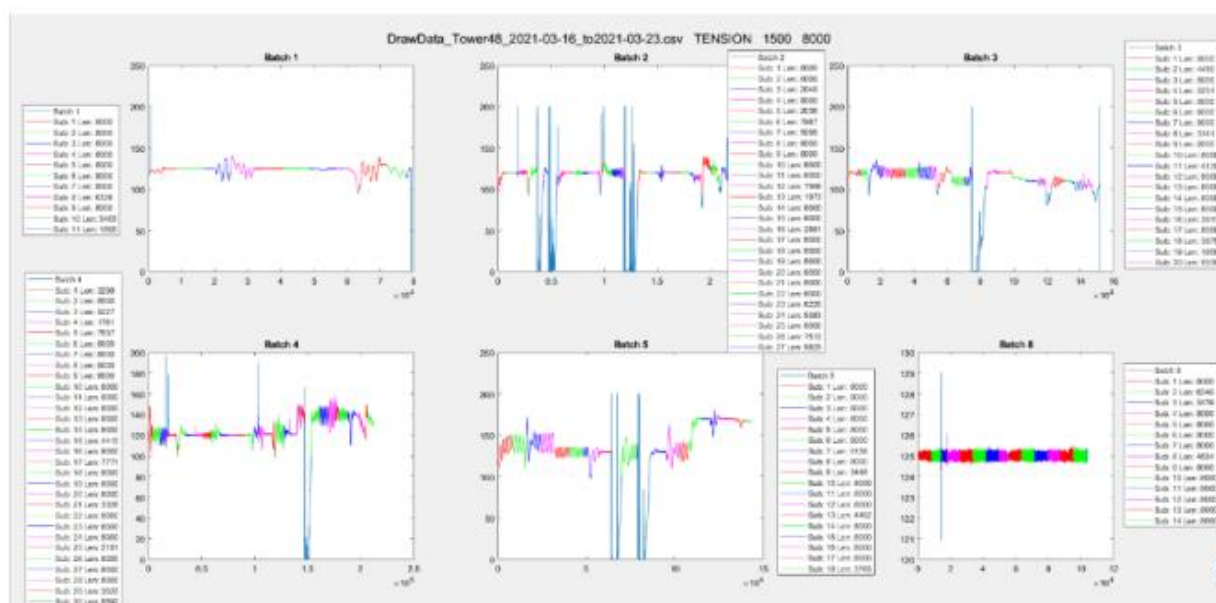


Рисунок 5.9 - Підгрупування даних про натяг

Потім модель була навчена з використанням нового підпакування на двох виходах з використанням 5 входів, а результати показано нижче на рис. 5.10. Модель була навчена з використанням гіперпараметрів.

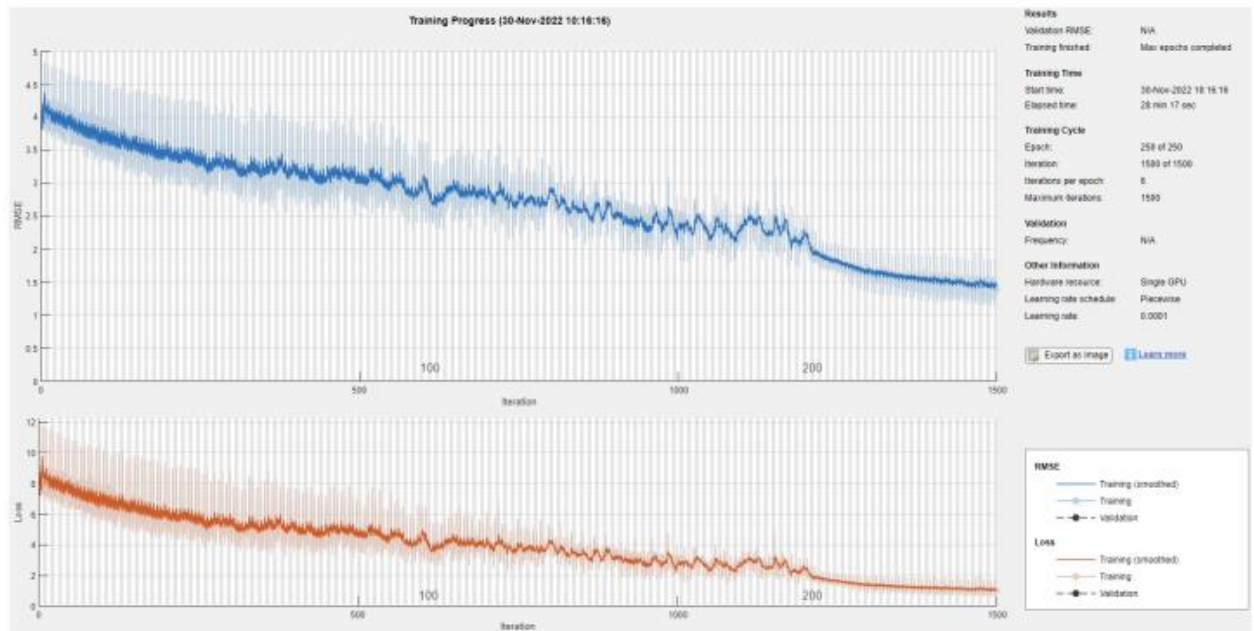


Рисунок 5.10 - Навчання моделі після нового підгрупування для двох виходів з використанням п'яти вхідних даних

Вищезазначена модель була навчена з використанням одного шару LSTM з 256 прихованих вузлів. Потім були проведені експерименти для визначення найкращої архітектури нейронної мережі, яку слід використовувати для сурогатної моделі витяжки оптичного волокна.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Вимоги охорони праці під час роботи з електроустаткуванням

Загальні положення

Інструкція з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування розроблена відповідно до Закону України «Про охорону праці» (Постанова ВР України від 14.10.1992 № 2694-XII) в редакції від 20.01.2018 р, на основі «Положення про розробку інструкцій з охорони праці», затвердженого Наказом Комітету по нагляду за охороною праці Міністерства праці та соціальної політики України від 29 січня 1998 року № 9 в редакції від 01 вересня 2017 року, з урахуванням «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів», затвердженими наказом Міністерства палива та енергетики 25.07.2006 р. № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 13.02.2012 р. №91, «Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів», затверджених наказом Держнаглядохоронпраці України 09.01.1998 р. № 4.

Всі положення даної інструкції з охорони праці поширюються на електриків освітньої установи, які виконують роботи з ремонту та обслуговування електроустаткування.

До самостійного виконання робіт з ремонту та обслуговування електричного обладнання допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли навчання за фахом, а також:

- медичний огляд і не мають протипоказань за станом здоров'я до виконання даної роботи;

- вступний і первинний на робочому місці інструктажі з охорони праці;

- навчання безпечним методам і прийомам праці;

перевірку знань правил улаштування електроустановок, правил безпеки при експлуатації електроустановок, вимог охорони праці;

при ремонті і обслуговуванні електрообладнання напругою до 1000В мають групу з електробезпеки не нижче III, а понад 1000В - не нижче IV.

Електрику необхідно знати і виконувати вимоги інструкції з охорони праці при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, інструкцій по роботі з ручним інструментом, електричним інструментом і драбинами.

Електрику при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування слід дотримуватися вимог Правил безпечної експлуатації електричних установок споживачів і Правил технічної експлуатації електричних установок споживачів, і мати відповідну групу з електробезпеки згідно з вимогами цих Правил.

Виконуючи роботи з ремонту та обслуговування електричного обладнання, може спостерігатися вплив нижчеперелічених шкідливих і небезпечних виробничих факторів:

- падіння з висоти;
- ураження електричним струмом;
- підвищена напруженість електричного поля;
- підвищена запиленість повітря робочої зони;
- підвищений рівень вібрації;
- недостатня освітленість робочої зони;
- фізичні перевантаження;
- нервово-психічні перевантаження.

Електрику при виконанні ремонту і обслуговування електроустаткування необхідно використовувати наведені нижче ЗІЗ:

- напівкомбінезон бавовняний - на 12 місяців;
- рукавички на - 3 місяці;

черевики шкіряні на - 24 місяці;
калоші діелектричні - чергові;
рукавиці діелектричні - чергові;
килимки діелектричні - чергові.

Електрик при ремонті і обслуговуванні електрообладнання зобов'язаний:

тримати у чистоті і порядку своє робоче місце;
дотримуватися Правил внутрішнього трудового розпорядку;
вміти застосовувати засоби індивідуального, колективного захисту, засоби пожежогасіння;

вміти надавати першу допомогу потерпілим від нещасних випадків;

знати і виконувати всі вимоги нормативних актів з охорони праці, правил протипожежного захисту та виробничої санітарії.

негайно повідомляти своєму безпосередньому керівнику про будь-який нещасний випадок, що трапився на виробництві, про ознаки професійного захворювання, а також про ситуацію, яка створює загрозу життю і здоров'ю людей;

знати терміни випробування захисних засобів і пристосувань, правила експлуатації, догляду та користування ними. Не дозволяється використовувати захисні засоби і пристосування з простроченим терміном перевірки;

виконувати тільки доручену роботу;

дотримуватися вимог інструкцій з експлуатації обладнання;

знати, де знаходяться засоби надання допомоги, первинні засоби пожежогасіння, головний і запасні виходи, шляхи евакуації в разі аварії або пожежі;

знати номери телефонів медичної установи (103) і пожежної охорони (101).

Електрик може відмовитися від виконання дорученої йому роботи, якщо виникла виробнича ситуація, яка становить загрозу для його життя і здоров'я оточуючих, або для навколишнього середовища, і доповісти про це своєму прямому керівнику.

На робочому місці заборонено курити, вживати алкогольні напої та інші речовини, які надають наркотичну дію на організм людини.

З метою запобігання отримання травм і виникнення травмонебезпечних ситуацій слід дотримуватися нижчеперелічених вимог: не можна залучати до роботи сторонніх осіб;

не починати роботу в разі відсутності умов для її безпечного виконання;

виконувати роботу тільки на справному обладнанні, зі справними пристроями та інструментом;

виявивши несправність терміново доповісти безпосередньому керівнику або усунути їх власними силами, якщо це відноситься до посадових обов'язків;

не торкатися неізольованих або пошкоджених проводів;

не виконувати роботу, яка не входить до професійних обов'язків.

Вміти надавати першу допомогу при кровотечах, переломах, опіках, ураженнях електричним струмом, раптовому захворюванні або отруєнні.

Дотримуватися правил особистої гігієни:

верхній одяг, головний убір і інші особисті речі слід залишати в гардеробі;

працювати в чистому спецодязі;

приймати їжу в призначеному для цього місці.

Вміти правильно користуватися ЗІЗ та засобами колективного захисту, первинними засобами пожежогасіння, протипожежним інвентарем, знати, де вони знаходяться.

Особи, які порушили цю інструкцію з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, несуть дисциплінарну, адміністративну, матеріальну і кримінальну відповідальність відповідно до чинного законодавства України.

Вимоги безпеки перед початком роботи

Одягти спецодяг, провести огляд і підготовку робочого місця, прибрати зайві предмети.

Видалити із зони проведення робіт сторонніх осіб і звільнити робоче місце від сторонніх матеріалів та інших предметів, обгородити робочу зону і встановити знаки безпеки.

Переконалися в достатньому освітленні робочого місця, відсутність електричної напруги на відремонтованому обладнанні.

Оглянути на справність вимикачі, розетки електричної мережі, електровілок, електричних проводів, з'єднувальних кабелів, переконалися в наявності і справності ЗІЗ (засобів індивідуального захисту) і попереджувальних пристроїв (рукавичок діелектричних, окулярів захисних, калош, килимків і т. п.).

Виконуючи роботи з інструментом необхідно упевнитися в його справності, в відсутності механічних пошкоджень ізоляційного покриття і в своєчасності проходження випробувань інструменту.

Провести перевірку робочого місця на відповідність вимогам пожежної безпеки, на достатність освітлення робочого місця.

Виявивши недоліки і порушення з питань електричної і пожежної безпеки, негайно доповісти своєму безпосередньому керівнику.

6.2 Вимоги безпеки під час виконання робіт

Виконуючи посадові обов'язки, електрик зобов'язаний мати при собі посвідчення перевірки знань з питань охорони праці. За відсутності посвідчення або наявності посвідчення з терміном перевірки, працівник не отримує допуск до роботи.

Роботи в електричних установках щодо заходів безпеки поділяються на 3 категорії:

- зі зняттям напруги;
- без зняття напруги на струмопровідних частинах або біля них;
- без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою.

Працівники, які виконують спеціальні види робіт, до яких висуваються додаткові вимоги безпеки, повинні бути навчені безпечному проведенню таких робіт і мати про це відповідний запис в посвідченні про перевірку знань.

Працівникові, який обслуговує закріплені за ним електричні установки напругою до 1000 В одноосібно, необхідно мати III групу з електробезпеки.

Виконуючи роботи в електричних установках потрібно проводити організаційні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

- оформляти роботи нарядом-допуском, розпорядженням відповідно до переліку робіт, що виконуються в порядку поточної експлуатації;
- проводити підготовку робочих місць;
- допуск до роботи;
- здійснювати контроль над виконанням робіт;
- переводити на інше робоче місце;
- установлювати перерви в роботі та її закінчення.

Для підготовки робочого місця до роботи, яка вимагає зняття напруги, необхідно застосувати, в певному порядку, наведені нижче технічні заходи:

виконати необхідні відключення і вжити всіх заходів, що виключають помилкове або самовільне включення комутаційної апаратури;

розвісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційною апаратурою;

провести перевірку на відсутність напруги на струмопровідних частинах, які повинні бути заземлені для захисту людей від ураження електричним струмом;

встановити заземлення (включити заземлюючі ножі, застосувати переносні заземлення);

встановити огорожі, якщо необхідно, близько робочих місць або струмоведучих частин, що залишилися під напругою, а також вивісити на даних огорожах плакати безпеки.

в залежності від місцевих умов, струмовідні частини обгородити до чи після їх заземлення.

Працювати без зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу них слід як мінімум двом працівникам, одному з них, керівнику робіт, необхідно мати групу IV; іншим групу III з обов'язковим оформленням роботи нарядом-допуском або розпорядженням.

При знятті і встановленні запобіжників під напругою в електроустановках напругою до 1000 В слід заздалегідь відключити всі навантаження, які підключені до зазначених запобіжників; використовувати при цьому ізолюючі кліщі або діелектричні рукавички, а якщо є відкриті плавкі вставки, то і захисні окуляри.

Роботу з використанням драбин потрібно проводити вдвох, один з працівників повинен перебувати знизу. Стояти на ящиках або інших предметах забороняється. При установці приставних драбин на балках,

елементах металевих конструкцій і т. п. слід надійно закріпити верхню і нижню частину драбини на конструкціях.

Під час обслуговування та ремонту електричних установок користуватися металевими драбинами забороняється.

6.3 Вимоги безпеки після закінчення робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування

Відключити (від'єднати) необхідне електрообладнання, електроінструмент від мережі.

Навести порядок на робочому місці, прибрати в спеціальні місця деталі, матеріал, сміття і відходи.

Прибрати у відведене місце весь інструмент і пристосування.

Зняти і прибрати спецодяг, ЗІЗ, ретельно помити руки.

Провести огляд робочого місця на відповідність його всім вимогам протипожежного захисту.

Повідомити своєму безпосередньому керівнику про недоліки і несправності, які були під час виконання роботи. Зафіксувати це в оперативному журналі.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пожежі:

вимкнути електричне обладнання, припливно-витяжну вентиляцію, якщо вона є;

повідомити в пожежну частину за телефоном 101 і доповісти про це своєму керівнику, а при його відсутності іншій посадовій особі;

приступити до ліквідації осередка загоряння, застосовуючи передбачені для цього засоби пожежогасіння. Виконувати гасіння електричного обладнання, що знаходиться під напругою, можна тільки

вуглекислотними вогнегасниками типу ОУ або піском. Гасити їх водою або пінним вогнегасником забороняється.

Електрик повинен пам'ятати, що при раптовому відключенні напруги, вона може бути подана знову без попередження.

Слід швидко відключити механізми і пристрої:

- в разі раптового відключення електроенергії,;
- якщо подальша їх робота загрожує безпеці працівників;
- в разі відчуття дії електричного струму при торканні металевих частин пускової апаратури;
- в разі іскріння;
- при найменших ознаках загоряння, появи диму, запаху гару;
- якщо з'явився незнайомий шум.

У разі короткого замикання в мережі електроживлення необхідно знеструмити обладнання і повідомити своєму прямому керівнику.

Якщо сталося ураження електричним струмом, слід звільнити потерпілого від дії електричного струму, для чого відключити електричну мережу або від'єднати потерпілого від струмопровідних частин за допомогою діелектричних захисних засобів та інших ізолюючих речей і предметів (сухий одяг, суха жердина, прогумований матеріал і т. п.), або перерізати (перерубати) провід будь-яким інструментом з ізолюючою рукояткою, обережно, без додаткового нанесення травм потерпілому. До прибуття медпрацівника необхідно надати потерпілому першу допомогу.

При нещасних випадках (травмуванні людини) негайно повідомити про це безпосереднього керівника.

6.4 Розрахунок захисного заземлення

Захисне заземлення забезпечує зниження напруги дотику при замиканні на корпус до відносно безпечних значень шляхом зменшення потенціалу заземленого обладнання, вирівнювання потенціалів підвищенням потенціалів місця, на якому стоїть людина, до значень, що близькі до потенціалу заземлених конструктивних частин обладнання.

Розрахунок захисного заземлення має на меті визначення основних параметрів заземлення – кількість, розміри та порядок розміщення одиночних заземлювачів та заземлюючих провідників, при яких напруга дотику та кроку в період замикання фази на заземлений корпус не перевищує допустимих значень.

Розрахунок захисного заземлення здійснюється для випадку розташування заземлювача в однорідній землі. При цьому враховується опір верхнього шару землі (шар сезонних змін), який обумовлений замерзанням або засухою ґрунту. Розрахунок, який заснований на коефіцієнтах використання провідності заземлювача називається способом коефіцієнтів використання. Його виконують, як при простих, так і при складних конструкціях групових заземлювачів.

Загальні вимоги електробезпеки повинні відповідати ДСТУ 7237:2011. Для захисту від уражень електричним струмом використовують захисне заземлення. Воно повинно захищати людей від уражень електричним струмом у випадку дотику до металевих неструмопровідних частин, які можуть опинитись під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, це досягається з'єднанням металевих частин електроустановок з землею, або її еквівалентом.

Згідно з класифікацією приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом (ПУЕ 1.1.6.), приміщення в якому проводяться всі роботи відноситься до першого класу (без підвищеної небезпеки). Під час

роботи використовуються електроустановки з напругою живлення 36 В, 220 В, та 360 В. Опір контура заземлення повинен мати не більше 4 Ом.

Розрахунок проводять за допомогою методу коефіцієнта використання (екранування) електродів. Коефіцієнт використання групового заземлювача η – це відношення діючої провідності цього заземлювача до найбільш можливої його провідності за нескінченно великих відстаней між його електродами.

При розрахунку заземлювачів в однорідній землі способом коефіцієнтів використання значення опору R захисного заземлення визначаємо в наступному порядку:

обчислюємо опір пристрою заземлення R_z . Згідно правил улаштування електроустановок (ПУЕ) найбільш припустимі значення R_z , складають для установок до 1000 В:

10 Ом при сумарній потужності генераторів або трансформаторів, що живлять дану мережу, не більше 100 кВА;

4 Ом у всіх інших випадках.

- визначаємо необхідний опір штучного заземлювача $R_{ш}$:

$$R_{ш} = \frac{R_e \cdot R_z}{R_e - R_z}, \quad (4.1)$$

де R_e – опір розтікання природного заземлювача, Ом; R_z – необхідний опір заземлюючого пристрою, Ом.

- обчислюємо кількість вертикальних і довжину горизонтальних електродів:

$$n = \frac{4 \cdot \sqrt{S}}{a'}, \quad (4.2)$$

де n – кількість вертикальних електродів, штук; S – площа цеху, m^2 ; a' – задана відстань між електродами, м.

$$l_r = 2a + 2b, \quad (4.3)$$

де l_r – сумарна довжина горизонтальних електродів, м; a – ширина сторони цеху, м; b – довжина сторони цеху, м.

- розраховуємо опори розтікання вертикального R_v та горизонтального R_g електродів:

$$R_v = \frac{\rho_{роз,в}}{2 \cdot \pi \cdot l_v} \left(\ln \frac{2l_v}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l_v}{4t - l_v} \right), \quad (4.4)$$

де $\rho_{роз,в}$ – розрахунковий питомий опір землі для вертикального електрода, Ом·м;

l_v – довжина вертикальних стрижневих електродів, м; d – діаметр електрода, мм;

t – глибина занурення в землю верхнього кінця електрода, м;

$$R_g = \frac{\rho_{роз,г}}{2 \cdot \pi \cdot l_g} \cdot \ln \frac{2l_g}{0,5 \cdot b' \cdot t}, \quad (4.5)$$

де $\rho_{роз,г}$ – розрахунковий питомий опір для горизонтального електрода, Ом·м;

l_g – довжина горизонтальних електродів, м; b' – товщина горизонтального електрода, м.

- за даними таблиці 4.1 та таблиці 4.2 визначаємо коефіцієнти використання для вертикальних та горизонтальних електродів η_v та η_g та з їх врахуванням обчислюємо розрахунковий опір заземлювача за виразом:

$$R_g = \frac{R_v \cdot R_g}{R_v \cdot \eta_g + R_g \cdot \eta_v \cdot n}, \quad (4.6)$$

Для розрахунку заземлювача задаємось такими вихідними даними: виробничий цех площею $S=5000$ м² і з понижуючою підстанцією 10/0,4 кВ. Заземлювач передбачається виконати з вертикальних стрижневих електродів довжиною $l_v=5$ м, діаметром $d=12$ мм і відстанню між ними $a'=5$ м та горизонтальних електродів (сталева смуга перетином 440 мм) на глибині $t=0,8$ м. Розрахункова величина питомого опору ґрунту у місці спорудження захисного заземлення береться з таблиці 6.3 (для чорнозема $c=20$ Ом/м). Коефіцієнти вертикальної прокладки K_v і горизонтальної прокладки K_g приймаються з таблиці 6.4 (для третього кліматичного району $K_v=1,3$, $K_g=2,5$).

Талиця 4.1 – Коефіцієнт використання горизонтального стрічкового електрода, що з'єднує вертикальні електроди (труби, кутики і ін.) групового заземлювача

Відношення відстані між вертикальним і електродами до їх довжин	Число вертикальних електродів							
	2	4	6	10	20	40	60	100
Вертикальні електроди розміщені в ряд								
1.	0,8 5	0,7 7	0,7 2	0,6 2	0,4 2	-	-	-
2.	0,9 4	0,8 0	0,8 4	0,7 5	0,5	-	-	-
3.	0,9 6	0,9 2	0,8 8	0,8 2	0,6 8	-	-	-
Вертикальні електроди розміщені по контуру								
1.	-	0,4 5	0,4 0	0,3 4	0,2 7	0,2 2	0,2 0	0,1 9
2.	-	0,5 5	0,4 8	0,4 0	0,3 2	0,2 9	0,2 7	0,2 3
3.	-	0,7 0	0,6 4	0,5 6	0,4 5	0,3 9	0,3 6	0,3 3

Талиця 4.2 – Коефіцієнт використання вертикальних електродів групового заземлювача (труб, кутиків, і т. ін.) без урахування впливу стрічки зв'язку

Число заземлювачів	Число вертикальних електродів					
	1.	2.	3.	1.	2.	3.
	Електроди, розміщені в ряд			Електроди, розміщені по контуру		
2	0,85	0,91	0,94	-	-	-
4	0,73	0,83	0,89	0,69	0,78	0,85
6	0,65	0,77	0,85	0,61	0,73	0,80
10	0,59	0,74	0,81	0,56	0,68	0,76
20	0,48	0,67	0,76	0,47	0,63	0,71
40	-	-	-	0,41	0,58	0,66
60	-	-	-	0,39	0,55	0,64
100	-	-	-	0,36	0,52	0,62

Таблиця 4.3 – Розрахункові значення питомих електричних опорів ґрунтів

Ґрунт	Значення, які рекомендуються для розрахунків, Ом/м
Пісок	700
Супісок	300
Суглинок	100
Глина	40
Чорнозем	20
Торф	20

Таблиця 4.4 – Значення підвищувальних коефіцієнтів K_r , K_v за кліматичними зонами

Кліматична зона	Тип заземлювачів	
	Горизонтально прокладені заземлювачі (смугові та ін.) при глибині від поверхні ґрунту $t=0,8$ м, K_r	Стрижневі вертикально встановлені заземлювачі при глибині від поверхні землі $t=0,5-0,8$ м, K_v
I	4,5–7	1,8–2
II	3,5–4,5	1,6–1,8
III	2,5–4	1,4–1,6
IV	1,5–2	1,2–1,4

Розрахункові питомі опори ґрунту для вертикальних і горизонтальних заземлювачів визначаються відповідно так:

$$\rho_{роз.в} = K_v \cdot \rho, \text{ Ом/м}, \quad (6.7)$$

$$\rho_{роз.г} = K_r \cdot \rho, \text{ Ом/м} \quad (6.8)$$

Таким чином за формулами (6.7), (6.8), для чорнозему:

$$\rho_{роз.в} = 1,3 \cdot 20 = 26, \text{ Ом/м};$$

$$\rho_{роз.г} = 2,5 \cdot 20 = 50, \text{ Ом/м}.$$

У якості природного заземлювача використовуємо металеву технологічну конструкцію з опором розтікання природного заземлювача

$$R_e = 15 \text{ Ом}.$$

Здійснюємо розрахунок у відповідності з зазначеною послідовністю:

- згідно ПУЕ необхідний опір заземлюючого пристрою складає:

$$R_3 = 4 \text{ Ом};$$

за формулою (6.1) визначимо необхідний опір штучного заземлювача $R_{ш}$:

$$R_{ш} = \frac{15 \cdot 4}{15 - 4} = 5,5 \text{ Ом};$$

за формулами (4.2), (4.3) обчислюємо кількість вертикальних та довжин горизонтальних електродів:

$$n = \frac{4 \cdot \sqrt{5000}}{5} = 5 \text{ штук},$$

$$l_r = 2 \cdot 50 + 2 \cdot 100 = 300 \text{ м};$$

за формулами (4.4), (4.5) розраховуємо опори розтікання вертикального R_v та горизонтального R_h електродів:

$$R_v = \frac{26}{2 \cdot \pi \cdot 5} \left(\ln \frac{2 \cdot 5}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 3,3 + 5}{4 \cdot 3,3 - 5} \right) = 5,7 \text{ Ом},$$

$$R_h = \frac{50}{2 \cdot \pi \cdot 300} \cdot \ln \frac{2 \cdot 300}{0,5 \cdot 0,04 \cdot 0,8} = 0,3 \text{ Ом};$$

за даними таблиць (4.10, (4.11) обираємо коефіцієнти використання для вертикальних та горизонтальних електродів $K_v=0,4$ та $K_h=0,21$;

обчислюємо розрахунковий опір заземлювача R за формулою (4.6):

$$R_r = \frac{5,7 \cdot 0,3}{5,7 \cdot 0,21 + 0,3 \cdot 0,4 \cdot 56} = 0,22 \text{ Ом}.$$

Таким чином, проєктований заземлювач є контурним, складається з 56 вертикальних стрижневих електродів довжиною 5 м і діаметром 12 мм та горизонтального електрода у вигляді сталеві смуги довжиною 300 м, перетином 440 мм², занурених у землю на 0,8.

ВИСНОВКИ

В роботі було розроблено систему керування настільним екструдером для витягування оптичного волокна. Система реалізована на базі програмованого логічного контролера, який керує процесом екструзії, регулюючи температуру та змінюючи швидкість двигунів, при цьому контролюючи визначальний фактор, а саме силу натягу.

Для коректної і якісної роботи такої системи було промодельовано процес екструзії в системі MATLAB де визначили всі параметри ПД контролера для забезпечення якісного процесу виробництва. Також для більш якісного передбачення було спроектовано додатковий елемент компенсатора, який дозволяє зменшити похибку реакції системи на зміну технологічних параметрів.

Впровадження такої системи керування для настільних виробничих систем забезпечить не тільки можливість проводити виробництво, але і працювати у вигляді стенда для вивчення ПД регуляції та машинного навчання на реальних автоматизованих об'єктах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Growth in online education. Are providers ready? McKinsey. URL: www.mckinsey.com (дата звернення: 15.11.2025).
2. These 3 charts show the global growth in online learning. World Economic Forum. URL: www.weforum.org (дата звернення: 15.11.2025).
3. Terkowsky C., Frye S., May D. Online engineering education for manufacturing technology: Is a remote experiment a suitable tool to teach competences for ‘Working 4.0’? Eur. J. Educ. 2019. Vol. 54, no. 4. P. 577–590. DOI: 10.1111/ejed.12368.
4. Fiber Optic Manufacturers Double Draw Speed With UV LED Curing. Phoseon Technology. URL: phoseon.com (дата звернення: 15.11.2025).
5. Bradley R. Design and Manufacturing of Educational Fiber Extrusion Device and Smart Factory : Master’s thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2023.
6. Levi A. J. Design and Manufacturing of the Extrusion Assembly for an Advanced Process Control Educational Device : Master’s thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2022. URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/147393> (дата звернення: 15.11.2025).
7. Li R. Design and Manufacturing of the Filament Collection and Diameter Measurement Systems of Fiber Extrusion Device for Educational Purposes : Master’s thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2022. URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/147910> (дата звернення: 15.11.2025).
8. Rojrungsasithorn T. Factory and Material Flow Design for Mass Production of an Advanced Process Control Educational Device : Master’s thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2022. URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/147536> (дата звернення: 15.11.2025).
9. Alharbi K. Is Online Education Effective for Engineering Students? LinkedIn. URL: www.linkedin.com (дата звернення: 15.11.2025).

10. Kim D., Anthony B. Design and Fabrication of Desktop Fiber Manufacturing Kit for Education. ASME 2017 Dynamic Systems and Control Conference. 2017. P. V003T31A005. DOI: 10.1115/DSCC2017-5226.
11. Kim S., Kim D. D., Anthony B. W. Dynamic Control of a Fiber Manufacturing Process Using Deep Reinforcement Learning. IEEE/ASME Trans. Mechatron. 2022. Vol. 27, no. 2. P. 1128–1137. DOI: 10.1109/TMECH.2021.3070973.
12. Factory 4.0 Toolkit for Smart Manufacturing Training / J. D. Cuiffi et al. 2021 ASEE Virtual Annual Conference Content Access. 2021. URL: <https://peer.asee.org/factory-4-0-toolkit-for-smart-manufacturing-training> (дата звернення: 15.11.2025).
13. Design for Assembly (DFA) Principles Explained. Fractory. URL: fractory.com (дата звернення: 15.11.2025).
14. What is Design for Manufacturing or DFM? E. W. Manufacturing. URL: news.ewmfg.com (дата звернення: 15.11.2025).
15. What Is DFMEA? Design Failure Mode and Effect Analysis. Ansys. URL: <https://www.ansys.com/blog/what-is-dfmea> (дата звернення: 15.11.2025).
16. How to Perform a Root Cause Analysis. ProjectEngineer. URL: <https://www.projectengineer.net/how-to-perform-a-root-cause-analysis/> (дата звернення: 15.11.2025).
17. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 1. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-8052 від 28.05.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2013. – 256 с.
18. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-11650 від 16.07.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2014. – 312 с.
19. Микитишин А.Г., Митник, П.Д. Стухляк. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем: навчальний посібник – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. – 256 с.

20. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі : навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 с.
21. Введення в компютерну графіку та дизайн: Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 "Автоматизація, компютерно-інтегровані технології та робототехніка"/Укладачі: О.В. Тотосько, П.Д. Стухляк, А.Г. Микитишин, В.В. Левицький, Р.З. Золотий - Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023 - 304с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41166>.
22. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>.