

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Удосконалення методу намотування дротів на станках з ЧПУ у
роботизованому виробництві
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи КТРСм-22-1
Толстий М.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітньо-професійна програма
Комп'ютеризовані та робототехнічні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Олександров Ю.М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«22» січня 2024 р.



Толстий М. В.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ
 Кафедра _____ КІТАР
 Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)
 Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
 Тип програми _____ Освітньо-професійна
 Освітня програма _____ Комп'ютеризовані та робототехнічні системи
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«03» листопада 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Толстому Михайлу Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення методу намотування дротів на станках з ЧПУ у роботизованому виробництві
Затверджена наказом по університету від 03.11.2023 № 1288Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 22.01.2024
3. Вихідні дані до роботи _____
 - 3.1 Напруга живлення плати керування – 5 В, станок з ЧПУ – 220 В;
 - 3.2 Метод системи контролю використаний у роботі – система контролю на основі датчиків;
 - 3.3 Тип датчика – тензорезистивний;
 - 3.4 Середовище для створення програми – Arduino IDE;
 - 3.5 Використання методу контролю натягу мідного дроту.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
 - 4.1 Вступ;
 - 4.2 Аналіз технічного завдання;
 - 4.3 Розроблення автоматизованої системи контролю намотування дроту;
 - 4.4 Створення прототипу та його перевірка;
 - 4.5 Питання пов'язані з охороною праці;
 - 4.6 Висновки та перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.pptx). 16 – с. Формату А4.

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	06.11.2023	Виконано
2	Аналіз методу контролю з застосуванням сенсорів та датчиків	13.11.2023	Виконано
3	Вибір методу контролю для застосування	20.11.2023	Виконано
4	Вибір обладнання для розробки макету	27.11.2023	Виконано
5	Розробка структурної схеми	06.12.2023	Виконано
6	Розробка алгоритму роботи програми	15.12.2023	Виконано
7	Розробка механізму створення натягу для СК	19.12.2023	Виконано
8	Калібрування системи контролю	04.01.2024	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки	16.01.2024	Виконано
10	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання 03.11.2023 р.

Студент _____
(підпис)

Толстий М.В.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____

проф. Олександров Ю.М.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 108 с., 2 табл., 49 рис., 2 дод., 26 джерел.

НАТЯГ, ПРИСТРІЙ НАМОТУВАННЯ ДРОТУ, РОЗРИВ, РОЛИКОВЕ ГАЛЬМО, СИСТЕМА КОНТРОЛЮ, СИСТЕМА РОЛИКІВ, УКЛАДАЧ.

Об'єкт дослідження – процес контролю намотування металевих дротів на основі даних з сенсорів.

Предмет дослідження – системи та методи контролю на роботизованому виробництві з використанням станків ЧПУ.

Мета роботи – удосконалення методу контролю системи намотування дроту на станках з ЧПУ з врахуванням параметрів зміни натягу.

Методи дослідження – аналіз існуючих прототипів та методів намотування.

Практична цінність полягає у зменшенні витрат та часу на виготовлення готової продукції, за рахунок зменшення кількості бракованих деталей, які так чи інакше виникають під час намотування.

Отримані результати розробки можна застосовувати у дослідженнях методів намотування що допоможе контролювати процес і мінімізувати затрати від браку. Також результат розробки буде передано для використання в одиничному виробництві.

Результати кваліфікаційної роботи апробовані на збірниках наукових статей [1-2].

THE ABSTRACT

Explanatory note: 108 pp., 2 tab., 49 fig., 2 app., 26 sources.

BREAKING, CONTROL SYSTEM, ROLLER BRAKE, ROLLER SYSTEM, STACKER, TENSION, WIRE WINDING DEVICE.

Object of research – is the process of controlling the winding of metal wires based on sensor data.

The subject of research are systems and methods of control in robotic production using CNC machines.

Purpose – to improve the method of controlling the wire winding system on CNC machines, taking into account the parameters of tension change.

Research methods – analysis of existing prototypes and winding methods.

The practical value is to reduce the cost and time for the manufacture of finished products by reducing the number of defective parts that somehow arise during winding.

The results of the development can be used in the research of winding methods, which will help to control the process and minimize the costs of rejects. The development result will also be transferred for use in one-off production.

The results of the qualification work have been tested in collections of scientific articles [1-2].

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	9
Вступ.....	10
1 Аналіз технічних комплексів намотування	12
1.1 Промислові технічні комплекси	12
1.2 Автоматизований пристрій намотування дроту	15
1.3 Постановка завдання на розробку	25
1.4 Висновки до першого розділу.....	25
2 Методи та системи контролю натягу	26
2.1 Загальні відомості про системи та методи контролю	26
2.2 Метод контролю з використанням систем технічного зору	28
2.3 Методи контролю натягу.....	29
2.4 Системи контролю натягу дроту	30
2.5 Системи контролю діаметра котушки	30
2.6 Системи сенсорів і вимірювального обладнання	36
2.7 Метод обраний для реалізації	43
2.8 Електронна компонентна база	44
2.9 Висновки до другого розділу	48
3 Розробка та калібрування системи натягу	49
3.1 Розробка структурної схеми макету.....	49
3.2 Збірка компонентної бази для тестування.....	51
3.3 Розрахунок теоретичних значень для розриву.....	52
3.4 Експериментальна перевірка теоретичних значень	55
3.5 Розробка роликового гальма	62
3.6 Розробка програмного забезпечення для контролю натягу.....	66
3.7 Розрахунок природнього освітлення робочого простору	68

	8
3.8 Висновки до третього розділу	70
Висновки	71
Перелік посилань.....	72
Додаток А Апробація результатів наукових досліджень.....	76
Додаток Б Демонстраційний матеріал	108

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АПНД – автоматизований пристрій намотування дроту;
- АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
- ІЧ – інфрачервоний;
- КД – кроковий двигун;
- КІТАР – комп’ютерно-інтегровані технології, автоматизація та робототехніка;
- ПЛК – програмований логічний контролер;
- ПОІ – пристрій обробки інформації;
- ПК – персональний комп’ютер;
- РК – рідкокристалічний;
- СТЗ – системи технічного зору;
- ТЗ – технічне завдання;
- ТК – технічний комплекс;
- УЗ – ультразвуковий;
- ЧПУ – чисельно-програмне управління;
- ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

ВСТУП

Сучасні виробничі системи, зокрема роботизовані лінії виробництва, стикаються з важливою проблемою – оптимізацією процесу намотування дротів на станках з чисельно-програмним управлінням (ЧПУ). Завдяки росту автоматизації та використанню роботів у виробництві, виникає велика потреба в удосконаленні цього процесу, оскільки від нього залежать якість та продуктивність виробництва.

Із застосуванням Інтернету речей та аналізу даних у реальному часі з'являється можливість збирати та обробляти великі обсяги інформації, що відкриває шлях до розробки більш точних та ефективних систем контролю намотування дротів на станках з ЧПУ.

Оптимізація методу намотування дротів стає критично важливим завданням, оскільки вона сприяє підвищенню точності та продуктивності виробництва. Застосування новітніх технологій та сенсорних систем дозволяє створити системи контролю, які можуть адаптуватися до змінних умов виробництва, оптимізувати процес намотування та гарантувати високу якість продукції.

Важливо враховувати, що професійна практика відіграє ключову роль у розвитку студентів, надаючи їм навички самостійного аналізу та оптимізації методів намотування дротів на станках з ЧПУ в конкретних виробничих умовах.

Об'єкт дослідження – процес контролю намотування металевих дротів на основі даних з сенсорів.

Предмет дослідження – системи та методи контролю на роботизованому виробництві з використанням станків ЧПУ.

Мета роботи – удосконалення методу контролю системи намотування дроту на станках з ЧПУ з врахуванням параметрів зміни натягу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати типи методів контролю;
- провести аналіз існуючих комплексів контролю на станках з ЧПУ;
- розробити структурну схему макету;
- провести підбір елементної та електронної компонентної бази;
- розроблення методу контролю системи намотування дроту;
- провести теоретичні розрахунки запропонованого методу;
- провести експеримент для перевірки теоретичних розрахунків;
- розробити програму керування для системи контролю натягу;
- оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [3], а також з

методичними вказівками и з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» [4-5], та згідно положень [6-10].

1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ НАМОТУВАННЯ

1.1 Промислові технічні комплекси

Технічні комплекси (ТК) намотування дроту вже виробляються в промислових кількостях, та ефективно виконують задачі на підприємствах. ТК які проводять намотування хаотичним методом в більшості випадків мають вузький функціонал (наприклад функції розмотування), і через це не будуть розглянуті через неактуальність, та відповідно даному технічному завданню (ТЗ) мають вузький функціонал роботи [11].

ТК котрі виконують методи намотування спіральним чи лінійним методом мають більш широкий функціонал, мають більш високоточне оснащення та різні параметри системи намотування.

Наприклад, є доцільним розглянути ТК намотування дроту виробництва компанії Supertek, модель ED-AUF rewinder (рис. 1.1) [12].



Рисунок 1.1 – Технічний комплекс Supertek ED-AUF rewinder

Даний ТК має наступні технічні характеристики:

- прецизійний прямий привід з швидкістю від 0,0 об/хв (4 Нм) до 300 об/хв (1 Нм);
- спіральний метод намотування;
- тримач для котушки діаметром до 260 мм, довжиною до 200 мм;
- вага котушки до 3 кг;
- обертовий вал з приймальним диском, діаметр валу 15 мм і швидкозамикаючим замком;
- траверс з лінійним приводом високої роздільної здатності, важіль переміщення з направляючим роликком і енкодером для вимірювання довжини та швидкості;
- зв'язок через RS485 і / або USB;
- шафа керування, алюмінієва монтажна пластина та регульовані ніжки;
- розміри: висота 40 см, ширина 40 см, глибина 50 см;
- підключення: 110/230 В, 50/60 Гц.

Аналізуючи даний ТК, можна зробити висновок, що даний комплекс може здійснювати намотування спіральним методом, варіативний у виборі каркаса для котушки і параметрів систем намотування відповідно. Також має промислові інтерфейси передачі даних про стан системи, що робить її більш зручною з точки зору моніторингу та контролю над процесом намотування.

ТК виробництва Winding Technology, модель WT 500 – це підлогова машина для намотування котушок (рис. 1.2), яка підходить для виробництва котушок середнього розміру та трансформаторів [13]. Вона виготовлена з високоякісної чавунної рами та міцних механічних частин. Головний шпindel приводиться в рух двигуном потужністю 2,2 кВт. 2-ступінчаста коробка передач і шків між двигуном і коробкою передач встановлюються в стандартній комплектації, щоб забезпечити широкий діапазон швидкостей і крутних моментів. Каретка для направляючої дроту встановлена на лінійних напрямних із

хромованої сталі та приводиться в рух серводвигуном потужністю 400 Вт і прецизійним кульковим гвинтом. Енкодер на головному шпинделі забезпечує високу продуктивність і точне переміщення направляючої дроту.



Рисунок 1.2 – Технічний комплекс Winding Technology WT 500

Більш точні характеристики наведені нижче:

- лінійний метод намотування;
- діаметр котушки до 500 мм;
- ширина котушки до 850 мм;
- максимальна вага до 500 кг;
- вага 500 кг;
- прецизійний привід що має швидкість та крутний момент від 91 об/хв (230 Нм) до 1400 об/хв (15 Нм);

- крок укладача від 0.001 на 150 мм;
- розміри: висота 165 см, ширина 150 см, глибина 70 см;
- підключення: 110/230 В, 50/60 Гц.

Модель WT 500 – це ТК для намотки великих котушок, який може укласти дуже широкий спектр товщини дроту, та укласти дріт лінійно, тобто формуючи рядки плоских спіралей паралельних до бічних стінок. Дана модель також має візуальний інтерфейс для контролю параметрів системи намотування.

1.2 Автоматизований пристрій намотування дроту

Модель що було виготовлено в ході вирішення технічного завдання кваліфікаційної роботи (рис. 1.3), а саме автоматизований пристрій намотування дроту (АПНД), було використано для виготовлення невеликої кількості котушок. Для покращення якості кінцевого виробу потрібно розробити додатковий модуль, який буде контролювати натяг дроту для його рівномірної укладки та пришвидшення процесу намотування.

Для різної товщини дроту потрібно підбирати різну швидкість обертання котушки, адже саме так було реалізовано систему намотування. Котушка обертається на відстані від укладача, та існують випадки коли дріт рветься від надлишкового натягу дроту, який спричиняється високою швидкістю намотування. Якщо швидкість, навпаки, недостатня, то система розрахована на укладання спіральним методом буде створювати напливи, а це вже нерівномірне укладання і як наслідок брак чи просто неякісний виріб.

Завдання для вдосконалення виготовленого пристрою намотування полягає у використанні необхідного методу контролю намотування, що полягає у використанні системи, що дозволить відстежувати натяг дроту і змінювати його для виключення варіанту напливу або розриву дроту. Методи контролю котрі можна використати будуть розглянуті у цьому розділі.



Рисунок 1.3 – Автоматизований пристрій намотування дроту

У цьому пристрої застосовано напрямні та механізм гвинт-гайки для забезпечення рівномірного прямолінійного руху. На напрямних розміщено каретку з натягувачем, переміщення дроту вздовж осі обертання гвинта. Важливо відзначити, що в даному випадку забезпечено взаємодію між компонентами приводу, зокрема між кінематичною схемою, гвинтом та напрямними. Для досягнення цього був вибраний відповідний алюмінієвий профіль з прямокутним перетином (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Основа закріплення напрямних у вигляді алюмінієвого профіля

На основі були створені отвори для кріплення опори напрямних з метою забезпечення паралельного розташування цих елементів. Опору зображено на рисунку 1.5.

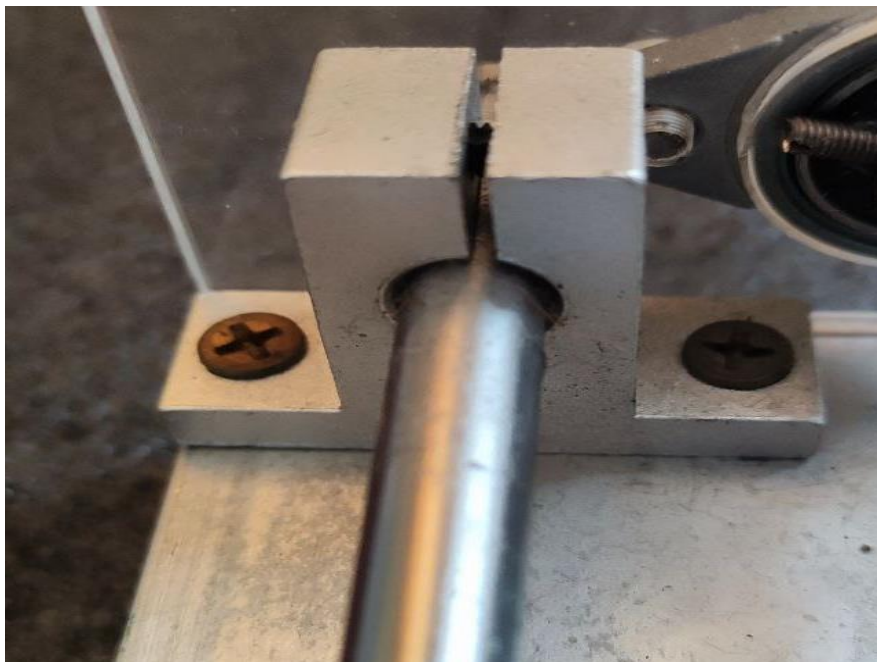


Рисунок 1.5 – Опора напрямної

Перед установкою опор напрямних на самі напрямні монтується каретка укладача. Ця каретка включає в себе гайку для передачі "гвинт-гайка" та неодимовий магніт, який є необхідним для взаємодії з датчиком Холла (рис. 1.6). Крім того, під час установки у гайку передачі був також встановлений гвинт для забезпечення зручності подальшого монтажу.

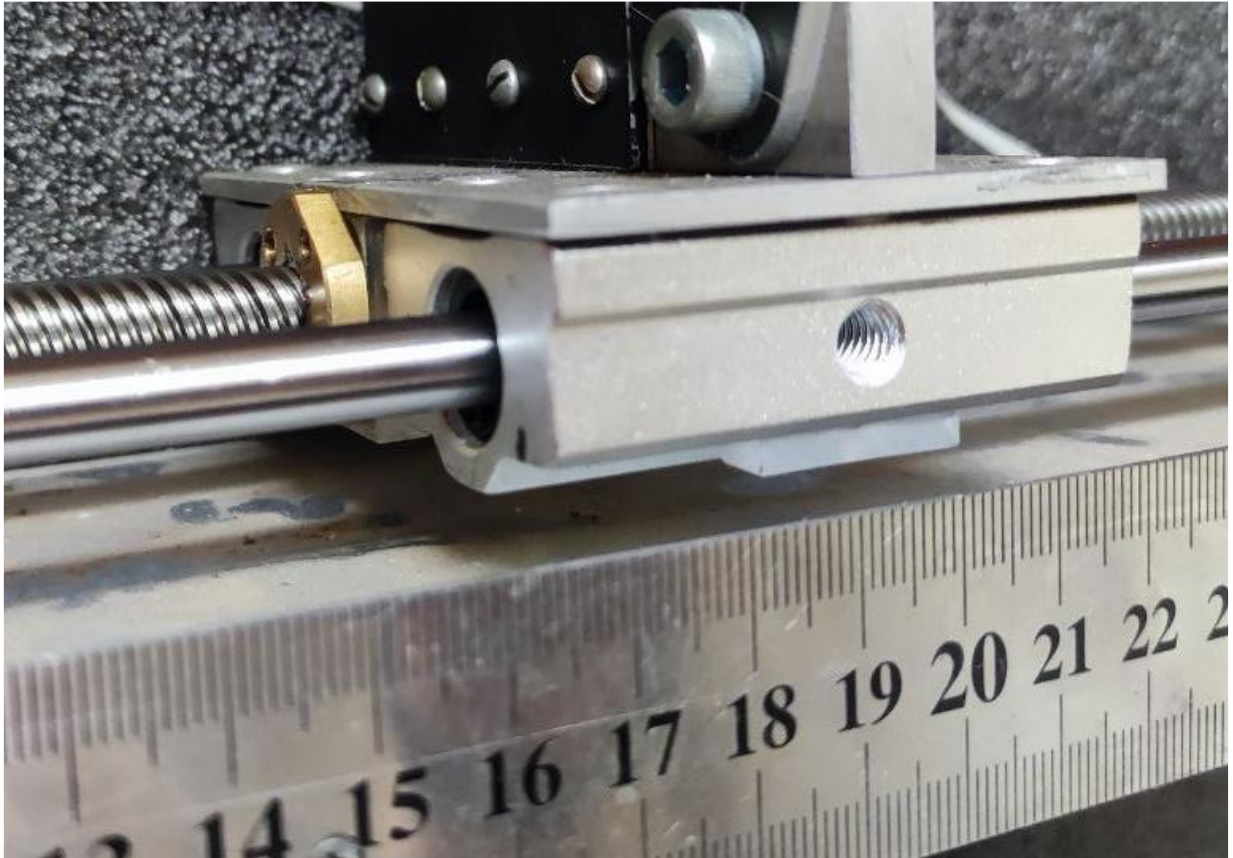


Рисунок 1.6 – Каретка укладача з гайкою та магнітом

Для зменшення опору тертя та забезпечення плавного обертання гвинта навколо своєї осі були встановлені шарикові підшипники на обох стінках основи (рис. 1.7). Вздовж основи була прикріплена лінійка, призначена для монтажу повзунків із датчиками Холла. Ці повзунки виконують функцію датчиків кінцевого положення. Щоб забезпечити зручне регулювання положення датчиків

кінцевого положення, повзунки фіксуються на лінійці за допомогою гвинтиків з зручними накладками.

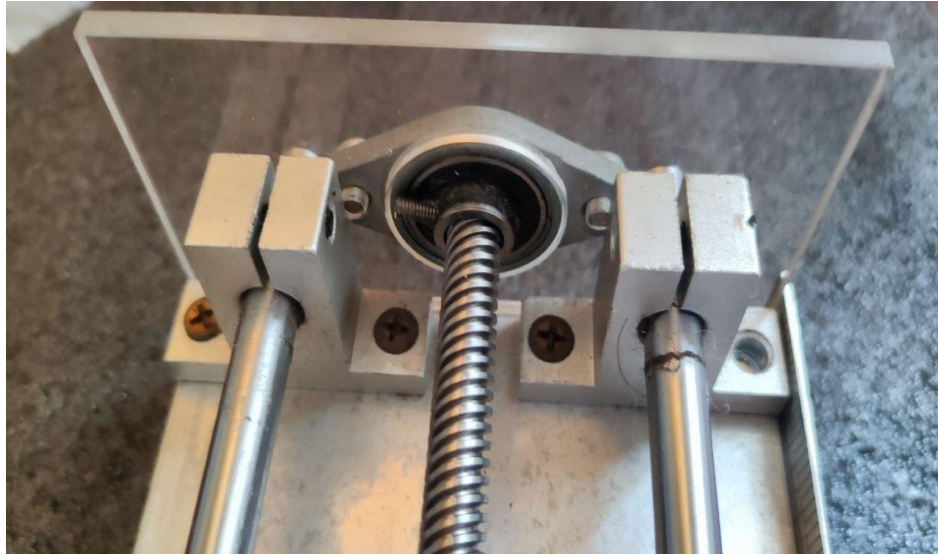


Рисунок 1.7 – Крайня стінка основи укладача з встановленим на неї шариковим підшипником

Один з повзунків зображено на рисунку 1.8.

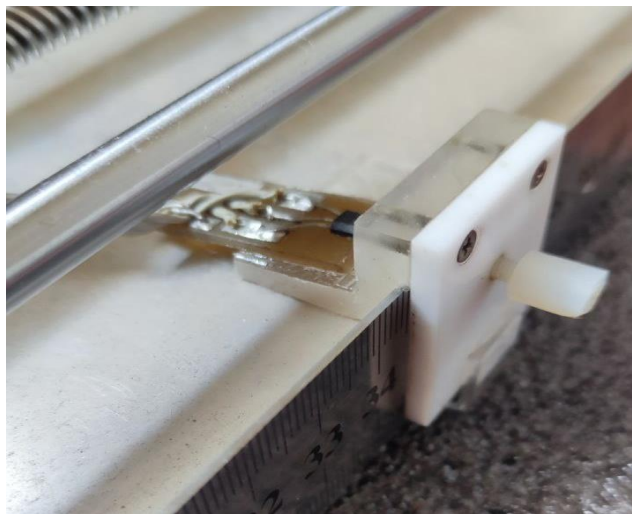


Рисунок 1.8 – Повзунок з розташованим на ньому датчиком Холла

Кроковий двигун (КД), драйвер управління та реле живлення драйвера були відокремлені і розташовані у виділеному місці. Кроковий двигун було з'єднано з гвинтом за допомогою спіральної муфти та закріплено до основи. Додатково, для візуального контролю роботи прототипу приводу напрямних деталей були виведені світлодіоди, які відображають режим роботи та сигналізують про роботу датчиків кінцевого положення та наявність живлення драйвера. Кроковий двигун, драйвер, реле та світлодіоди зображені на рисунку 1.9.



Рисунок 1.9 – КД з'єднаний муфтою, драйвер, реле та світлодіоди встановлені на основу укладача

На каретці була встановлена система роликів, яка забезпечує плавне переміщення дроту від вихідної котушки до котушки, на яку він намотується.

Блок намотування включає в себе контролер керування, а саме Arduino Nano, перетворювач живлення, реле живлення КД намотувача, драйвер КД, рідкокристалічний (РК) дисплей, клавіатуру та набір перемикачів для введення даних та керування процесом намотування. Усі електронні компоненти були вмонтовані на окремі діелектричні пластинки з метою запобігання впливу статичної напруги та для полегшення монтажу.

КД намотувача було з'єднано спіральною муфтою з патроном від свердлильного верстата. Це конструктивне рішення забезпечує зручне монтажу та демонтажу котушки, яку намотується, а також кріплення для неї, оскільки форма каркасів котушок може бути різноманітною. Патрон та його опори зображені на рисунку 1.10.



Рисунок 1.10 – Патрон закріплений на опорі з підшипниками

КД та патрон закріплені на верхній стінці блоку і встановлені на опори з шариковими підшипниками для усунення тертя та компенсації сили тяжіння, яка впливає на патрон. РК-дисплей встановлюється з внутрішньої сторони на передню панель. Вигляд дисплея, розташованого всередині блока намотування, зображено на рисунку 1.11.



Рисунок 1.11 – РК-дисплей вмонтований у блок намотування

Клавіатура була розміщена під дисплеєм для зручності візуального контролю за введеними даними. Крім того, клавіатура використовується для управління процесом намотування, зокрема на ній розташовані кнопки "Старт" і "Стоп". Кнопки клавіатури, розташовані під дисплеєм, обладнані графічними маркуваннями від 0 до 9, двома функціональними кнопками, а також кнопками "Старт" і "Стоп", які виділяються синього та червоного кольору відповідно. Зовнішній вигляд клавіатури разом з дисплеєм представлено на рисунку 1.12.



Рисунок 1.12 – Клавіатура та дисплей, вмонтовані у блок намотування

Тумблери керування що відповідають за режими роботи, розташовані справа від дисплея, та зображені на рисунку 1.13.



Рисунок 1.13 – Тумблери керування блоком намотування

Компоненти у готовій збірці блоку намотування зображено на рисунках 1.14-1.15.



Рисунок 1.14 – Блок намотування АПНД спереду

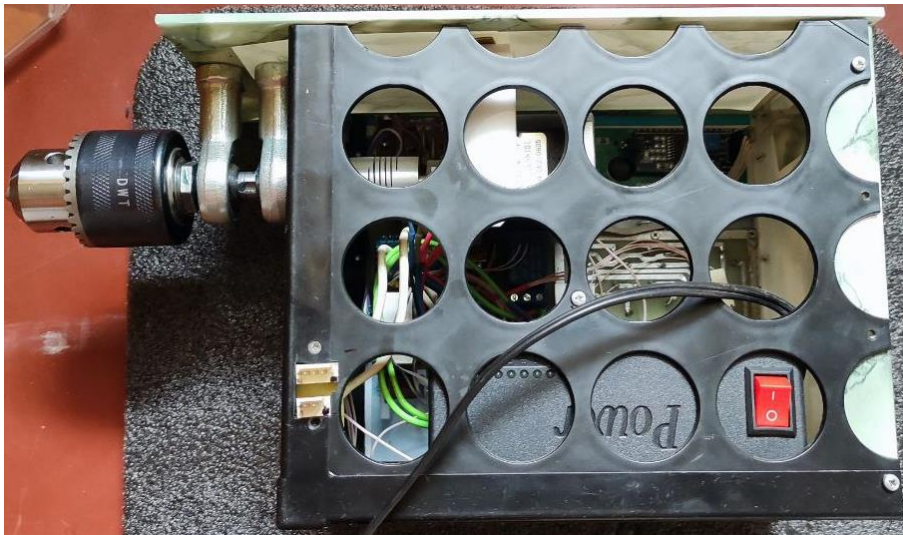


Рисунок 1.15 – Блок намотування АПНД ззаду

1.3 Постановка завдання на розробку

Враховуючи те що, метою кваліфікаційної роботи є розроблення системи контролю намотування дроту, для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити структурну схему макету;
- провести підбір елементної та електронної компонентної бази;
- розроблення методу контролю системи намотування дроту;
- провести теоретичні розрахунки запропонованого методу;
- провести експеримент для перевірки теоретичних розрахунків;
- розробити програму керування для системи контролю натягу;
- розробити прототип системи натягу.

1.4 Висновки до першого розділу

У даному розділі проведено аналіз програмно-технічних комплексів намотування дроту. Після проведення аналізу їх характеристик, а також наведеного опису автоматизованого пристрою намотування дроту, як пристрою до якого можливо розробити систему контролю для перевірки запропонованого методу. Проведений аналіз дозволив поставити наступні завдання на подальше дослідження, а саме розробити метод контролю системи намотування дроту, провести теоретичні розрахунки запропонованого методу та перевірити їх за допомогою експериментального дослідження.

2 МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ НАТЯГУ

2.1 Загальні відомості про системи та методи контролю

Системи контролю, також відомі як системи керування, представляють собою комплексне поєднання обладнання, програмного забезпечення та процесів, розроблене для вимірювання, моніторингу, регулювання та керування різними аспектами конкретного системного об'єкта або процесу. Ці системи знаходять своє застосування в різних галузях, таких як виробництво, транспорт, автоматизація, енергетика, медицина, телекомунікації та інші.

Основні функції та компоненти систем контролю включають в себе:

- збір інформації – вони вимірюють і збирають дані про стан системи або процесу за допомогою датчиків, сенсорів та інших пристроїв;
- сенсори і вимірювальне обладнання – це обладнання призначене для збору даних про стан системного об'єкта або процесу. Це може включати в себе датчики тиску, температури, вологості, рівня, швидкості, чутливості до світла та інші, які вимірюють фізичні або хімічні параметри;
- керуюче обладнання – це обладнання відповідає за зміну стану системи на основі даних, зібраних сенсорами. Це може включати в себе приводи, мотори, клапани, реле та інше, які регулюють роботу системного об'єкта;
- контролери – це електронні пристрої або програмне забезпечення, які обробляють дані з сенсорів та приймають рішення щодо керування системою. Вони можуть бути програмованими логічними контролерами (ПЛК), мікроконтролерами або програмними контролерами на основі комп'ютерів;
- програмне забезпечення – системи контролю використовують програмне забезпечення для обробки даних, взаємодії з користувачем, регулювання та

моніторингу процесу. Це включає в себе програми для збору даних, алгоритми керування, інтерфейси користувача та інше;

– інтерфейси з оператором – системи контролю можуть мати інтерфейси для взаємодії з оператором або обслуговуючим персоналом. Це може бути людський інтерфейс на основі графічних екранів, сенсорних панелей або командний рядок;

– системи збереження та обробки даних – дані, зібрані системою контролю, можуть зберігатися, а також піддаватися аналізу для моніторингу та вирішення проблем. Для цього використовуються системи збереження даних і обробки, такі як бази даних та аналітичні інструменти.

Загалом, системи контролю спроектовані для автоматизації та оптимізації різних процесів і мають застосування в багатьох галузях, зокрема в виробництві, транспорті, автоматизації, енергетиці, медицині, телекомунікаціях та інших. Вони дозволяють підвищити ефективність, забезпечити безпеку та забезпечити контроль над різними системами і процесами.

Системи контролю деталей на виробництві відіграють важливу роль у забезпеченні якості продукції та відповідності стандартам. Існують різні види таких систем, кожний з яких має свої переваги та недоліки.

Наприклад:

– візуальний контроль, використовується для перевірки візуальних параметрів, таких як розмір, форма, колір і текстура деталей. Перевагами цього методу є низька вартість впровадження і здатність виявляти видимі дефекти. Однак він обмежується об'єктивністю спостерігача та не завжди ефективний для незримих дефектів;

– вимірювальні системи контролю, використовуються для точного вимірювання розмірів та геометричних параметрів деталей. Вони дозволяють виявити мікроскопічні дефекти, але можуть бути дорогими та вимагати точності при налаштуванні;

– системи машинного зору та штучного інтелекту, використовують комп'ютерне зорове сприйняття та алгоритми машинного навчання для автоматичного виявлення дефектів. Ці системи можуть бути швидкими та надійними, але вимагають великої кількості даних для навчання.

Перевагами систем контролю в рамках процесу намотування є підвищення якості продукції, зменшення відходів та зниження витрат на перевірку якості. Однак у них можуть бути недоліки, такі як високі витрати на впровадження, потреба в кваліфікованих операторах, та обмеження в ефективності виявлення дефектів, які не завжди видимі або піддаються легкому вимірюванню.

2.2 Метод контролю з використанням систем технічного зору

З погляду отримання вимірювальної інформації оптико-електронними системами метод контролю з використанням систем технічного зору можна сприймати як визначення геометричних параметрів об'єктів щодо їх зображення.

Для оцінки геометричних параметрів об'єктів в даний час знаходять широке застосування системи технічного зору (СТЗ) [14].

Сучасна СТЗ включає три основні компоненти:

- пристрій отримання зображення (камера);
- інтерфейс передачі даних від камери до пристрою обробки інформації;
- пристрій обробки інформації (ПОІ) зі спеціалізованим програмним забезпеченням (наприклад, NI Vision Builder), на основі якого пишеться алгоритм обробки зображення.

Отримання зображення об'єкта (вироби, деталі, заготовки) забезпечується камерами поєднанні з оптичними елементами та пристроями освітлення.

Точність сприйняття вимірювальної інформації СТЗ залежить від досконалості оптичної частини. Сучасні об'єктиви проектуються з

використанням комп'ютерів проведення складних розрахунків та моделювання високого рівня, але це не дає можливості повністю усунути усі спотворення.

Тому особливу увагу при впровадженні систем технічного зору слід приділяти метрологічну оцінку вимірювань та проведення калібрування із застосуванням тест-об'єктів.

Найбільш перспективним є метод калібрування камери зі знімків спеціального тест-об'єкта. Сутність методу – отримання калібрувальних коефіцієнтів, що враховують вплив всіх систематичних спотворень, що існують під час реальної зйомки. І подальша програмна компенсація спотворень на основі математичної моделі, що описує спотворення. Даний метод калібрування є найпоширенішим на даний час і легко реалізується на практиці.

Аналіз існуючих відомостей про методи компенсації похибок та створення узагальненої моделі передачі в ОЕС дозволили розробити алгоритм для комплексної компенсації похибок оптико-електронної системи контролю геометричних параметрів [15]. Алгоритм включає наступні етапи: віднімання фону, фільтрацію шумів матриці камери технічного зору, процедуру калібрування з використанням тест-об'єктів, порогову бінаризацію зображення.

2.3 Методи контролю натягу

Існує декілька способів вимірювання та розрахунку натягу дроту. Найточніший із них полягає у вимірюванні натягу за допомогою тензометра, який може бути як частиною системи контролю натягу, так і встановлений окремо.

Якщо немає можливості використовувати датчик, але система контролю натягу включає в себе вагання, що амортизує плаваючий валик, то натяг можна обчислити, враховуючи навантаження на валик та геометрію проводки через

амортизатор. Проте слід пам'ятати, що цей метод не є точним, якщо валик знаходиться в крайньому положенні.

Для приблизного вимірювання натягу на розмотуванні з катушковим гальмом можна використовувати звичайний безмін. Для цього необхідно пропустити кінець дроту через напрямний валик, прикріпити до нього безмін і потягнути. Вага, яку покаже безмін в той момент, коли катушка почне обертатися, дозволить розрахувати натяг дроту при цьому гальмі. Важливо відзначити, що цей метод не підходить для оцінки натягу на пристроях намотування та розмотках, які обладнані двигуном, а не гальмом.

Якщо відомо значення гальмівного моменту на розмотуванні, то оцінку натягу можна приблизно розрахувати на основі гальмівного моменту та радіуса катушки.

2.4 Системи контролю натягу дроту

Найдешевшим методом керування натягом дроту є ручна установка параметрів двигунів або гальм, що регулюють швидкість обертання валиків і катушок. Однак очевидно, що подібний метод регулювання може бути заснований тільки на досвіді персоналу, що обслуговує обладнання, і ризик помилки при його використанні дуже великий. Регулювати параметри приводів розмотування та намотування вручну взагалі вкрай складно через постійну зміну мас і діаметрів катушок.

2.5 Системи контролю діаметра катушки

Системи контролю діаметра катушки виявляються корисними для регулювання натягу дроту під час розмотування та намотування. Однак у них є загальний недолік, а саме неможливість врахування всіх факторів, що впливають

на натяг дроту, і відсутність можливості контролю натягу в певних технологічних відрізках. В сучасних системах такого типу використовуються три типи датчиків:

- механічні;
- ультразвукові;
- тахометричні.

Механічний датчик для вимірювання діаметра котушки представляє собою ролик, який може коливатися (рис. 2.1), або валик, який за допомогою пружини або пневматичного пристрою натискається на зовнішню поверхню котушки [16]. Діаметр котушки визначається на основі кутового положення важеля, на якому закріплений ролик або валик. Зазвичай для вимірювання кута використовується потенціометр.

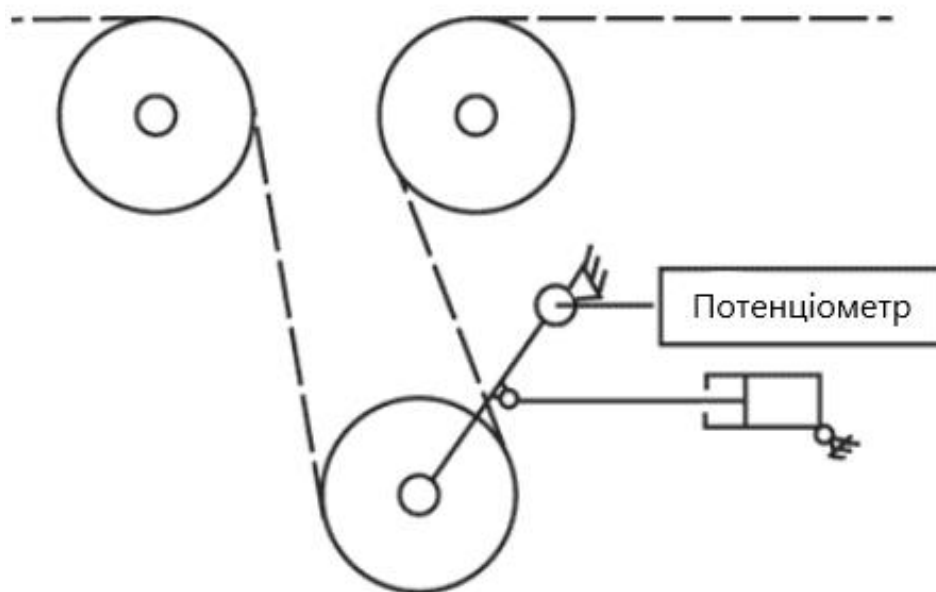


Рисунок 2.1 – Система контролю положення за допомогою плаваючого валика, що коливається

Механічні датчики мають переваги, такі як простота, низька вартість та легкість установки. Однак у них є певні недоліки, такі як неможливість

компенсувати відхилення котушки від циліндричної форми (у випадку овального поперечного перерізу), ускладнення процесу заміни котушки, менша надійність порівняно з іншими системами та можливість механічного впливу на поверхню матеріалу.

Ультразвуковий датчик складається з джерела та приймача ультразвуку (рис. 2.2). Джерело генерує сигнал, який відбивається від поверхні котушки і фіксується приймачем. Діаметр котушки обчислюється на основі часу, який потрібен сигналу, щоб пройти від джерела до приймача [17].

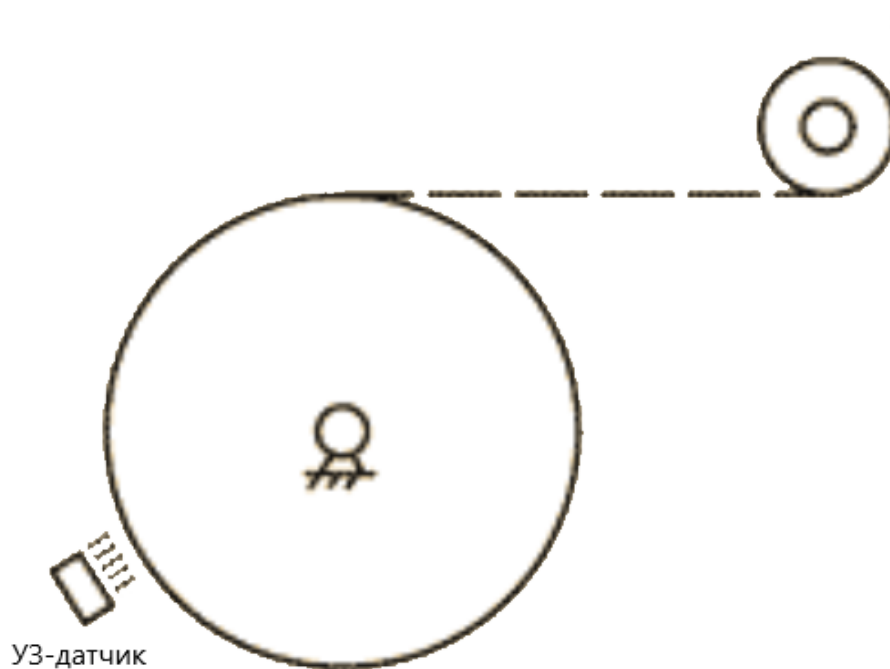


Рисунок 2.2 – Система контролю діаметра за допомогою ультразвукового датчика

Ультразвукові датчики мають численні переваги, такі як проста конструкція, відносна доступність, компактність, легкість встановлення, здатність враховувати відхилення котушки від циліндричної форми, надійність та відсутність необхідності в контакті з поверхнею котушки.

Серед недоліків ультразвукових датчиків можна відзначити появу помилок вимірювань при наявності об'єктів між датчиком і поверхнею котушки, особливо при використанні поглинаючих ультразвук матеріалів, а також при відхиленнях кутового положення датчика від позиції, в якій проводилося калібрування.

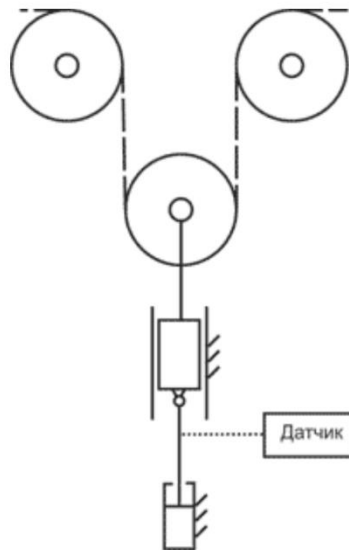


Рисунок 2.3 – Система контролю положення плаваючого валика що лінійно переміщується

Існують системи контролю положення плаваючого валика, які дозволяють компенсувати зміни натягу дроту. Ці валики встановлені на опорах, що рухаються лінійно або обертаються, подібну систему зображено на рисунку 2.3. Коли натяг дроту змінюється, валик відхиляється від нульового положення, що дозволяє коригувати параметри приводу дротопровідних валиків та підтримувати натяг на стабільному рівні. Такий контроль триває, доки плаваючий валик знаходиться в межах робочої зони між крайніми положеннями. Після досягнення валиком крайнього положення, контроль над натягом втрачається.

Системи з плаваючими валиками (рис. 2.4) мають просту конструкцію, вони дешевші в порівнянні з іншими системами з амортизаторами і мають велику

робочу зону. Серед недоліків можна відзначити необхідність врахування ваги валика та відносно великі габарити.

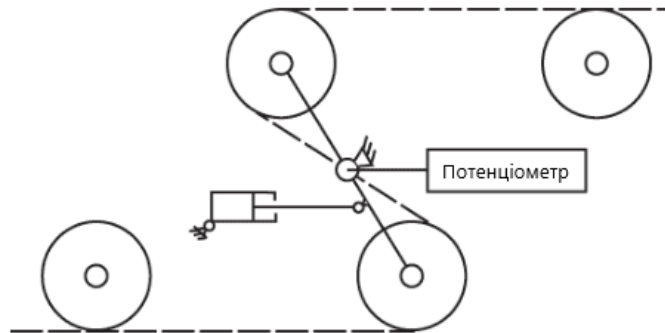


Рисунок 2.4 – Системи контролю положення плаваючого валика

Системи з лінійно переміщуваним валиком відрізняються компактністю та мають велику робочу зону для валика. Однак вони мають недоліки, такі як необхідність врахування ваги валика, складніша конструкція і вища вартість.

Ротаційні системи включають пару валиків, які врівноважують один одного, що дозволяє уникнути необхідності враховувати їхню вагу. Ця компактна система має мінімальну інерційність. Проте має недоліки, такі як висока вартість та обмежена робоча зона.

Системи з плаваючими валиками є універсальними та дозволяють компенсувати вплив всіх факторів на натяг дроту. Щоб зменшити помилки, викликані інерцією плаваючих валиків, їх роблять якомога легкими. Рекомендується використовувати валики зі зниженим тертям. Для уникнення впливу ваги валиків на точність контролю натягу дроту, вони можуть бути встановлені у ротаційних конструкціях або використовувати лінійну схему з переміщенням валиків у горизонтальній площині.

Величина натягу дроту визначається зусиллям, прикладеним до осі валика (або пари валиків у ротаційних пристроях). Навантаження плаваючих валиків

раніше здійснювалося за допомогою вантажів, зараз – за допомогою пневматики. Пневматичні циліндри забезпечуються електронними системами управління, які дозволяють плавно регулювати тиск повітря та відповідно плавно змінювати величину натягу.

Для визначення позиції валика у старих системах використовувалися аналогові потенціометри. Оскільки ці прилади містять механічні елементи та їх точність з часом зменшується, у сучасному устаткуванні застосовуються цифрові датчики різних типів.

У тензометричних системах контролю, приклад котрих зображено на рисунку 2.5, встановлюють датчики, які приєднуються до направляючого валика, щоб виміряти навантаження, яке зумовлене натягом дроту. Натяг обчислюється з урахуванням кута, під яким дріт обгортає валик. Порівнявши виміряні дані з заданими, система може ввести корекції у параметри приводів дротопровідних валиків, якщо це необхідно.

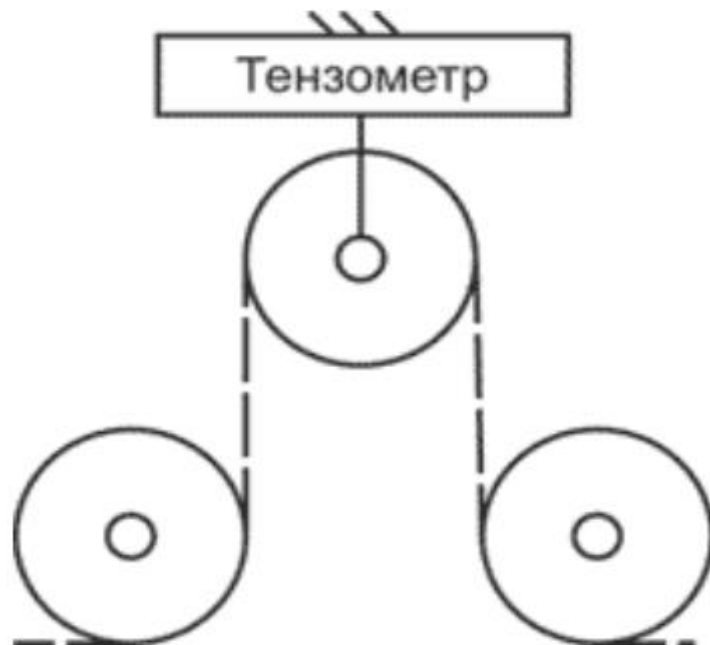


Рисунок 2.5 – Тензометрична система контролю натягу

Тензометричні системи мають численні переваги, такі як висока точність вимірювань, універсальність, здатність компенсувати всі фактори, що впливають на натяг дроту, широкий вибір моделей з різними цінами, включаючи системи з автоматичним калібруванням, і простота встановлення [18]. Однак при роботі з котушками великого діаметра такі системи не завжди забезпечують необхідну стабільність натягу при пристроях для розмотування та намотування.

Комбіновані системи, які поєднують в собі пристрої для контролю діаметра котушки та системи з плаваючим валиком або тензометром, дозволяють досягти найбільшої стабільності натягу. Зазвичай їх використовують у випадках, коли машина працює на великому діапазоні швидкостей, при роботі з котушками великого діаметра або навіть при обробці еластичних матеріалів.

У комбінованих системах різного типу пристрої спільно визначають натяг. Зазвичай, у 90 % випадків для регулювання натягу достатньо інформації від пристроїв контролю діаметра котушок, і лише у 10 % випадків ця інформація доповнюється і коригується за допомогою даних від систем з плаваючим валиком або тензометром. Недоліками комбінованих систем є висока вартість і складність конструкції.

Застосування автоматичних систем контролю натягу дроту дозволить персоналу, що обслуговує обладнання, зосередитися на вузьких місцях технологічного процесу і приділяти більше уваги якості друкованої продукції. Зрештою, це сприятиме збільшенню ефективності виробництва.

2.6 Системи сенсорів і вимірювального обладнання

Системи сенсорів і вимірювального обладнання є комплексом технічних засобів, призначених для вимірювання фізичних параметрів та збору даних. Вони відіграють важливу роль у різних сферах науки, інженерії та промисловості [19].

Сенсори та датчики – це пристрої, здатні вимірювати різноманітні фізичні величини, такі як температура, тиск, вологість, світлова інтенсивність, швидкість руху та багато інших. Вони надають інформацію про навколишнє середовище та процеси, що відбуваються в системі.

Вимірювальні прилади складніші і призначені для вимірювання більш специфічних параметрів, таких як маса, довжина, електричний струм, напруга та інші. Вони часто застосовуються у більш точних та спеціалізованих вимірах.

Системи збору даних дозволяють записувати та обробляти отримані вимірювання. Ці системи можуть бути автономними або вбудованими в автоматизовані та контрольні системи.

У промисловості системи сенсорів та вимірювального обладнання використовуються для контролю виробничих процесів, забезпечення високої якості продукції та забезпечення безпеки. Вони допомагають у моніторингу та управлінні різними аспектами виробництва.

Системи сенсорів та вимірювального обладнання сприяють підвищенню ефективності, безпеки та якості процесів у різних галузях та є невід'ємною частиною сучасної техніки та технологій.

У робототехніці існує безліч різних електронних датчиків, які використовуються для сприйняття навколишнього середовища, навігації, контролю руху та інших завдань.

Інфрачервоні (ІЧ) датчики (рис. 2.6) здатні вимірювати інфрачервоне випромінювання та використовуються для детектування об'єктів, вимірювання температури та визначення відстані до об'єктів, застосовуються в системах уникнення зіткнень та навігації.

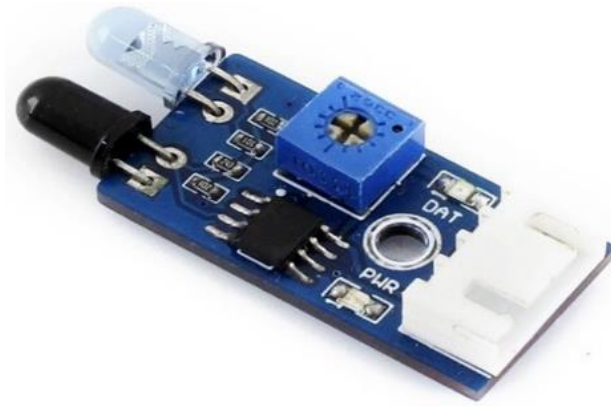


Рисунок 2.6 – Інфрачервоний датчик HW-201

Ультразвукові датчики (УЗ) – це датчики, що випромінюють ультразвукові хвилі та вимірюють час, потрібний для відображення сигналу від об'єкта. Приклад такого датчика зображено на рисунку 2.7. Їх використовують для вимірювання відстані до об'єктів та виявлення перешкод.



Рисунок 2.7 – Ультразвуковий датчик HC-SR04

Лазерні датчики використовуються для точного виміру відстані (рис. 2.8). Вони часто застосовуються в системах картографування та навігації роботів.



Рисунок 2.8 – Лазерний датчик V53L0X-V2

Гіроскопи та акселерометри: гіроскопи вимірюють кутову швидкість обертання робота, а акселерометри – прискорення. Ці датчики використовуються для контролю та стабілізації руху роботів. Такі датчики об'єднані в одній мікросхемі, зображеній на рисунку 2.9.



Рисунок 2.9 – Гіроскоп та акселерометр 6DBMI160

Камери та відео датчики: оптичні датчики, такі як камери (рис. 2.10) та відео датчики, використовуються для розпізнавання об'єктів, навігації, картографування та багатьох інших завдань візуального сприйняття.



Рисунок 2.10 – Модуль камери Sony IMX708

Глибинні камери – це датчики що вимірюють глибину та відстань до об'єктів з використанням технологій, таких як структуроване світло або час польоту. Вони часто застосовуються для 3D-сприйняття довкілля.

Магнітні датчики (рис. 2.11) використовуються для визначення магнітного поля та можуть застосовуватися для навігації та визначення положення щодо магнітних маркерів.

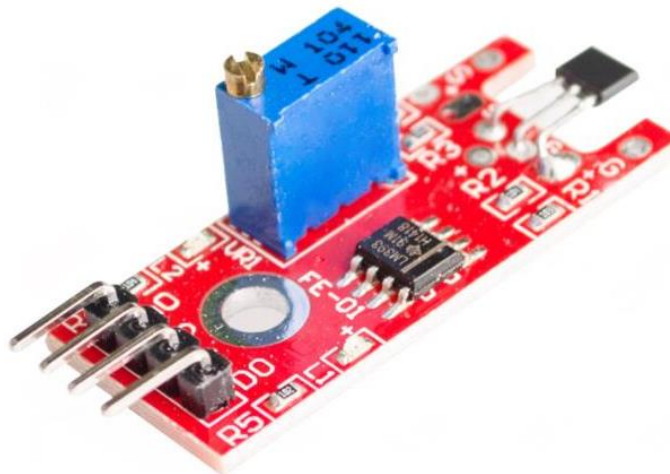


Рисунок 2.11 – Датчик магнітного поля SS49E

Сенсори зіткнення: вони виявляють фізичний контакт з об'єктами та використовуються для уникнення зіткнень та керування рухом. Такий датчик зображено на рисунку 2.12.



Рисунок 2.12 – Датчик фізичного контакту YL-99

Датчики звуку (рис. 2.13) можуть використовуватись для виявлення звукових сигналів, комунікації та детектування джерел звуку.

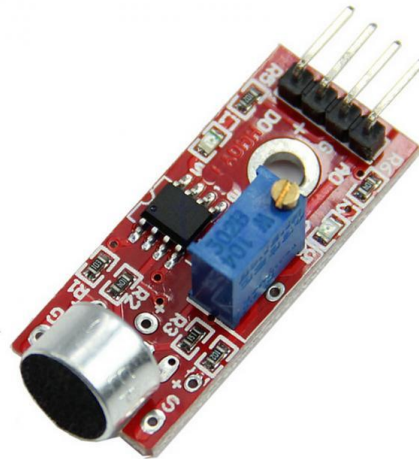


Рисунок 2.13 – Датчик звуку KY-308

Термальні датчики (рис. 2.14) вимірюють температуру об'єктів і можуть бути корисними для виявлення теплових аномалій або об'єктів.



Рисунок 2.14 – Датчик температури DS18B20

Тензодатчики, також відомі як вагові або деформаційні датчики, використовуються для вимірювання механічної напруги або деформації в об'єктах. Вони можуть визначати вагу, напругу, тиск чи силу, що робить їх корисними для контролю навантажень, виявлення сил, що діють на робота, та моніторингу змін у структурах. Приклад такого тензодатчика зображено на рисунку 2.15. Тензодатчики застосовуються, наприклад, у гріперах для управління силою захоплення та у виробничих роботах для забезпечення безпеки та контролю процесів.

Наведені вище приклади – невелика частина різноманітних датчиків, що використовуються у робототехніці. Роботи можуть бути обладнані різними комбінаціями цих датчиків для виконання різноманітних завдань та сприйняття навколишнього середовища, в нашому завданні.

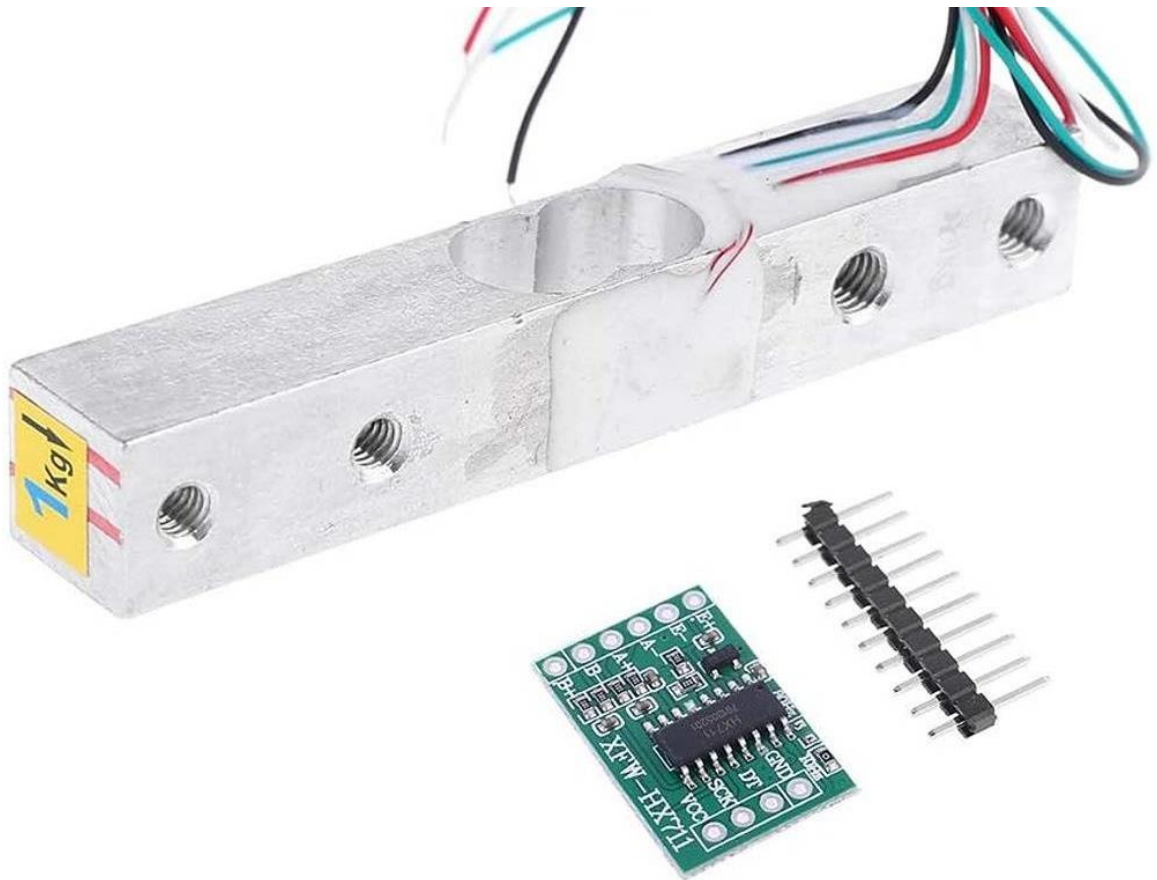


Рисунок 2.15 – Тензометричний датчик HX711

2.7 Метод обраний для реалізації

Для реалізації системи контролю намотування дроту буде доцільно використати саме метод натягу, та його варіацію в вигляді системи з тензометричним датчиком та роликом, до якого його буде закріплено. Такий метод дозволить нам точно, просто та головне одразу контролювати натяг дроту при намотуванні. Така система дозволить зменшити кількість бракованих деталей, зменшити час необхідний для усунення проблеми та збільшити загальну продуктивність системи.

2.8 Електронна компонентна база

Обраний тензOMETричний датчик моделі НХ711 складається з робочого тіла, яке має в своїй основі тонко-плівкові резистори, що при деформації змінюють свій опір. Тіло в свою чергу підключене до аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Розробка макету припускає наявність пристрою, що буде оброблювати цифровий сигнал з АЦП тензOMETричного датчика. Це можна реалізувати завдяки платформі Arduino, а саме Arduino Uno (рис. 2.16).

Arduino Uno – це невелика але функціональна налагоджувальна плата що має необхідні компоненти для роботи з макетними платами, та побудована на мікроконтролерах АТmega328 в третій ревізії. Платформою для даного проекту буде використано плату Arduino UNO, саме третьої ревізії. Arduino UNO побудований на базі АТmega328.



Рисунок 2.16 – Arduino Uno R3 [20]

Платформа має 14 цифрових входів/виходів (6 з яких можуть використовуватися як виходи з підтримкою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ)), 6 аналогових входів, кварцовий генератор 16 МГц, роз'єм USB, силовий роз'єм, роз'єм ICSP та кнопку перезавантаження. Для роботи необхідно підключити платформу до комп'ютеру за допомогою кабелю USB, або подати живлення за допомогою адаптера AC/DC або батарейки.

Живлення плати може відбуватися за допомогою її підключення до комп'ютера шнуром USB Type B, або за допомогою блока живлення від 6 В до 20 В з низьким рівнем пульсації.

Основні характеристики наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики платформи Arduino UNO [20]

№	Назва параметру	Характеристика
1	2	3
1	Мікроконтролер	ATmega328
2	Робоча напруга	5 В
3	Вхідна напруга (рекомендована)	від 7 В до 12 В
4	Вхідна напруга (гранична)	від 6 В до 20 В
5	Цифрові входи/виходи	14 (6 з яких можуть використовуватись як виходи для ШІМ)
6	Аналогові входи	6
7	Постійний струм через вхід/вихід	40 мА
8	Постійний струм для виводу 3.3 В	50 мА
9	Флеш-пам'ять	32 кБ (ATmega328) із яких 0,5 кБ використовуються для завантажувача

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
10	ОЗУ	2 кБ (АТmega328)
11	EEPROM	1 кБ (АТmega328)
12	Тактова частота	16 МГц
13	Розміри плати	50,80 мм x 66,04 мм

Дану платформу було вибрано для реалізації проекту за такими критеріями:

- доступність (дешевий у порівнянні зі своїми аналогами);
- має інтерфейс для роботи з протоколом I2C;
- зручне середовище розробки Arduino IDE [21];
- модульність (дозволяє підключати різні компоненти без пайки);
- широкий вибір допоміжних компонентів (датчики, серводвигуни);
- широкий вибір бібліотек для роботи з платами розширення та компонентами;
- низьке енергоспоживання (можливість роботи від акумуляторів довгий проміжок часу);
- 100 % контроль над часом та тривалістю подачі сигналів.

На рисунку 2.17 зображено розпіновку Arduino UNO R3.

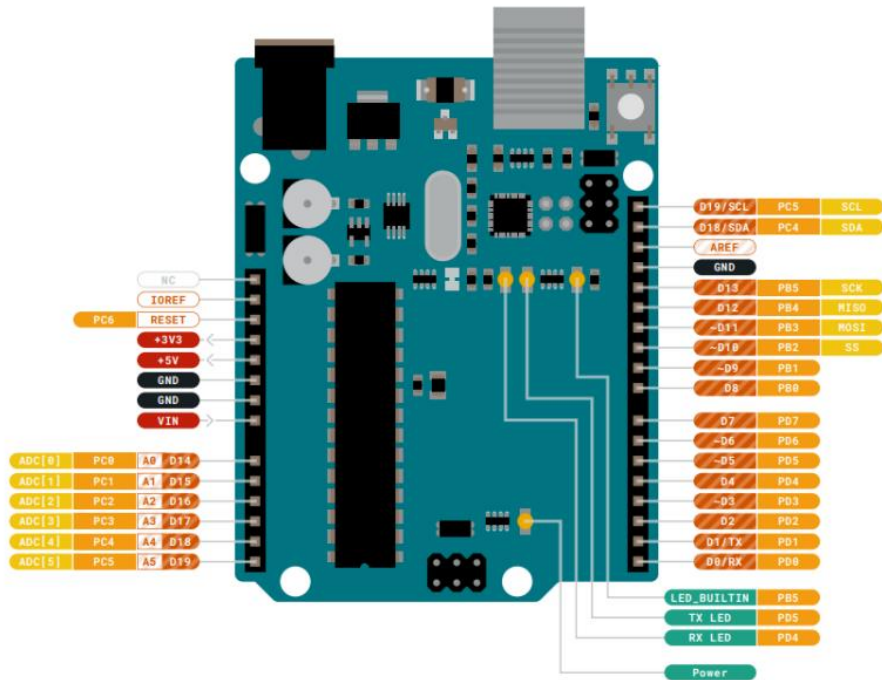


Рисунок 2.17 – Розпіновка Arduino UNO R3

Також для макету в якості органа керування натягом обрано серводвигун SG90 (рис 2.18). Даний серводвигун буде приводити в дію механізм контролю натягу.



Рисунок 2.18 – Серводвигун SG 90

Даний серводвигун має три виводи, два з яких відповідають за живлення, а третій – за передачу даних про кут положення.

Технічні характеристики SG90 [22]:

- розміри: 32 мм × 23 мм × 12 мм;
- швидкість без навантаження: 0,12 с / 60 ° при живленні 4,8 В;
- крутний момент: 2 кг / см;
- температурний діапазон: від 0 °С до 50 °С;
- ширина мертвої зони: 4 мкс;
- робоча напруга живлення: від 3,5 В до 5 В;
- споживаний струм у русі: від 50 мА до 80 мА;
- споживаний струм в утриманні: від 5 мА до 10 мА;
- кут повороту: 180 °;
- маса: 9 г.

2.9 Висновки до другого розділу

У результаті виконання другого розділу кваліфікаційної роботи проведено аналіз існуючих методів контролю натягу дроту. Проаналізовано загальні відомості про методи контролю з використанням систем комп'ютерного зору. Також описано методи контролю розриву та системи натягу дроту. Після чого було обгрунтовано вибір системи сенсорів та вимірювального обладнання, різноманітних датчиків та проведено підбір компонентної бази.

3 РОЗРОБКА ТА КАЛІБРУВАННЯ СИСТЕМИ НАТЯГУ

3.1 Розробка структурної схеми макету

На рисунку 3.1 представлено структурну схему автоматизованого пристрою для намотування дроту.

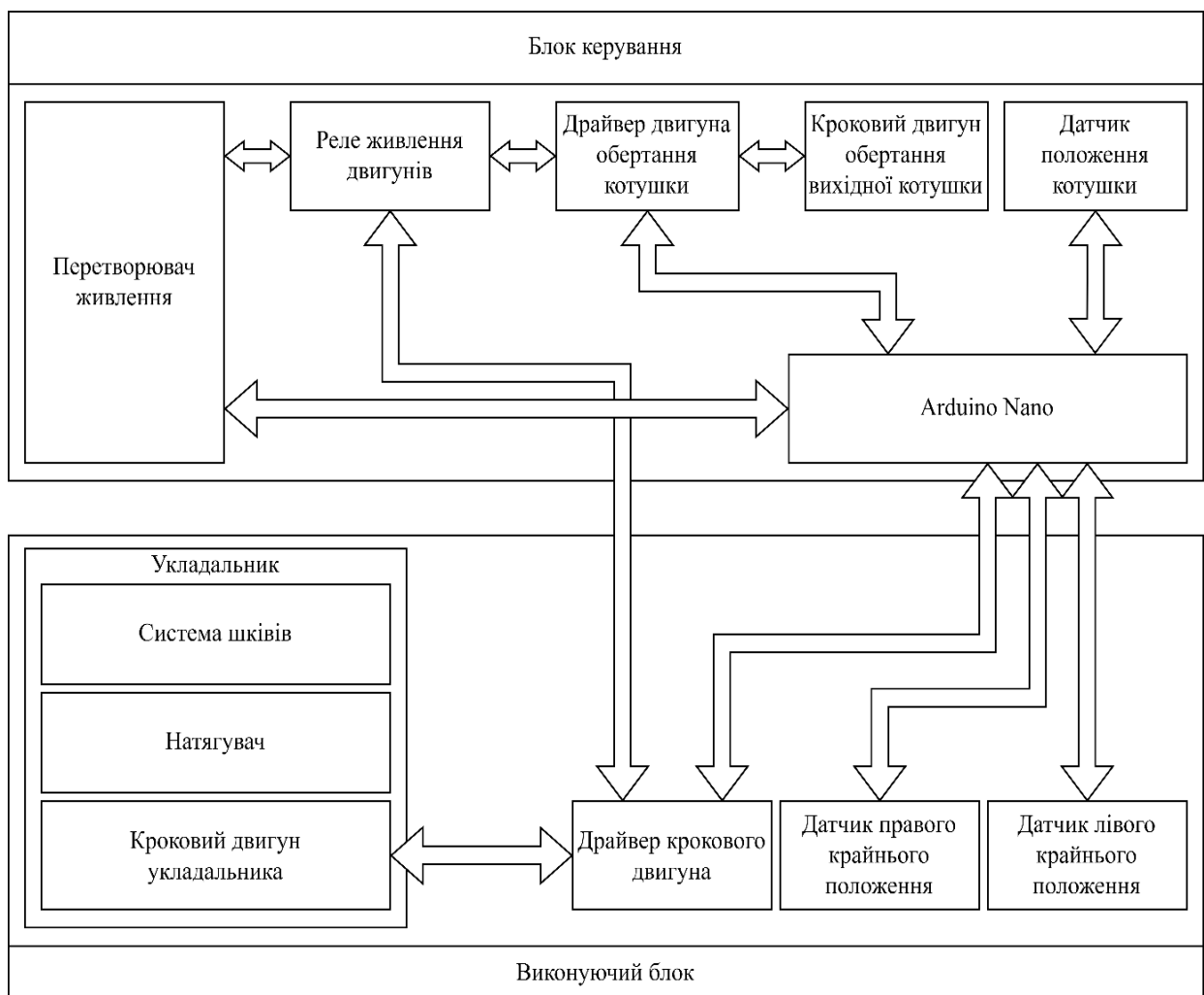


Рисунок 3.1 – Структурна схема автоматизованого пристрою намотування дроту

На зазначеному рисунку зображено, що пристрій складається з двох основних блоків: блоку керування та виконавчого блоку. Блок керування включає в себе наступні компоненти:

- Arduino Nano [23];
- крокового двигуна обертання котушки;
- крокового двигуна укладальника;
- драйвера двигуна обертання котушки;
- реле живлення двигунів;
- датчика положення котушки;
- перетворювача живлення.

В свою чергу, виконуючий блок складається з:

- укладальника;
- драйвера крокового двигуна;
- датчика лівого крайнього положення;
- датчика правого крайнього положення.

Укладальник представляє собою систему з шківів, натягувача та крокового двигуна з передачею за допомогою гвинт-гайки. У даній роботі буде розроблено та встановлено систему керування натягом (натягувач).

Розглянемо процес намотування. До встановлення нових компонентів системи натягу, процес намотування складався з протягування дроту скрізь систему шківів укладача, котрий точно позиціонує дріт для укладання, та кроковий двигун, що тягне цей дріт. Ця система не враховувала натяг дроту, і через це виникла потреба у застосуванні методу контролю намотування. Котушка з якої змотується дріт може бути довільної форми, та через це дріт може змотуватись нерівномірно, що призводить до його провисання та, як наслідок, напливу витків.

3.2 Збірка компонентної бази для тестування

Систему керування натягом встановлено на рухому каретку укладача. Для реалізації макету на каретку укладача було також встановлено необхідні компоненти.

До вертикального тримача вісей обертання роликів, з протилежної сторони від роликів, за допомогою кутових алюмінієвих профілів було закріплено тензодатчик. Цей тензодатчик розташований паралельно системі роликів, та на чутливу частину датчика було встановлено додатковий ролик. Завдяки такому розташуванню датчика, натяг дроту буде вимірюватись постійно та не впливатиме на швидкість намотування. Прототип для тестування та калібрування тензодатчика зображено на рисунку 3.2.

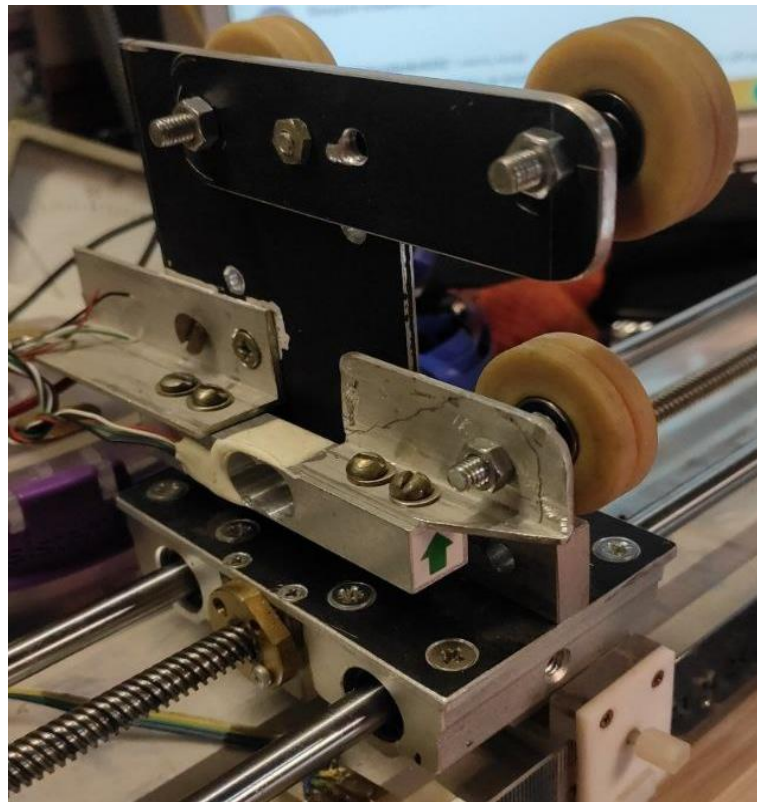


Рисунок 3.2 – Прототип для тестування та калібрування тензодатчика

Систему роликів також було модифіковано, а саме було змінено розташування роликів що найближчі до вихідної котушки, вони тепер розташовані поруч одне з одним. При цьому, нижній ролик є статичним, тобто його вісь обертання зафіксована відносно вертикального тримача. Верхній ролик має пружину, котра притягує цей ролик до нижнього.

Таким чином, на дріт, що буде проходити між роликами, буде впливати сила верхнього ролика, котра забезпечить високий коефіцієнт тертя між дротом та поверхнями ролика, і ковзання дроту буде мінімальним.

Нижній ролик буде забезпечувати натяг шляхом застосування до нижнього ролика керованого тормоза. Такий тормоз, а саме маленька тормозна колодка, буде забезпечувати контроль за натягом у даних системах. Вона буде приводитись серводвигуном, таким чином буде можливо контролювати зусилля тормозу, і відповідно – натяг дроту в системі.

Після закріплення тензодатчика, та серводвигуна, виконуємо підключення електронних компонентів, а саме підключення серводвигуна та тензодатчика до Arduino Uno R3. Для точного позиціонування необхідно провести калібрування системи натягу, а саме:

- розрахувати коефіцієнт для розрахунку сили натягу тензодатчиком;
- розрахувати гальмівне зусилля від куту повороту серводвигуна.

3.3 Розрахунок теоретичних значень для розриву

Розрахунок зусилля, необхідного для розриву мідного дроту, є важливим аспектом при проектуванні системи натягувача. Для досягнення точного результату потрібно враховувати декілька ключових факторів.

Першим параметром є діаметр мідного дроту. Діаметр дає змогу розрахувати перетин провідника i , отже, на розподіл напруги всередині нього. Другим важливим аспектом є механічні властивості матеріалу, такі як міцність

на розрив. Це значення є максимальною напругою, яку дрiт може витримувати перед розривом. Воно залежить вiд типу мiдi та може бути визначено експериментально.

Використовуючи формулу межi мiцностi матерiалiв (3.1), можна розрахувати напругу у провiднику. З огляду на цей параметр можна приступити до розрахунку зусилля, необхідного для розриву дроту. Рiвняння, що зв'язує напругу, перерiз провiдника та зусилля, має вигляд:

$$P_{max} = \frac{F}{S} \cdot \frac{l}{\Delta l} = \frac{4Fl}{\pi d^2 \Delta l}, \quad (3.1)$$

де P_{max} – межа мiцностi, дорiвнює 230 МПа [24];

F – зусилля на розрив, Н;

S – площа поперечного перетину, м²;

l – довжина дроту, м;

Δl – видовження дроту, м;

d – дiаметр дроту, м.

В нашому випадку довжина може бути будь-якою, видовження буде мiнiмальним i ним можна знехтувати, отже:

$$P_{max} = \frac{F}{S} \cdot \frac{l}{\Delta l} = \frac{4F}{\pi d^2}. \quad (3.2)$$

Зусилля, необхідне для розриву дроту можна розрахувати перетворивши дану формулу, i дорiвнює:

$$F = \frac{P_{max} \pi d^2}{4} = \frac{230 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot d^2}{4} = 180,55 \cdot 10^6 \cdot d^2. \quad (3.3)$$

Важливо, що реальні умови також можуть вплинути на зусилля, необхідне розриву мідного дроту. Також необхідно враховувати можливі дефекти у структурі провідника, які можуть зменшити його міцність.

Розрахуємо зусилля розриву для провідників різного діаметру, наприклад для мідного провідника діаметром 1 мм. Знаючи межу міцності для мідного дроту, знайдемо зусилля розриву:

$$F = 180,55 \cdot 10^6 \cdot 0,001^2 = 180,55 \text{ Н.}$$

Розрахуємо зусилля для розриву дротів різного діаметру, та відповідно заповнимо таблицю.

Таблиця 3.1 – Розраховані зусилля на розрив дротів різного діаметру

Діаметр, мм	Зусилля на розрив, Н
0,1	1,81
0,2	7,22
0,3	16,25
0,4	28,89
0,5	45,14
0,6	64,99
0,7	88,47
0,8	115,55
1	180,55

Цей підхід забезпечує інформацію, необхідну для емпіричних дослідів. Експериментальні дослідження можуть додатково підтвердити розрахунки, забезпечуючи точніші дані для конкретних умов експлуатації.

3.4 Експериментальна перевірка теоретичних значень

Для дослідів було використано модифіковану систему роликів на каретці укладача та встановлений на неї тензометричний датчик. Схематичне зображення системи роликів, що приймала участь у калібруванні датчика зображено на рисунку 3.3. Схему підключення тензометричного датчика та його АЦП до плати Arduino Uno зображено на рисунку 3.4.

Оскільки АЦП здатен передавати інформацію до Arduino Uno у вигляді цілого числа, яке прямо пропорційне навантаженню на чутливу частину тензодатчика, то необхідно знайти коефіцієнт перетворення для конвертації даних що надходять з АЦП датчика в звичну міру вимірювання сили (ньютони).

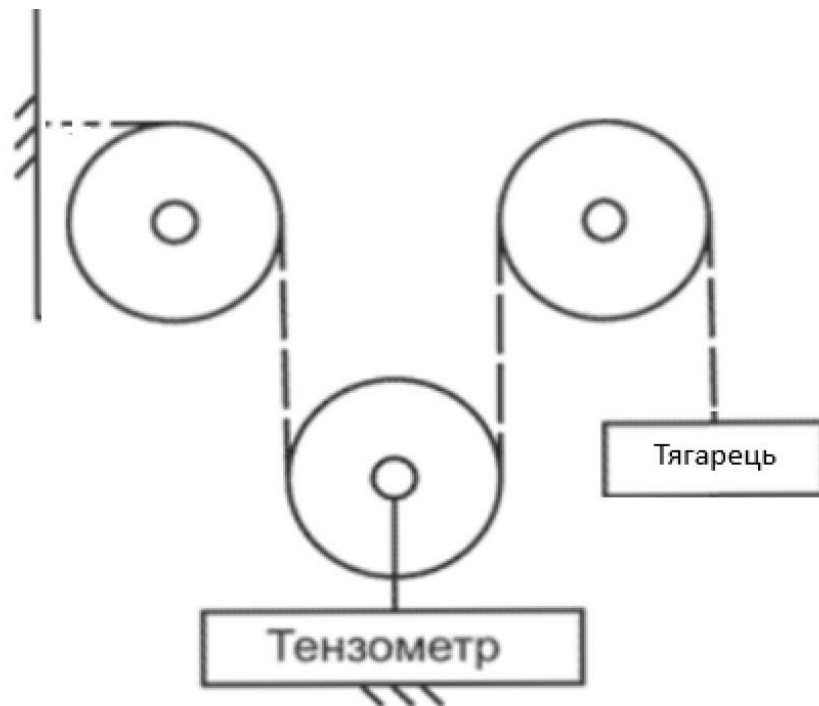


Рисунок 3.3 – Система роликів для калібрування датчика

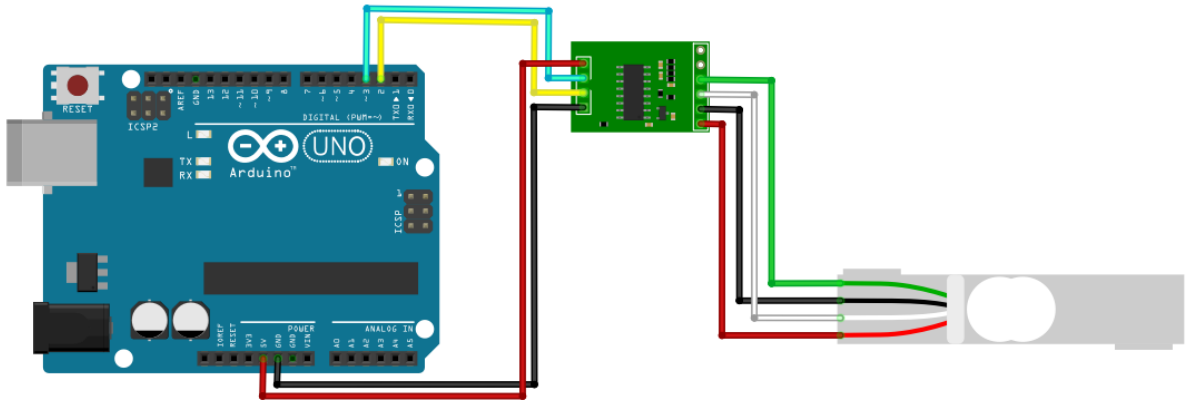


Рисунок 3.4 – Схема підключення тензодатчика

Для розрахунку коефіцієнта перетворення потрібно взяти тіло відомої маси, попередньо у програмі потрібно встановити режим «тара», отримане значення датчика розділити на силу тяжіння тіла відомої маси, після чого записати даний коефіцієнт у код майбутньої програми для керування натягом.

Для цього можна використати тестову програму, яка здатна у зручній формі відобразити дані, отримані від тензодатчика, але спочатку – під'єднаймо тензодатчик до АЦП, а АЦП до Arduino Uno. Піни DT та SCK до пінів D3 та D2 відповідно. Код програми для отримання коефіцієнта перетворення даних з тензодатчика наведено в рисунку 3.5.

Програма включає в себе зовнішню бібліотеку GyverHX711 [25], створену для роботи з тензодатчиком та його АЦП HX711. В ній декларовано клас GyverHX711, та методи передачі даних між АЦП та мікроконтролером та режими роботи пінів плати. Після чого, перед входом програми в функцію `setup()` було ініціалізовано об'єкт класу GyverHX711 з назвою `sensor`, та передано йому аргументи, а саме номер цифрового піна, до якого підключено вивід DT на АЦП, номер цифрового піна, до якого підключено вивід SCK на АЦП та коефіцієнт підсилення значень з каналу A, до якого в АЦП підключено виводи тензодатчика.

```
#include <GyverHX711.h>

GyverHX711 sensor(3, 2, HX_GAIN64_A);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  delay(500);
  sensor.tare();
}

void loop() {
  if (sensor.available()) {
    long weight = sensor.read();
    Serial.println(weight);
  }
  delay(100);
}
```

Рисунок 3.5 – Програма перетворення даних

Функція `setup()` потрібна для ініціалізації передачі даних в послідовний порт. За це відповідає метод `Serial.begin(9600)`, котрий встановлює швидкість передачі даних в 9600 бод. Після затримки в 500 мс, викликано метод `sensor.tare()` для корекції даних з АЦП датчика (режим тари).

Далі в функції `loop()`, що виконується циклічно, та по закінченню описаних в ній функції та операторів виконується спочатку, описано логіку отримання необроблених даних з АЦП та передачу їх в послідовний порт для відображення їх в моніторі послідовного порту.

Запрограмувавши пристрій, необхідно запустити в середовищі Arduino IDE монітор послідовного порту до якого підключено пристрій. Монітор відображає отримані значення з тензодатчика, що дозволить нам чітко побачити, яке значення відповідає номінальній вазі тягарця, яким ми навантажимо датчик. Для цього потрібно взяти гнучкий матеріал, наприклад нитку з капрону, прив'язати її за один з вхідних роликів, та протягнути її через ролик датчика та вихідний ролик,

після чого підвісити тягарець відомого номіналу, у нашому випадку – 1 кг (9,81 Н). Дані отримані за допомогою монітора послідовного порту зображено на рисунку 3.6.

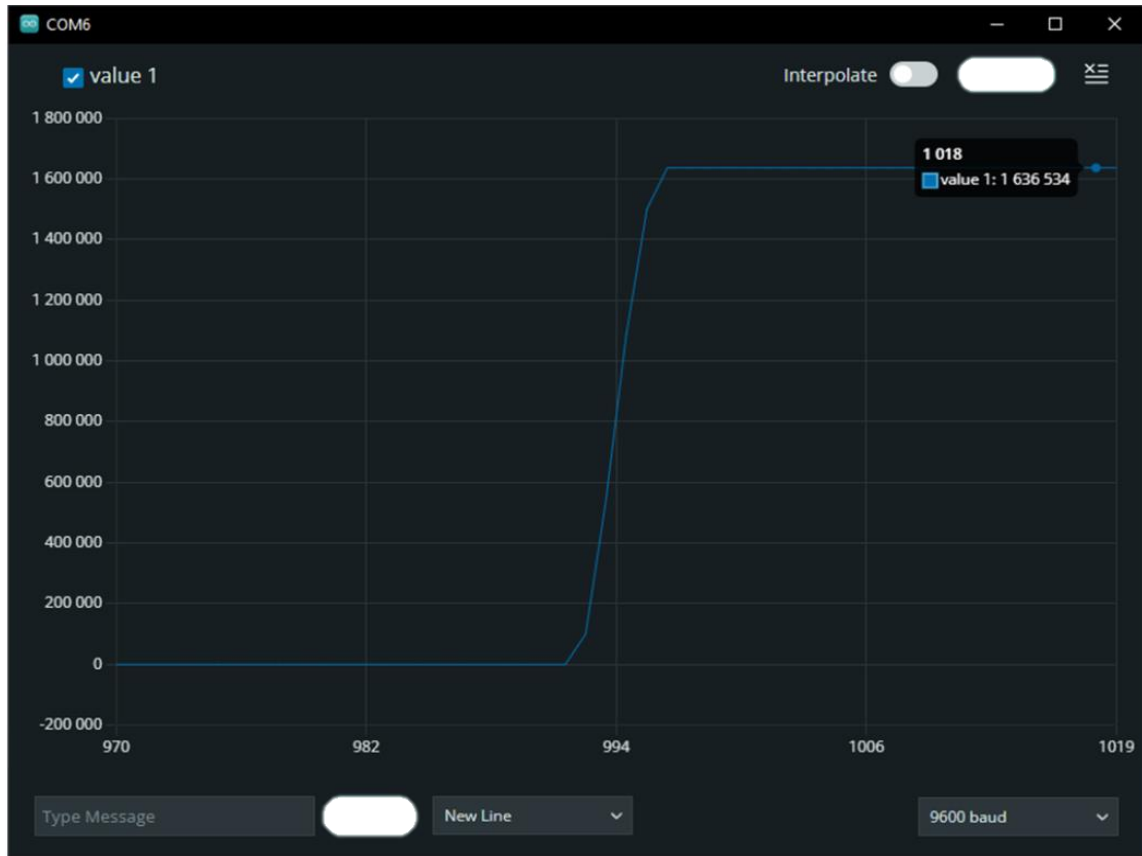


Рисунок 3.6 – Дані отримані з тензодатчика при навантаженні в 1 кг

Після того, як ми отримали число при навантаженні в 1 кг, потрібно це число розділити на прискорення вільного падіння g , де $g = 9,81 \text{ м/с}^2 = 9,81 \text{ Н/кг}$, і таким чином, ми отримаємо коефіцієнт перетворення даних з датчика в силу тяжіння (натягу), що прикладена до ролика, а саме 166832. Якщо значення з датчика розділити на цей коефіцієнт отримаємо натяг у ньютонках. Дані значення було перевірено за допомогою додаткових тягарців масою 542 грами та 414 грами, графіки даних зображено на рисунках 3.7 і 3.8 відповідно.

Тепер ми можемо контролювати граничне значення натягу, щоб не допускати напливи або розрив дроту. Критичні значення натягу, при яких буде рватися дріт буде розглянуто далі.

Для знаходження дійсного значення сили для розриву дроту, візьмемо мідний дріт відомого діаметру, закріпимо його один кінець попередньо протягнувши його через систему роликів (як при визначенні коефіцієнта перетворення), а на другий кінець будемо поступово додавати навантаження, створюючи натяг. Дані, зафіксовані в останній момент перед розривом та після розриву будуть зафіксовані за допомогою іншої програми для Arduino Uno. Код програми для визначення сили натягу під час розриву наведено на рисунку 3.9.



Рисунок 3.7 – Дані отримані з тензодатчика при навантаженні в 542 грами

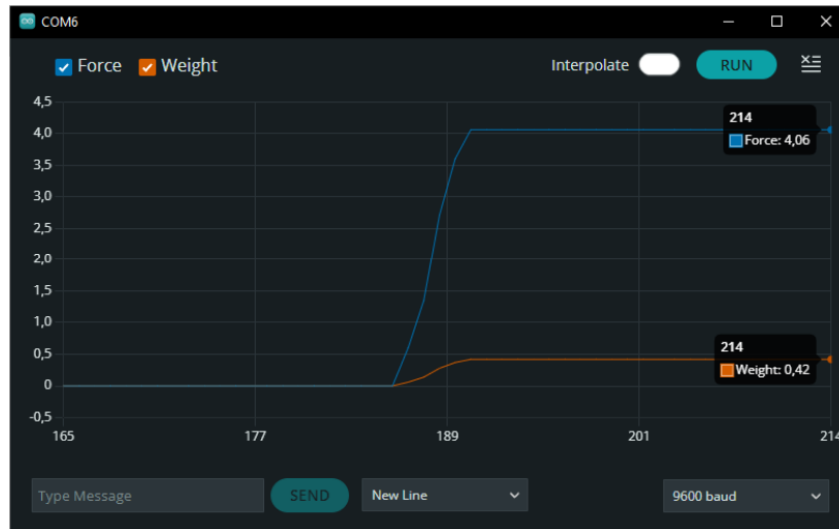


Рисунок 3.8 – Дані отримані з тензодатчика при навантаженні в 414 грамів

```

#include <GyverHX711.h>

GyverHX711 sensor(3, 2, HX_GAIN64_A);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  delay(500);
  sensor.tare(); // калибровка нуля
}

void loop() {
  if (sensor.available()) {
    long weight = sensor.read();
    float force = (float)weight / 166823;
    float force_avg = round(force * 10.0) / 10.0;
    float weight_avg = force_avg / 9.81;
    Serial.print("Force:");
    Serial.print(force);
    Serial.print(",");
    Serial.print("Weight:");
    Serial.println(weight_avg);
    delay(100);
  }
}

```

Рисунок 3.9 – Код програми для відображення даних у ньютонгах та кілограмах

У порівнянні з програмою для знаходження коефіцієнта перетворення, функція `setup()` аналогічна, а функція `loop()` тепер має отримання ваги з використанням коефіцієнта перетворення.

Дані, зафіксовані датчиком та Arduino Uno зображені на рисунку 3.10 та 3.11.



Рисунок 3.10 – Графік сили натягу дроту діаметром 0,35 мм

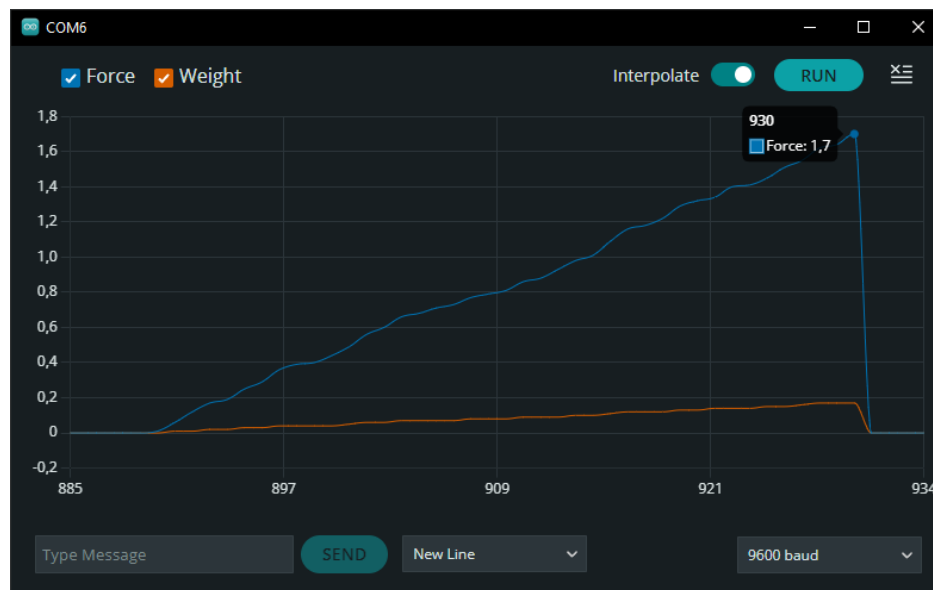


Рисунок 3.11 – Графік сили натягу дроту діаметром 0,1 мм

В наявності був дріт діаметром 0,35 мм і 0,1 мм, і як видно з графіків, дроти рвуться при зусиллі натягу в 21,08 Н та 1,7 Н відповідно. Розрахувавши

теоретичне значення розриву дроту діаметром 0,35 мм за формулою розірвався при зусиллі, що складає 95 % від теоретичного значення, а дріт діаметром 0,1 мм розірвався при зусиллі в 94 %. Це говорить про майже лінійне співвідношення теоретичних та практичних. Отже, судячи з експериментальної частини, потрібно розраховувати що мінімальний натяг для дроту різного діаметру має бути щоб утримувати дріт в натягнутому стані.

Оскільки система, що посилюватиме чи послаблятиме натяг дроту, має гальмівну колодку, то з розрахунку на більш довгу експлуатаційну придатність, необхідно брати найменше значення, при якому буде досягнуто достатній натяг, та буде виключено можливість утворення напливів. Для автоматичного контролю натягу дроту необхідно використовувати систему роликового гальма, котрою можливо керувати натягом.

При застосуванні до дроту критичної сили натягу, дріт може деформуватись, при цьому втрачається цілісність металу та погіршуються його властивості, що може вплинути на якість виробу.

3.5 Розробка роликового гальма

Для створення органа, що буде створювати натяг, необхідний та достатній для намотування дроту без розриву та напливів, потрібно створити ролик, обертання якого можна регулювати за допомогою серводвигуна. Систему роликів натягувача було модифіковано для використання гальма, що використовує коефіцієнт тертя для створення натягу.

Паралельно напрямним укладача, перпендикулярно до вертикального тримача з обох сторін було встановлено два металеві ролики на одній вісі. Один ролик буде пов'язаний з іншими роликами дротом та буде використовуватись як натягувач. Для створення натягу, поверхня ролика має бути з твердого матеріалу та високим коефіцієнтом тертя. В нашому випадку даний ролик має гумове

покриття, що при взаємодії з мідним дротом дає необхідний коефіцієнт тертя. Потрібно зауважити, що необхідний натяг – це зусилля, яке має виникати вздовж всього дроту під час його намотування. Дані, необхідні для створення такого натягу, ще не було розраховано, то ж було прийнято рішення використовувати значення що є половиною від границі міцності дроту. У випадку мідяного дроту – $230/2=165$ МПа. Отже, натяг, що може бути необхідним та достатнім дорівнює:

$$F = \frac{\frac{\sigma \pi d^2}{4}}{2} = \frac{230 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot d^2}{8} = 90,28 \cdot d^2. \quad (3.4)$$

Тож, знаючи діаметр дроту, можливо точно розрахувати, який натяг буде потрібно створювати та підтримувати під час всього циклу намотування.

Ролик що розташований на іншій стороні укладача – це ролик, що буде грати роль гальмівного диску, а пластинка що буде до нього притискатись – роль гальмівної колодки. Оскільки з одного боку гальмівна колодка закріплена на валу серводвигуна, а інша – зачеплена до пружини, а та, в свою чергу – зафіксована на тримачі, гальмівне зусилля буде регульованим, і регулятором тормозу (а як наслідок і натягу) буде серводвигун.

Оскільки гальмівне зусилля створюється за допомогою великої кількості коефіцієнтів та змінних – можна використати тензодатчик, щоб виміряти максимально можливу силу натягу, яку ми будемо використовувати подалі.

Проведемо експеримент, а саме – візьмемо дрiт, що неможливо розірвати силами нашого АПНД, протягнемо його через систему роликів, і почнемо створювати натяг, повертаючи вал серводвигуна на певний кут. Дані, що будуть відображені на моніторі послідовного порту, дадуть нам змогу зрозуміти, в який момент гальмівний ролик почне ковзати під дротом. Використовуючи минулий досвід використання такого АПНД для створення виробів, за нерозривний дрiт

можна взяти дрiт дiаметром 0,37 мм. Такий дрiт розривається при прикладеннi до нього зусилля натягу в 21,08 Н, але таке навантаження – критичне для даної моделi, то ж є доцiльним розглянути варiант коли необхідний натяг створюється для дроту меншого дiаметру, i варiант коли максимальний натяг, утворений гальмом є достатнiм для запобiгання напливiв.

Роликове гальмо, що буде використано в нашому макетi зображено на рисунку 3.12, а дрiт, дiаметром 0,35 мм, протягнутий через систему роликiв – на рисунку 3.13.

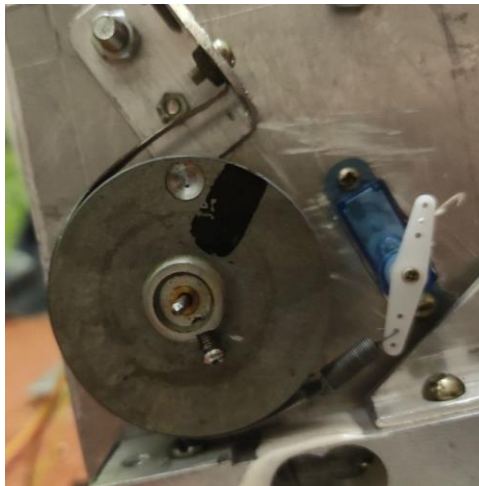


Рисунок 3.12 – Роликове гальмо

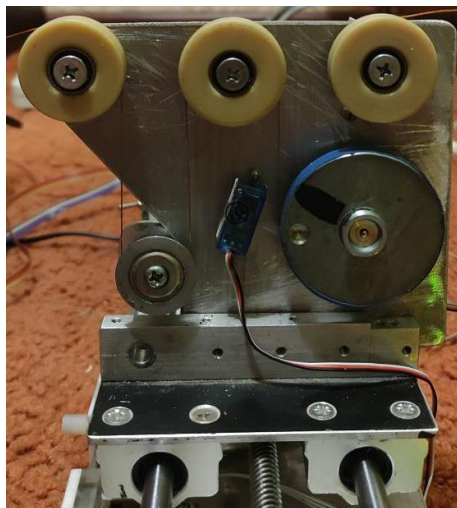


Рисунок 3.13 – Дрiт дiаметром 0,35 мм, протягнутий через систему роликiв

Підготуємо АПНД до роботи з діаметром даного дроту, створимо тестові умови та проведемо експеримент.

Створимо тестову програму, аналогічну тим, що використовувались для визначення сили натягу для розриву дроту. В цій програмі циклічно будемо збільшувати кут повороту серводвигуна для створення плавного гальмівного зусилля. На графіку зображено кут повороту серводвигуна помаранчевою лінією. Кут повороту на графіку представляє собою значення кута, поділене на 100. Таким чином ми зможемо бачити наглядно кут повороту і зусилля натягу без необхідності масштабування графіка. Куту 0 градусів відповідає значення 0, а куту 180 градусів – 1,8.

Графік отриманих даних зображено на рисунку 3.14.

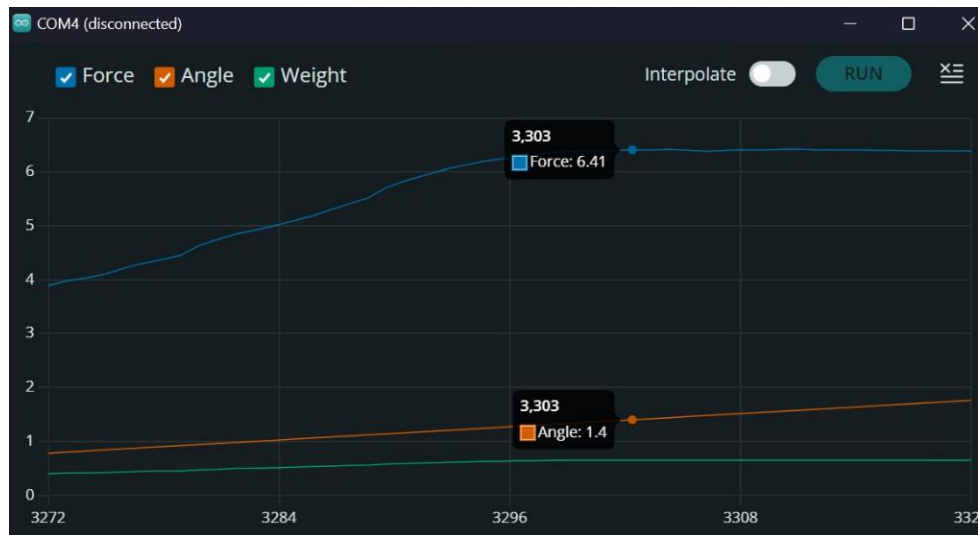


Рисунок 3.14 – Графік куту положення вала серводвигуна та гальмівне зусилля що йому відповідає

Оскільки графіки залежності гальмівного зусилля (натягу) та куту положення вала серводвигуна мають схожу на лінійну характеристику, можна створити програму, що буде підтримувати необхідний та достатній натяг для

дроту що намотується. Таким чином, маючи датчик натягу, що отримує інформацію неперервно, ми можемо керувати серводвигуном в будь який момент часу.

Виходячи з даних на графіку, можна зробити висновок, що максимальне гальмівне зусилля в 6,41 Н утворюється при повороті вала серводвигуна на 140 градусів. Задавати більші кути повороту не доцільно, через надлишкове навантаження на пружину гальма та можливе передчасне ковзання.

3.6 Розробка програмного забезпечення для контролю натягу

Враховуючи швидкість обертання вала серводвигуна дорівнює $0,12 \text{ с} / 60^\circ$ і знатність задавати серводвигуну значення від 0 градусів до 180 градусів з кроком 1 градус, розрахуємо швидкість повороту серводвигуна на 1 градус, вона дорівнює 2 мс. Доцільно буде розробити програму, циклічна частина роботи якої буде виконуватись кожні 2 мс. Передавати значення натягу та кута повороту вала серводвигуна будемо як і раніше, кожні 100 мс. Отже необхідно створити програмний лічильник, котрий буде кожні 100 мс передавати значення в монітор послідовного порту.

Під час використання програми для контролю натягу, дані з датчика та дані керування серводвигуном оброблювались кожні 2 мс та керування положенням вала серводвигуна призводило до утворення гармонічних коливань в районі дотриманого значення. Отже, період обробки та корекції даних потрібно збільшити. Експериментально було встановлено період, при якому коливання зникає, він дорівнює 20 мс.

Виходячи з відомих даних, було розроблено програму керування натягом для АПНД. Алгоритм роботи програми керування зображено на рисунку 3.15.

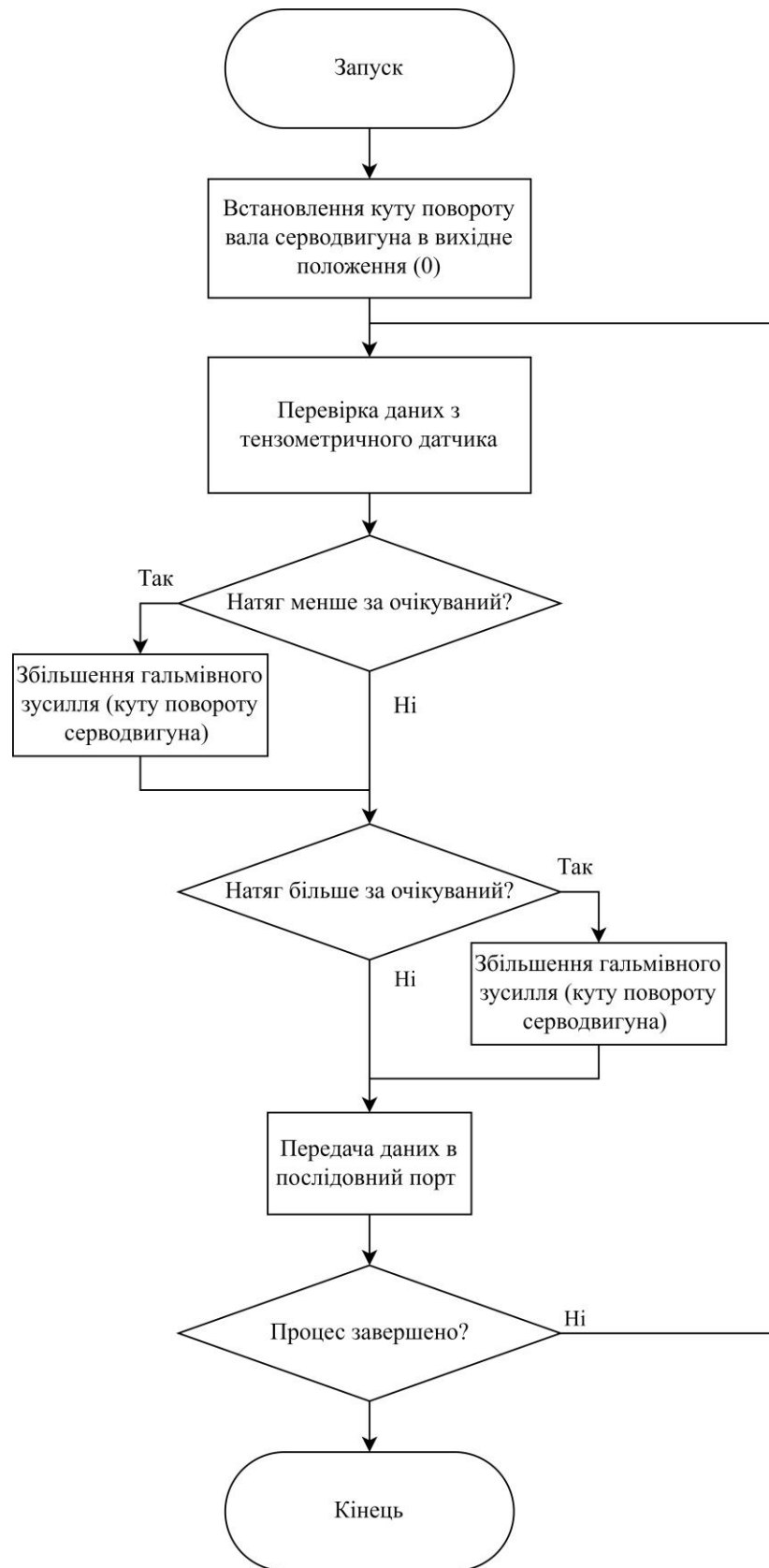


Рисунок 3.15 – Загальний алгоритм роботи програми

Запрограмувавши пристрій на дотримання встановленого натягу, встановимо дрiт, зафіксуємо значення з монiтору послiдовного порту. Графiк монiтору порту буде зображено на рисунку 3.16.



Рисунок 3.16 – Графiк даних з монiтору послiдовного порту

3.7 Розрахунок природнього освiтлення робочого простору

Розмiри науково-дослiдної лабораторiї для розробки системи контролю натягу дроту складають $8 \text{ м} \times 7 \text{ м} \times 3,8 \text{ м}$, з площею 56 м^2 i об'ємом $212,8 \text{ м}^3$. Робоче мiсце включає стiл, стiлець i персональний комп'ютер. Згiдно норм, площа на одне робоче мiсце повинна бути не менше 6 м^2 , а об'єм – 20 м^3 . В лабораторiї цi значення вiдповiдають нормам, оскiльки площа на одне робоче мiсце становить 8 м^2 , а об'єм – $30,4 \text{ м}^3$.

Для визначення природнього освiтлення потрiбно розрахувати площу вiконних прорiзiв для нормованого КПО [25]. Порiвняння цiєї площi з реальною

виконується за допомогою формули (3.5). Умови праці вважаються нормальними, якщо

$$S_{вік} \leq S_{реал}, \quad (3.5)$$

де $S_{вік}$ – площа вікон, згідно з формулою (3.6);

$S_{реал}$ – реальне значення площі вікон в залі ОЦ, $S_{реал} = 7$.

$$S_{вік} = \frac{e_n \eta_0 K_{зд} K_3 S_n}{100 \tau_0 r_1}, \quad (3.6)$$

де S_0 – площа світових прорізів, яка забезпечить нормоване значення КПО в приміщенні;

S_n – площа підлоги приміщення;

e_n – нормоване значення КПО для 4-го поясу світлового клімату СНД, $e_n = 1,35$;

η_0 – світлова характеристика вікна;

$K_{зд}$ – коефіцієнт, враховуючий затінення вікон напроти стоячими будівлями, $K_{зд} = 1$;

K_3 – коефіцієнт запасу (залежить від концентрації пилу в приміщенні та від періодичності очистки стекол), $K_3 = 1,4$;

τ_0 – загальний коефіцієнт світлопропускання, що визначений в залежності від коефіцієнту пропускання скла, втрат світла в вікні, шару його забруднення, наявності сонцезахисних конструкцій, $\tau_0 = 0,94$;

r_1 – коефіцієнт, враховуючий підвищення КПО за рахунок відображення.

$$S_{вік} = \frac{1,35 \cdot 15 \cdot 1,5 \cdot 56}{100 \cdot 0,96 \cdot 1,1} = \frac{1587,6}{103,4} = 15,35 \text{ м}^2.$$

Так як $S_{вік} > S_{реал}$, то для покращення цього фактору необхідно застосувати штучне освітлення в денний час.

3.8 Висновки до третього розділу

Під час виконання третього розділу роботи розроблено структурну схему для автоматизованого пристрою намотування дроту. Після чого проведено збірку компонентної бази макету для тестування та калібрування тензорезистивного (тензометричного) датчика. Також розраховано та експериментально перевірено зусилля, необхідне для розриву мідних дротів різного діаметру. Для цього підібрано декілька різних за діаметром дротів, та два тягарця різної маси, які дозволили відкалібрувати систему вимірювання натягу. Далі у розділі розроблено роликоне гальмо, проведено експеримент для визначення максимального гальмівного зусилля. Отримані результати дозволили розробити програму для автоматизованого регулювання натягу мідного дроту.

ВИСНОВКИ

У першому розділі проведено аналіз програмно-технічних комплексів намотування дроту. Після проведення аналізу їх характеристик, а також наведеного опису автоматизованого пристрою намотування дроту, як пристрою до якого можливо розробити систему контролю для перевірки запропонованого методу.

У результаті виконання другого розділу кваліфікаційної роботи проведено аналіз існуючих методів контролю натягу дроту. Проаналізовано загальні відомості про методи контролю з використанням систем комп'ютерного зору. Також описано методи контролю розриву та системи натягу дроту. Після чого було обґрунтовано вибір системи сенсорів та вимірювального обладнання, різноманітних датчиків та проведено підбір компонентної бази.

Під час виконання третього розділу роботи розроблено структурну схему для автоматизованого пристрою намотування дроту. Після чого проведено збірку компонентної бази макету для тестування та калібрування тензорезистивного (тензометричного) датчика. В ході експериментально дослідження перевірено зусилля, необхідне для розриву дротів різного діаметру, використовуючи різні дроти діаметром від 0,1 мм до 1 мм, та наведено приклади результатів для діаметрів 0,37 мм і 0,1 мм, використовуючи тягарці масою 542 грами та 414 грами.

Порівнюючи дані експерименту з теоретичними розрахунками, визначено, при яких значеннях натягу дроти діаметрами 0,35 мм та 0,1 мм розірвуться. Ці показники співвідношення дорівнюють 95 % та 94 % відповідно. Розроблено роликоче гальмо, що дозволило провести експеримент для визначення максимального гальмівного зусилля. На основі визначеного необхідного та достатнього натягу розроблено програму для автоматичного регулювання натягу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Толстий М.В. Розробка програмно-технічного комплексу системи намотування дротів / Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2022) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2022. – Вип. 2. – С. 95-101.

2. Толстий М.В. Аналіз методів намотування дротів на станках з ЧПУ у роботизованому виробництві / Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – Вип. 2. – С. 341-350.

3. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.

4. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.

5. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. № 50. – Режим доступу: <https://nure.ua/wp->

content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademi-chnu-dobrochesnist.pdf.

6. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. No 50. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademi-chnu-dobrochesnist.pdf.

7. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 143. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf

8. Закон України “Про вищу освіту” від 01.07.2014 No 1556-VII. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text>.

9. Положення про організацію освітнього процесу у ХНУРЕ [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 27.11.2020 р. No 400. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-organizaciju-osvitnogo-procesu-v-hnure.pdf.

10. Положення про організацію проведення практики здобувачів вищої освіти Харківського національного університету радіоелектроніки [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 03.05. 2019 р. No 222. Режим доступу: <https://nure.ua/wp-content/uploads/222-vid-03.05.2019-pro-vvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf>.

11. Невлюдов І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. 366 с.

12. ED Class Winder [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://www.winding-technology.com/eu-en/winding-machines/ed-class-winder](http://www.winding-technology.com/eu-en/winding-machines/ed-class-winder).

13. WT 500 [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://www.windingtechnology.com/wt-500/](http://www.windingtechnology.com/wt-500/).

14. Сучасні підходи до розв'язання задач комп'ютерного зору [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: http://usim.org.ua/arch/2018/6/8.pdf](http://usim.org.ua/arch/2018/6/8.pdf).

15. Абакумов, І.І. Компенсация погрешностей пассивной оптико-электронной системы контроля геометрии изделий / И.И. Абакумов, А.А. Кульчицкий// Измерительная техника - М: 2016, №8, С. 27-30..

16. Застосування приводної техніки Lenze у намотувальних та друкарських машинах [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://www.svaltera.ua/solutions/typical/automation_of_processes/8789.php](https://www.svaltera.ua/solutions/typical/automation_of_processes/8789.php).

17. How does ultrasonic sensor work? [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://sensorpartners.com/en/knowledge-base/everything-about-the-operation-principles-of-ultrasonic-sensors/](https://sensorpartners.com/en/knowledge-base/everything-about-the-operation-principles-of-ultrasonic-sensors/).

18. Що таке тензодатчик і як він працює. [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://obrii.com.ua/info/19502-shho-take-tenzodatchik-i-yak-vin-pratsyuye.html](https://obrii.com.ua/info/19502-shho-take-tenzodatchik-i-yak-vin-pratsyuye.html).

19. Sensors definition [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://www.techtarget.com/whatis/definition/sensor](https://www.techtarget.com/whatis/definition/sensor).

20. Arduino [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://www.arduino.cc](https://www.arduino.cc).

21. Arduino IDE. Discover all the features of the Arduino IDE, our most popular programming tool. [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://docs.arduino.cc/software/ide/#ide-v2/](https://docs.arduino.cc/software/ide/#ide-v2/).

22. SG90-TowerPro [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://datasheetspdf.com/pdf-file/791970/TowerPro/SG90/1](https://datasheetspdf.com/pdf-file/791970/TowerPro/SG90/1).

23. Arduino Nano specs. [Електронний ресурс]/– Режим доступу: [www/ URL: https://docs.arduino.cc/hardware/nano-07.05.2022](https://docs.arduino.cc/hardware/nano-07.05.2022) р. – Загол. з екрану.

24. Overview of materials for Copper Alloy [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=e5272c3abef6485a87a391370eab18ca&ckck=1](http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=e5272c3abef6485a87a391370eab18ca&ckck=1)

25. GyverHX711 [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://github.com/GyverLibs/GyverHX711](https://github.com/GyverLibs/GyverHX711)

26. Методичні вказівки до виконання розділу "Охорона праці" у випускних роботах ОКР "бакалавр" усіх форм навчання / упоряд.: В. А. Айвазов. Т. Є. Стищенко., Н. Л. Березуцька ; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – 28 с.