

:

Розробка намотувального верстату для тороїдальних трансформаторів

АНОТАЦІЯ

У сучасних умовах розвитку електроніки та енергетики зростає потреба у високоточному та ефективному виготовленні котушок і трансформаторів. Тому актуальним є застосування сучасних технологій для автоматизації процесу намотування тороїдних котушок.

Метою дослідження є розробка та конструювання верстату намотування електронних елементів на тороїдних осердях із використанням засобів машинного зору та алгоритмів штучного інтелекту. Для досягнення цієї мети визначено такі завдання: проаналізувати існуючі методи автоматизації процесу намотування, дослідити можливості застосування технічних рішень, розробити конструкцію, оцінити перспективність отриманих результатів.

У дослідженні розглянуто застосування машинного зору, алгоритми штучного інтелекту, а також апаратні засоби — камери, мікроконтролери та приводи, інтегровані у намотувальний верстат.

Очікувані результати включають підвищення точності контролю кількості та розташування витків, своєчасне виявлення дефектів, зменшення відсотка браку та зростання продуктивності обладнання. Практична цінність роботи полягає у впровадженні розроблених рішень у виробництво, що дозволить оптимізувати процес виготовлення і забезпечити стабільну якість продукції.

Робота виконується в рамках річного проекту на конкурс наукових робіт і науково-технічних (експериментальних) розробок молодих учених та здобувачів вищої освіти в [REDACTED]

Ключові слова: намотувальний верстат, тороїдні котушки, трансформатори, автоматизація, контроль якості, машинний зір, штучний інтелект.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПРОТОТИПІВ НАМОТУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ ТА СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	6
1.1. Автоматизація процесів намотування тороїдних котушок та трансформаторів.....	6
1.2. Алгоритми штучного інтелекту для контролю та управління технологічними процесами	7
1.3. Аналіз існуючих досліджень у сфері намотування тороїдних катушок	8
1.4. Висновки до розділу	10
РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА ЧАСТИНА ВЕРСТАТУ	11
2.1. Опис конструкції верстата	11
2.2. Розрахунок параметрів поворотного механізму	13
2.3. Висновки до розділу	16
РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОННА ЧАСТИНА ВЕРСТАТУ	17
3.1 Перелік використаних елементів.....	17
3.2 Принцип роботи електронної частини.....	17
3.3 Розрахунок енергоспоживання	19
3.4 Мікрокроковий режим роботи двигуна	22
3.5. Висновки до розділу	24
ВИСНОВКИ.....	25
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	26
Додаток А – Перелік елементів верстату	30
Додаток Б – Характеристики елементів верстату.....	33

ВСТУП

Сучасна електронна промисловість та енергетика активно розвиваються, що зумовлює зростання потреби у високоякісних котушках та трансформаторах. Тороїдні котушки мають низку переваг порівняно з іншими типами індукційних елементів, зокрема компактність, високий коефіцієнт корисної дії та зменшені електромагнітні втрати. Проте їх масове автоматизоване виготовлення є технічно нетривіальним завданням з високими вимогами до точності намотування, що робить процес трудомістким і схильним до появи дефектів у разі ручного контролю.

В умовах глобальної автоматизації виробничих процесів усе більшої актуальності набуває використання систем машинного зору та штучного інтелекту. Вони дозволяють не лише знизити вплив людського фактора, але й забезпечити точний контроль якості у реальному часі. Упровадження подібних технологій у процес намотування тороїдних котушок здатне суттєво підвищити ефективність виробництва, зменшити відсоток браку, оптимізувати витрати та підняти рівень технологічної надійності.

Об’єкт дослідження – верстат для намотування тороїдних котушок та трансформаторів.

Предмет дослідження – процес намотування трансформаторів, конструкція верстату для намотування котушок і трансформаторів та система керування процесом намотування.

Мета роботи – підвищення якості та ефективності намотування тороїдних котушок та трансформаторів а, отже, і отриманих виробів шляхом вдосконалення конструкції верстату та системи керування процесом намотування.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести огляд сучасних методів автоматизації процесів намотування та контролю якості електронних елементів;

- дослідити можливості застосування машинного зору та штучного інтелекту у виробничих системах, зокрема у системі керування процесом намотування трансформаторів;
- розробити вдосконалену механічну та електронну частину верстату.
- оцінити результати застосування запропонованої системи та визначити її ефективність.

Наукова новизна роботи полягає у використанні алгоритмів машинного зору та штучного інтелекту для контролю процесу намотування тороїдних котушок та трансформаторів, що дозволяє поліпшити якісні показники даних виробів.

Практична цінність отриманих результатів полягає у:

- використанні результатів дослідження розробниками промислового обладнання яке використовується на виробництві електронних компонентів;
- зменшенні браку та забезпеченні підвищення якості продукції в процесі виготовлення моточних вузлів;
- впровадження в навчальний процес електронних та електротехнічних спеціальностей, технічних ліцеїв та університетів.

Методи дослідження

- Аналітичний розрахунок елементів схеми, 3Д моделювання електромеханічної частини верстату, виготовлення макету електронної та механічної складової верстату.

Апробація роботи

- 1) Міжнародна науково-практична конференція «Юність науки 2024».
- 2) Міжнародна науково-практична конференція «Новітні технології сучасного суспільства» (НТСС 2024).
- 3) Міжнародна науково-практична конференція «Юність науки 2025»

Публікації:

Тези в цих міжнародних конференціях (3 шт.).

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПРОТОТИПІВ НАМОТУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ ТА СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1. Автоматизація процесів намотування тороїдних котушок та трансформаторів

Процес виготовлення тороїдних котушок та трансформаторів (Рис. 1.1) є ключовим у виробництві електронних пристроїв, де точність намотування впливає на електричні параметри та надійність.

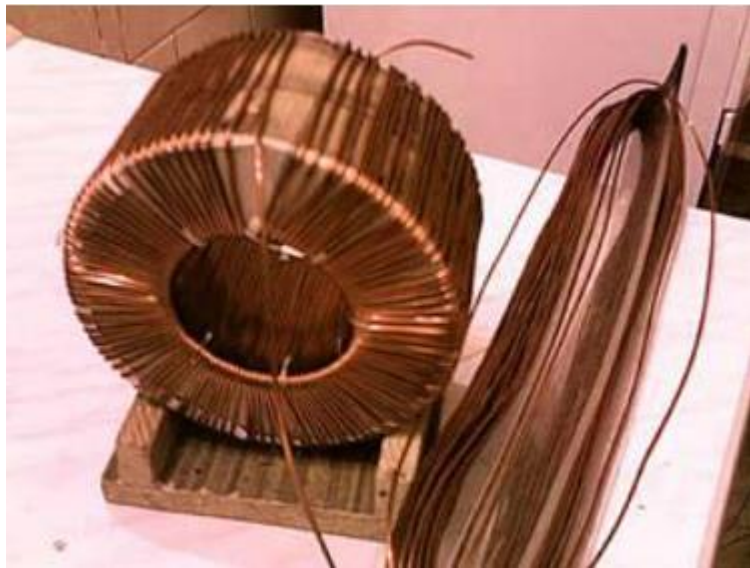


Рисунок 1.1 – Ручне намотувальне приладдя [1]

Історія розвитку обладнання еволюціонувала від ручного намотування, залежного від людського фактора, до механічних пристроїв з приводами (Рис.1.2) та напівавтоматичних систем з регулюванням швидкості і лічильниками витків. Сучасні ЧПК-верстати забезпечують точність без постійного контролю оператора, що знижує вплив людського фактору на кінцевий виріб.

Основні вимоги до верстату: контроль кількості витків, рівномірна щільність намотування та уникнення обриву проводу. Традиційні методи контролю (візуальний огляд, електричні вимірювання) обмежені пост-виробничим характером. Це призводить до невчасного виявлення дефекту, що з'явився в процесі намотування, з подальшими додатковими витратами (на матеріал, енергію тощо), які можна було б уникнути. Це зумовлює

потребу в використанні машинного зору (Рис.1.3) та штучного інтелекту (ШІ) для оперативного виявлення дефектів у реальному часі.

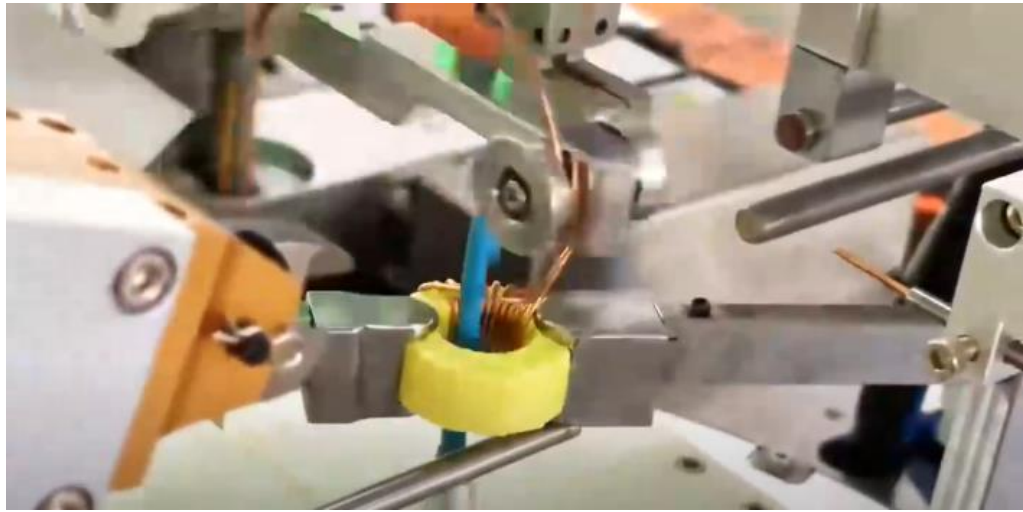


Рисунок 1.2 – Намотувальний верстат гачкового типу [2]

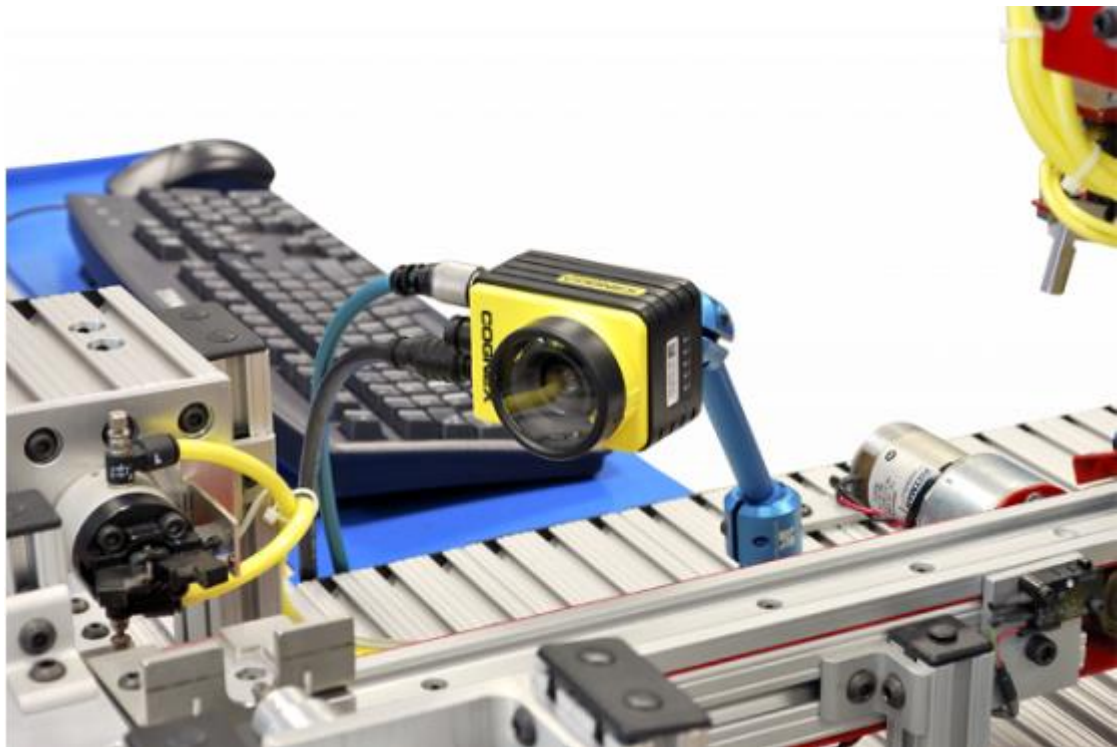


Рисунок 1.3 – Камера на виробничій лінії [3]

1.2. Алгоритми штучного інтелекту для контролю та управління технологічними процесами

Сучасний ШІ на основі нейронних мереж (НМ) є дуже гнучким інструментом, що дозволяє використовувати його для великої кількості різноманітних завдань. Один з способів його використання полягає у

виявленні дефектів у зображеннях, а саме розпізнавання мікротріщин чи порушень структури. Поряд з НМ також широко застосовуються алгоритми класифікації, такі як: k-Nearest Neighbors, SVM, Decision Trees, тощо. Вони допомагають класифікувати деталі та певні дефекти (Рис.1.4), забезпечуючи автоматизацію контролю, хоча і мають меншу гнучкість на відміну від НМ. Приклади оптимізації за допомогою ШІ: регулювання швидкості намотування, адаптивний натяг дроту, прогноз відмов обладнання. Наразі прослідковуються такі тенденції використання ШІ: Deep Learning для обробки даних, CNN(Convolutional Neural Network) для візуального аналізу, Edge AI для вбудованих пристроїв та інтеграція з IoT для "розумних фабрик". Зокрема, у випадку контролю процесу намотування троїдного трансформатора, CNN ефективні для класифікації дефектів намотування, таких як зазор чи перетин, що підвищує якість продукції.

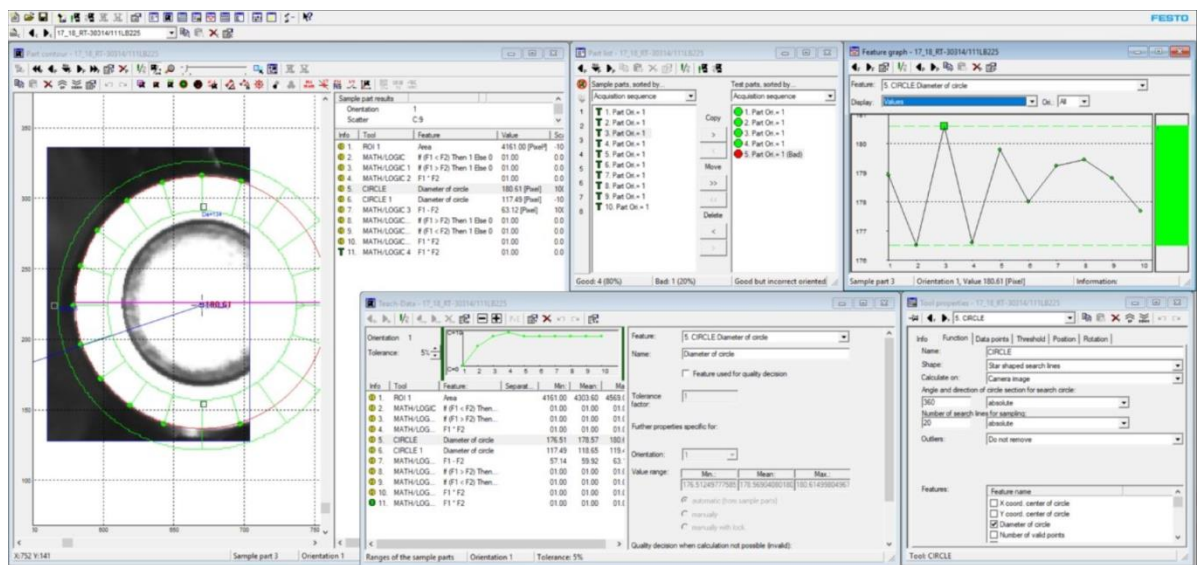


Рисунок 1.4 – Інтерфейс системи розпізнавання образів [4]

1.3. Аналіз існуючих досліджень у сфері намотування тороїдних котушок

Історично керування намотувальними верстатами еволюціонувало від суто механічних схем [5 - 7] до електронних і цифрових систем, орієнтованих на високу повторюваність параметрів [8, 9]. Класичні патенти на тороїдні

намотувальні машини описують механізми подачі та руху «човника», що вже тоді закладали основу для автоматизації [5, 6]. На додаток до цього, сучасні реалізації широко використовують програмовані логічні контролери (PLC) для надійного керування в реальному часі та інтеграції з приводами й датчиками [8].

Один з шляхів розвитку передбачає використання низьковартісних або лабораторних рішень, наприклад, на базі Arduino з GRBL як контролер осей та лічильнику витків [10, 11]. Наразі опубліковано низку практичних проєктів повністю автоматичних або напівавтоматичних намотувачів на основі Arduino з енкодерами та датчиками, що демонструють життєздатність такого підходу для прототипування та малого виробництва [10 - 12]. У промисловому сегменті, навпаки, впроваджуються комплексні автоматичні машини з повним циклом — від подачі дроту до відрізання й зняття виробу, — де цифрове керування тісно координується з механікою та сенсорикою [8, 9].

На додаток до систем керування, важливу роль у стабілізації натягу дроту та геометрії намотування відіграють сенсори та датчики. Для замкнених контурів зворотного зв'язку активно застосовують тензодатчики (load cells), енкодери та вимірювачі діаметра/положення, що забезпечують автоматичні корекції в режимі реального часу та безпосередньо знижують брак [8, 13 - 15]. У процесі намотування виникає проблема виявлення дефектів і сенсор повинен оцінити поточний стан усього виробу, щоб мати можливість точно оцінити ситуацію. Дана проблема спонукає до спроб інтеграції машинного зору в намотувальні системи, адже вони дозволяють опрацьовувати одразу весь виріб, для знаходження дефектів [16, 17].

Як описано в наукових статтях та патентах, у дослідженнях останніх років пропонуються методики «візуального контролю намоток»: від вимірювання «кутів нахилу витків» трансформаторних обмоток [18] до класифікації дефектів намотування за допомогою глибоких нейронних мереж (DNN/CNN) [19, 20]. Наприклад, безконтактне візуальне вимірювання

параметрів намотки з попередньою корекцією зображення, Otsu-бінаризацією та виділенням «скелету» проводу дозволяє провести точні метричні оцінки [18], а DNN ефективно класифікують типові помилки, такі як gap(постота) чи crossover(перетин) [19, 20]. На практиці машинний зір інтегрується в промислові рішення як AOI(Automated Optical Inspection)/CCD(Charge-Coupled Device)-станції перевірки індукторів [22] чи візійні модулі в тороїдних намотувальних машинах для інспекції витків. Патентні документи фіксують подальшу автоматизацію тороїдних намотувачів, де конструкції та алгоритми спрямовані на подолання обмежень відомих рішень у тісному зв'язку з сенсорикою та керуванням [23].

1.4. Висновки до розділу

Станом на сьогодні існує розгалужена база рішень — від доступних Arduino-проектів та класичних синхронізованих систем керування до повністю автоматичних промислових машин із тензометричним контролем натягу та оптичною метрологією. Дослідження і патентні заявки показують чітку тенденцію до інтеграції машинного зору та глибокого навчання у процес намотування — з переходом від пост-фактум інспекції до контролю та корекції параметрів у реальному часі. Це створює методологічну основу для подальшої розробки системи контролю намотування тороїдів з машинним зором і ШІ.

РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА ЧАСТИНА ВЕРСТАТУ

2.1. Опис конструкції верстата.

Конструкція верстата має забезпечити рух нитки (проводу) через отвір тороїдного осердя та поворот самого тороїда для рівномірного розподілення витків. Вона повинна бути компактною, жорсткою та збалансованою задля стабільності роботи. Електромеханічна частина складається з кількох основних вузлів, які забезпечують привід верстату. Для розробки та виготовлення деталей корпусу верстата залучено 3D моделювання. За допомогою моделі візуалізовано габарити, форму та розташування елементів конструкції верстату (Див. Рис. 2.1). Модель виконана в CAD (система автоматизованого проектування computer-aided design) з використанням метричних одиниць вимірювання.

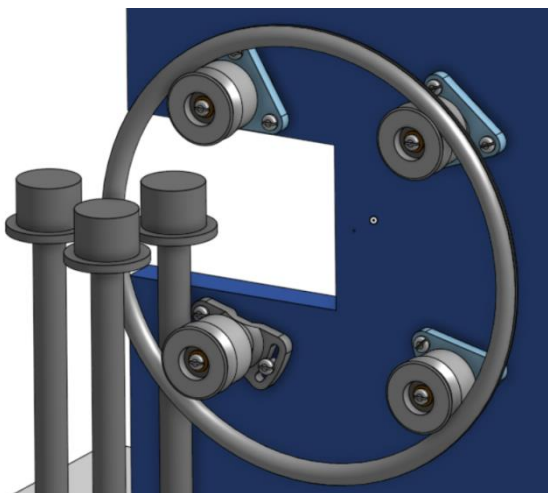


Рисунок 2.1 - 3D модель механізму намотування

Кільцева шпуля з човником (носій дроту). Деталь має форму кільця або диску з пазом, в який укладається провід. Може бути вигнуте, виточене чи фреззоване з металу або виготовлене з пластику за допомогою 3D друку. До кільця кріпиться човниковий знімач, що ковзає по ньому та поступово віддає провід під час намотування. Кінець обмотувального дроту, довжина якого попередньо розрахована, закріплюється за отвір у кільцевій деталі та намотується у жолоб. На рис. 2.2 зображено різні профілі кільця.

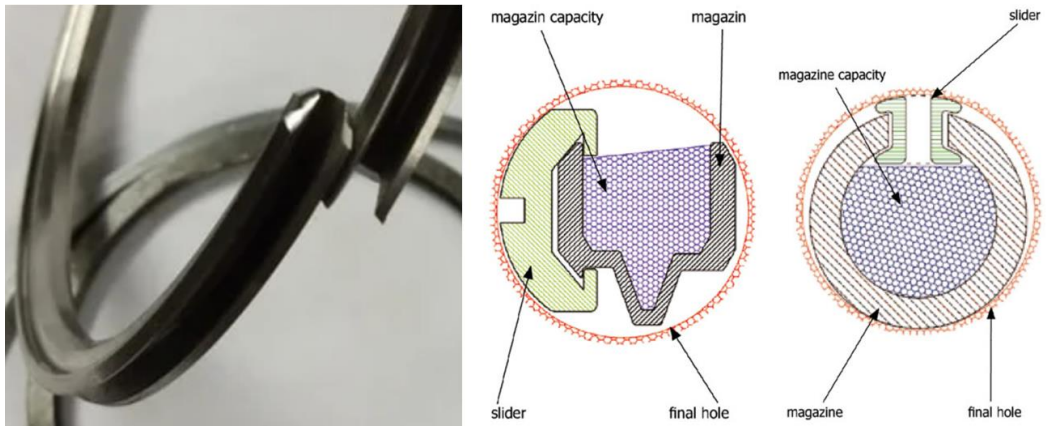


Рисунок 2.2 – Кільце та схематичний вид у розрізі [24] [25]

Електропривід. Двигун постійного струму керований драйвером з ШІМ (Рис. 2.3). Редуктор використовувати необов'язково, передатне число визначається відношенням діаметрів приводного ролика та кільця. Обертний момент подається до кільця через фрикційну або ремінну передачу.

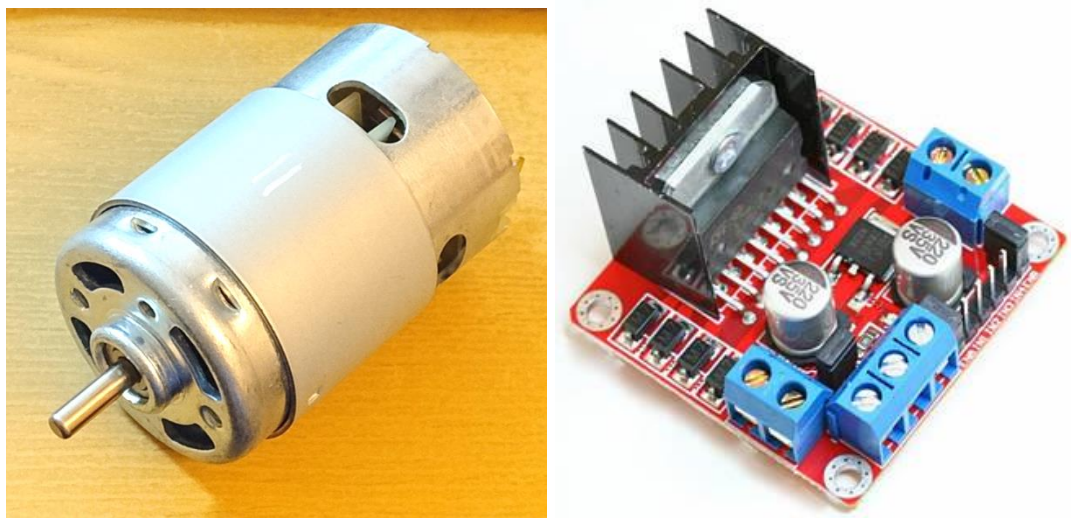


Рисунок 2.3 – Двигун постійного струму типорозміру 895 та його драйвер L298N [26]

Тримач осердя. Тороїдне осердя фіксується у регульованому тримачі що складається з трьох пружних роликів. Протягом намотування тримач поступово обертає осердя залежно від заданої кількості обмоток.

Електропривід Кроковий двигун керований драйвером, для енергоефективності та плавності ходу використовується мікрокроковий режим ходу (Рис 2.4).

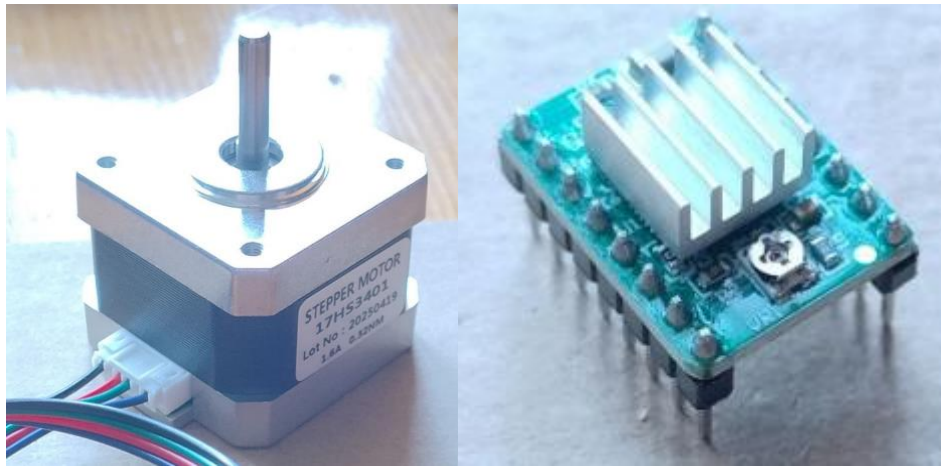


Рисунок 2.4 – Кроковий двигун та його драйвер A4988 [27]

2.2 Розрахунок параметрів поворотного механізму.

Головне завдання поворотного механізму, рівномірно розподілити витки провіднику на поверхні тороїду. Для цього треба дізнатися скільки кроків повинен зробити кроковий двигун між витками. Так як при збільшенні кількості витків на тороїдному осерді кут між витками зменшиться, то, при сталому значенні кута кроку двигуна, кількість кроків двигуна теж зменшиться, тоді маємо:

$$N_{wstp} = \frac{a_w}{N_{wind}} \quad (1)$$

де:

N_{wstp} – кількість кроків двигуна між витками;

a_w – коефіцієнт узгодження;

N_{wind} – кількість витків, що треба намотати.

Для знаходження коефіцієнту a_w розглянемо ситуацію показану на рис. 2.5.

На рис. 2.5 зображено 3 ролика поворотного механізму та тороїд, що утримується між ними. Усі ролики синхронно обертаються на кут що задається кроковим двигуном.

При умові, що ролики механізму та тороїд мають достатнє зчеплення, тобто не ковзають один по одному, довжини дуг кіл на які були повернуті обидва об'єкти рівні, тоді:

$$\frac{\pi d_{st} \alpha_{st}}{360^\circ} = \frac{\pi d_t \alpha_t}{360^\circ} \quad (2)$$

де:

d_{st} – діаметр ролика;

α_{st} – кут повороту ролика;

d_t – зовнішній діаметр тороїда;

α_t – кут повороту тороїда.

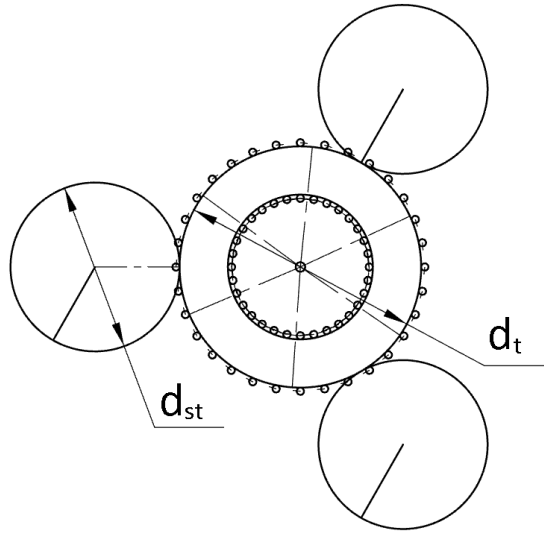


Рисунок 2.5 – Схема поворотного механізму

Перетворивши та спростивши (2), отримаємо:

$$\alpha_t = \frac{d_{st}}{d_t} \alpha_{st} = b_r \alpha_{st} \quad (3)$$

де:

b_r – змінна відношення діаметрів ролика до тороїда.

Знаючи мінімальний кут повороту крокового двигуна (α_{stmin}) з технічної документації, можна представити α_{st} як добуток α_{stmin} на відповідну кількість кроків N_{stmin} . Тоді попереднє рівняння (3) матиме вигляд:

$$\alpha_t = b_r \alpha_{stmin} N_{stmin} \quad (4)$$

Знайдемо N_{stmin} з рівняння (4):

$$N_{stmin} = \frac{\alpha_t}{b_r \alpha_{stmin}} \quad (5)$$

В результаті отримали рівняння (5) залежності кількості кроків крокового двигуна від кута повороту тороїда.

Якщо у формулу (5) підставити замість α_t потрібний кут між витками на тороїдальному осерді, то ми отримаємо формулу для N_{wstp} :

$$N_{wstp} = \frac{\alpha_{twind}}{b_r \alpha_{stmin}} \quad (6)$$

де:

α_{twind} – потрібний кут між витками.

Знаючи N_{wind} , отримаємо:

$$\alpha_{twind} = \frac{360^\circ}{N_{wind}} \quad (7)$$

Підставивши рівняння (7) у рівняння (6) отримаємо:

$$N_{wstp} = \frac{360^\circ}{b_r \alpha_{stmin} N_{wind}} \quad (8)$$

Звідси a_w :

$$a_w = \frac{360^\circ}{b_r \alpha_{stmin}} \quad (9)$$

Використовуючи рівняння (8), для розрахунку кількості кроків крокового двигуна, потрібно розглянути три випадки:

1. Значення N_{wstp} є натуральним.
2. Значення N_{wstp} не є натуральним.
3. Значення $N_{wstp} < 1$.

У першому випадку натуральне значення вказує, що кроковий двигун має виконати саме N_{wstp} мінімальних кроків, щоб забезпечити точне розташування провідника на тороїді.

У другому випадку, так як N_{wstp} не є натуральним, двигун зможе виконати лише $\lfloor N_{wstp} \rfloor$ мінімальних кроків. Це спричинить більш щільне укладання витків провідника та, відповідно, утворення додаткового вільного простору між початком і кінцем намотування (на рис. 2.6 витки зображені суцільними лініями, а сектор між пунктирними лініями відповідає цьому простору).

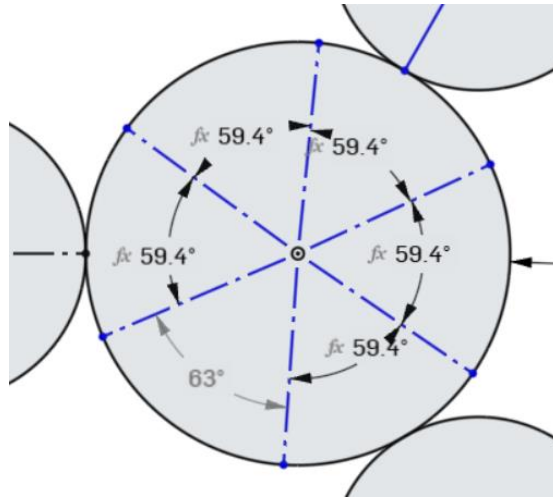


Рисунок 2.6 – Приклад похибки роботи двигуна в режимі повного кроку

У третьому випадку застосування крокового двигуна в стандартному режимі є недоцільним, оскільки це спричинить накладання початкових і кінцевих витків. Для вирішення проблеми можна розглянути три варіанти: використати двигун з меншим кроком; змінити ролик двигуна з метою коригування параметра b_r ; або застосувати режим мікрокроків (за умови його підтримки). Серед перелічених рішень найбільш доцільним є третій варіант, адже навіть у найгіршому випадку він вимагатиме лише придбання нового драйвера крокового двигуна з підтримкою мікрокрокового режиму, що є простішим, енергоефективним рішенням порівняно з іншими.

2.3. Висновки до розділу

В розділі показано створену авторами 3D модель механізму верстата, що забезпечує гнучке проектування конфігурацій верстату, розглянуто будову кільця, описано електропривід та отримано формули розрахунку кількості кроків для поворотного механізму.

РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОННА ЧАСТИНА ВЕРСТАТУ

3.1 Перелік використаних елементів

Для реалізації електронної частини верстата використано компоненти: модуль камери 8MP IMX219 Autofocus; дисплей Raspberry Pi 5.0 inch LCD 800x480 Capacitive Touch Screen; мікрокомп'ютер Raspberry Pi 5 8GB; перетворювач напруги XL6019. Їх зовнішній вигляд показано на рисунках А.1 – А.6 в додатку А, а їх основні параметри наведені в додатку Б.

3.2 Принцип роботи електронної частини

Розроблена електрична принципова схема верстату приведена на Рис. 3.1.

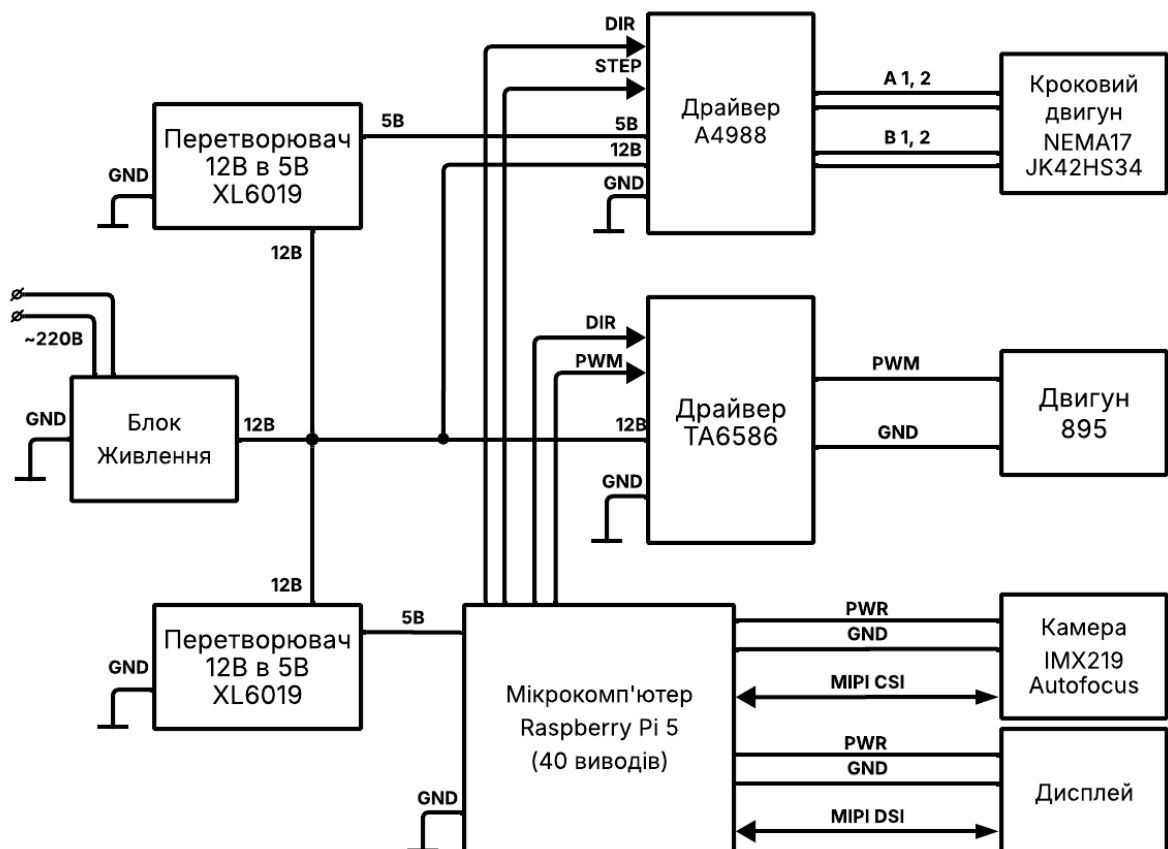


Рисунок 3.1 – Електрична принципова схема верстату

Пояснення умовних позначень з'єднань на Рис. 3.1:

- 12B – Вивід живлення 12 В
- 5B – Вивід живлення 5В
- GND – Вивід землі
- DIR – Вивід драйверу для керування напрямком обертання двигуна
- STEP – Вивід драйверу для імпульсів, що керують кроками крокового двигуна.
- PWM – Вивід драйверу для ШИМ сигналу, що керує швидкістю обертання двигуна постійного струму
- PWR – Живлення 5В на шині
- MIPI CSI – Інтерфейс камери
- MIPI DSI – Інтерфейс дисплею

Електронна частина даного верстату являє собою систему на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 5 (далі комп'ютер). Система отримує інформацію про стан намотування за допомогою камери. Оцінка здійснюється за допомогою моделі штучного інтелекту, натренованої на датасеті проміжних станів намотування. Дана модель виявлятиме такі дефекти як: прогалина, перехрещення, виступ або обрив провіднику [gar crossover]. В залежності від виявленого дефекту верстат, або видасть попередження у вигляді повідомлення виявивши прогалину чи виступ, з запитом на продовження роботи, або повністю зупинить процес намотування виявивши перехрещення чи обрив провіднику. Якість виробу оцінюється за середньоквадратичним відхиленням оцінок проміжних станів, наданих моделлю ІІІ.

Уся інформація про теоретичні параметри тороїдного трансформатору, його стан, інтерфейс взаємодії та повідомлення відображатиметься на дисплеї, що приєднаний до комп'ютера.

Комп'ютер також керує положенням тороїдного осердя через кроковий двигун, користуючись формулами з попереднього розділу, та швидкістю обертання ободу, що намотує провідник на осердя, впливом на двигун постійного струму.

Живитися верстат від імпульсного джерела живлення напругою 12 В. Сам верстат поділений на силову та електронну частини. Силова частина включає в себе драйвера двигунів крокового та постійного струму, разом з відповідними двигунами. Живиться вона від блоку живлення напругою 12 В. Електронна частина включає усі інші елементи вказані у списку використаних частин. Напруга даної частини складає 5 В, що досягається завдяки DC-DC перетворювачам XL6019 налаштованим на відповідну напругу. Використано два перетворювачі XL6019 для окремого живлення Raspberry Pi та інших електронних компонентів.

3.3 Розрахунок енергоспоживання

Для оцінки достатності потужності блоку живлення розраховано енергоспоживання в нормальному та максимальному режимах. Так як двигуни не містять у собі керуючої електроніки, їх буде розраховано окремо.

Розрахуємо споживання кожного елементу верстату (зазначимо що змінні з індексом max значать максимальне споживання, з typ - нормальне).

Модуль камери 8MP IMX219 Autofocus (Рис. А.1). Його необхідні характеристики[28] зазначені у Табл. Б.1.

Згідно з характеристиками даний елемент споживає:

$$P_{cam,max} = 38 \text{ mA} * 3\text{V} + 160 \text{ mA} * 1.3 \text{ V} = 322 \text{ mW},$$

$$P_{cam,typ} = 50 \text{ }\mu\text{A} * 3\text{V} + 10\mu\text{A} * 1.98\text{V} + 50\mu\text{A} * 1.3\text{V} = 234.8\mu\text{W}.$$

Дисплей Raspberry Pi 5.0 inch LCD 800x480 Capacitive Touch Screen (Рис. А.2). Його необхідні характеристики [29] зазначені у Табл. Б.2.

Згідно з характеристиками даний елемент споживає:

$$P_{mon,max} = 5.1\text{V} * 750\text{mA} = 3.825\text{W},$$

$$P_{mon,typ} = 5\text{V} * 490\text{mA} = 2.45\text{W}.$$

Драйвер крокового двигуна A4988 (Рис. 2.4). Його необхідні характеристики [27] зазначені у Табл. Б.3.

Згідно з характеристиками даний елемент споживає:

$$P_{\text{stdr,max}} = 4\text{mA} * 12\text{V} + 8\text{mA} * 5,5\text{V} = 92\text{mW},$$

$$P_{\text{stdr,noload}} = 12\text{V} * 2\text{mA} + 5\text{V} * 5\text{mA} = 49\text{mW}.$$

Драйвера двигуна постійного струму L298 (Рис. 2.3). Його необхідні характеристики [26] зазначені у Табл. Б.4.

Згідно з характеристиками даний елемент споживає:

$$P_{\text{dcdr,max}} = 5\text{V} * 36\text{mA} = 180\text{mW}.$$

Перетворювач напруги XL6019 підвищуючий/знижуючий DC-DC перетворювач (Рис. А.4). Його необхідні характеристики [30] зазначені у Табл. Б.5.

Використовуються два такі перетворювачі для меншого впливу двигунів на мікрокомп'ютер, один перетворювач для живлення драйверів двигунів, другий перетворювач для живлення Raspberry Pi, разом з камерою та дисплеєм, однак дисплей та камера живляться від самого комп'ютера. Це означає що живлення Raspberry Pi, камери та дисплею обмежується живленням самого Raspberry Pi. В результаті перетворювач, що живить драйвери споживає:

$$P_{\text{dcdc max}} = 5\text{V} * (36 + 8)\text{mA} * 0.2 = 55 \text{ mW},$$

$$P_{\text{dcdc typ}} = 5\text{V} * (36 + 5)\text{mA} * 0.2 = 41\text{mW};$$

а той що живить Raspberry Pi:

$$P_{\text{dcdc max rasp}} = 5 * 5\text{A} * 0.2 = 5\text{W},$$

$$P_{\text{dcdc typ rasp}} = 5\text{V} * 400\text{mA} * 0.2 = 400\text{mW}.$$

Розрахунки показують, що навантаження на перетворювачі розподілено нерівномірно. Один з варіантів рішення є з'єднання виходів цих перетворювачів, зробивши їх паралельне з'єднання, однак у цьому випадку можливі явища дисбалансу навантажень, бо даний перетворювач не має

можливості працювати у режимах DLS(Droop Load Sharing) чи ACS(Active Current Share) [31], або інтерференції, через однакову частоту пульсацій вихідної напруги (Див. Табл. Б.5), що можуть спричинити нестабільну роботу підключених пристроїв, або вивести з ладу один з перетворювачів.

Мікрокомп'ютер Raspberry Pi 5 8GB (Рис. А.3). Його необхідні характеристики [32] зазначені у Табл. Б.6.

Згідно з характеристиками даний елемент споживає:

$$P_{\text{rasp,max}} = 5V * 5A = 25W,$$

$$P_{\text{rasp,typ}} = 5V * 400mA = 2W.$$

Підсумувавши та округливши до десятих отримані результати отримаємо:

$$P_{\text{sum,max}} = 56,2W, P_{\text{sum,typ}} = 5,1W.$$

Було обрано імпульсний блок живлення (Рис. А.5) потужністю:

$$P_{\text{src}} = 60W.$$

Розрахуємо скільки потужності буде припадати на двигуни верстату:

$$P_{\text{mot,min}} = P_{\text{src}} - P_{\text{sum,max}} = 3,8W,$$

$$P_{\text{mot,typ}} = P_{\text{src}} - P_{\text{sum,max}} = 54.9W.$$

У випадку коли кроковий двигун буде споживати максимальний допустимий струм у сталому положенні, знайдемо скільки потужності буде доступно для двигуна постійного струму. Характеристики крокового двигуна Jkongmotor NEMA17 JK42HS34 [33] зазначені у Табл. Б.7.

Розрахуємо споживання крокового двигуна:

$$P_{\text{step,max}} = 2.1\Omega * (1.33A)^2 = 3.7W.$$

В результаті двигуну постійного струму буде доступно:

$$P_{\text{dc,min}} = P_{\text{mot,min}} - P_{\text{step,max}} = 0.1W,$$

$$P_{\text{dc,typ}} = P_{\text{mot,typ}} - P_{\text{step,max}} = 51.2W.$$

На основі характеристик двигуна типорозміру 895 (див. Табл. Б.8) [35] розрахуємо споживану потужність холостого ходу:

$$P_{xx} = 12V * 1.1A = 13.2W.$$

Користуючись результатами попередніх розрахунків, розрахуємо кількість енергії доступної двигуну для роботи під навантаженням:

$$P_{rem,min} = P_{dc,min} - P_{xx} = -13.1W,$$

$$P_{rem,typ} = P_{dc,typ} - P_{xx} = 38W.$$

В результаті отримано, що з одного боку, у режимі максимального споживання, джерело не має можливості забезпечити достатньою кількістю енергії двигун постійного струму для роботи у режимі холостого ходу при напрузі 12В, з іншого боку розрахунки підтверджують достатність потужності блоку живлення для нормальної експлуатації верстата.

Прийнявши до уваги, що тренування моделі ШІ (найбільш ресурсомісткий процес, бо потребує великої кількості простих розрахунків) буде відбуватися на іншому пристрої; програма, що буде виконуватися на придбаному комп'ютері, не передбачає постійного використання значної частини об'єму доступних ресурсів; даний запас ресурсів комп'ютеру призначений для забезпечення короткотривалих стрибків обсягу розрахунків пов'язаних з роботою моделі ШІ, - даний верстат не буде досягати максимального режиму споживання, і використання обраного джерела живлення є виправданим.

3.4 Мікрокроковий режим роботи двигуна

У ході намотування дроту на тороїдне осердя можливий випадок, коли кута кроку двигуна буде недостатньо для забезпечення рівномірного намотування дроту, у цьому випадку доведеться використовувати режим мікрокроків крокового двигуна. У даному режимі драйвер модулює струм у обмотках з певним співвідношенням, створюючи проміжні положення між повними кроками. Це дозволяє двигуну займати позиції, які є частками стандартного кроку (наприклад, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 або навіть 1/32 кроку). Цей режим спонукає до розподілення доступного струму драйвера між обмотками

двигуна, що впливає на теплові витрати самого двигуна. Розрахуємо ці витрати, як суму витрат кожної обмотки:

$$P_{step,dis} = R (I * j)^2 + R (I * (1 - j))^2 \quad (10)$$

де: R – опір обмотки крокового двигуна;

I – максимальний вихідний струм драйверу двигуна;

j – коефіцієнт співвідношення струму в обмотках.

В характеристиках крокового двигуна (Табл Б.7) зазначено, що опір обмоток – 2.1 Ом. Максимальний струм з драйверу, визначається максимальним струмом обмотки крокового двигуна (Табл Б.7), становить – 1.33 А. Знаючи ці величини побудуємо графік залежності теплових витрат двигуна від коефіцієнта відношення струмів прикладених до обмоток див Рис. 3.2.

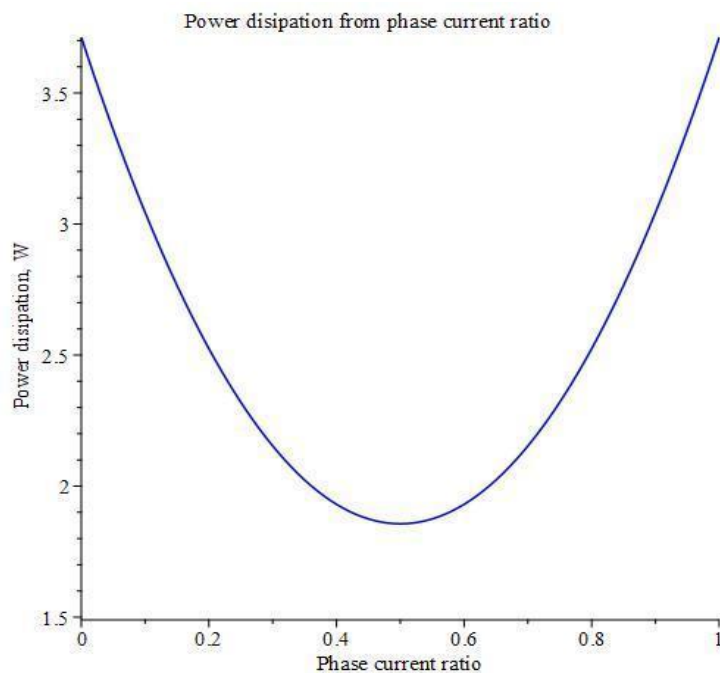


Рисунок 3.2 – Графік теплових втрат крокового двигуна

З графіку видно, що найбільш економне в плані теплових витрат відношення струмів є 0.5, що відповідає 1/2 частині повного кроку. Значення теплових втрат у даній точці рівне 1,85W. При $j=0$ теплові втрати становлять 3,71W. Поділивши значення втрат при $j=0.5$ на значення при $j=0$, знайдемо відсоток зниження втрат. В результаті втрати знизилися до 50% від початкових.

3.5. Висновки до розділу

В даному розділі розглянуто електронну частину верстату та його компоненти. Проаналізовано технічну документацію перелічених елементів, і на основі отриманих даних, розраховано максимальну та типову споживану потужність верстату.

Розраховане споживання верстату при вимкнених двигунах складає 5.1 Вт. Також виявлено, що обраного блоку живлення не вистачить для роботи верстату у режимі максимального споживання всіма компонентами одночасно, однак аргументовано малоймовірність досягнення верстатом такого режиму роботи. Оцінена максимальна потужність споживання складає 71.3 Вт. За необхідності можна використати більш потужний блок живлення.

Додатково зазначено причини застосування мікрокрокового режиму крокового двигуна для намотування провіднику. Розраховано залежність теплових втрат крокового двигуна від заданого проміжного положення. На основі отриманих розрахунків побудовано графік залежності теплових втрат від коефіцієнту розподілення струму на обмотках, що являє собою частку повного кроку на який було повернуто вал крокового двигуна. Виявилося, що при повороті валу двигуна на половину кроку, з подальшою фіксацією положення, досягається зниження теплових втрат крокового двигуна на 50%.

ВИСНОВКИ

Розроблений верстат дозволяє підвищити продуктивність і точність процесу виготовлення тороїдних трансформаторів, зменшити вплив людського фактора та оптимізувати витрати матеріалів, підвищити якість отриманих виробів.

Розглянуто концепцію впровадження системи контролю якості за допомогою машинного зору та штучного інтелекту.

У ході виконання роботи проведено аналіз конструкцій існуючих намотувальних верстатів та визначено основні вимоги до обладнання для виготовлення тороїдних трансформаторів. На основі досліджень обрано елементну базу, обрано вторинну напругу живлення 12В та проведено розрахунки енергоспоживання верстата. Загальна потужність споживання в нормальному режимі роботи склала 73,1 Вт.

Напівкроковий режим роботи крокового двигуна є оптимальним, з енергетичної точки зору, серед режимів з нецілим числом кроків.

Отримані результати можуть бути використані для подальшого удосконалення конструкції, автоматизації технологічного процесу намотування трансформаторів і котушок та впровадження на виробництві верстатів та в учбовому процесі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Намотка тороїдального трансформатора своїми руками : вебсайт. Tokar.guru. URL: <https://tokar.guru/stanki-i-oborudovanie/namotka-toroidalnogo-transformatora-svoimi-rukami.html>.
2. Toroidal Coil Winder — Demonstration : відео. YouTube. URL: <https://youtu.be/KhOMriXkZ4E?si=s0PjZNb0rLEhGopw>.
3. Smart Factory Vision Inspection Learning System Siemens S7-1500 : вебсайт. Amatrol. URL: <https://amatrol.com/product/smart-factory-vision-inspection-learning-system-siemens-s7-1500/>.
4. Машинний зір : вебсайт. Svitovyr. URL: https://svitovyr.ua/machine_vision/.
5. King E. J. Toroidal Coil Winding Machine : патент US2957634A від 1960-10-25. URL: <https://patents.google.com/patent/US2957634A/en>.
6. Toroidal Coil Winding Machine : патент US2986351A від 1961-05-30. URL: <https://patents.google.com/patent/US2986351A/en>.
7. Winding Device : патент JPS6174319A від 1986-04-15. URL: <https://patents.google.com/patent/JPS6174319A/en>.
8. Automatic Toroidal Core Winding Machine : патент US11133127B2 від 2021-09-28. URL: <https://patents.justia.com/patent/11133127>.
9. Toroidal Coil Winding Machine : патент EP4170691A1 від 2023-04-26. URL: <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20230426/patents/EP4170691NWA1/document.pdf>.
10. Arduino/GRBL Based Desktop Automatic Coil Winder! : вебсайт. Instructables. URL: <https://www.instructables.com/Make-an-Automatic-Coil-Winder/>.
11. An Arduino to Control and Count to 200 Rev for a Coil Winder : форум. Arduino Forum. URL: <https://forum.arduino.cc/t/an-arduino-to-control-and-count-to-200-rev-for-a-coil-winder/1323683>.

12. Arduino Controlled Coil Winder V2 : відео. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=rDyq1ccj5w0>.
13. Measuring Outer Diameter — Case Studies Customer Testimonials : вебсайт. Keyence. URL: https://www.keyence.eu/ss/products/measure/measurement_library/application/voices/out_diameter/.
14. Tension Control Solutions : електронний ресурс. Maxcess International. URL: <https://www.maxcessintl.com/wp-content/uploads/2023/02/Tension-Control-Solutions-EN.pdf>.
15. Application Solutions for Inner and Outer Diameter Measurement : вебсайт. Keyence. URL: <https://www.keyence.com/products/measure/applications/dimension-measurement/inner-and-outer-diameter-measurement.jsp>.
16. SMD Inductor Coil CCD Inspection Machine : вебсайт. Vacuz. URL: <https://vacuz.com/product-category/smd-inductor-production-machine/smd-inductor-coil-ccd-inspection-machine/>.
17. Augmented Classification for Electrical Coil Winding Defects. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-08671-w>.
18. Zhang Y. et al. Research and Application of Contactless Measurement of Transformer Winding Tilt Angle Based on Machine Vision. Sensors, 2023. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10220556/>.
19. Wang Y. et al. Detection Method for Inter-Turn Short Circuit Faults in Dry-Type Transformers Based on Machine Vision and Deep Learning. Energies, 2024. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/18/4559>.
20. Machine Vision for Coil Winding Fault Classification in Electrical Machine Manufacture. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-08671-w>.

21. Li X. et al. A Chip-Wound Inductors Defect Detection Method Based on Object Detection. Measurement, 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224125004415>.
22. Chen Y. et al. Defect Inspection for SMD Inductors. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/286748984_Defect_Inspection_for_SMD_Inductors.
23. Toroidal Core Winding Machine : патент US3181803A, General Electric Company, 1965-05-04. URL: <https://patents.google.com/patent/US3181803>.
24. Toroid Coil Winding Shuttle : вебсайт. IndiaMART. URL: <https://www.indiamart.com/proddetail/toroid-coil-winding-shuttle-2852781675562.html>.
25. Shuttles for Toroid Winding Machines : вебсайт. Coil Winding Machines. URL: https://www.coilwindingmachines.eu/toroid_winding_machines/shuttles_for_toroid_winding_machines.html.
26. Arduino L298N драйвер двигуна : вебсайт. Prom.ua. URL: <https://prom.ua/ua/p1656727052-arduino-l298n-drajver.html>
27. A4988 DMOS Microstepping Driver with Translator : технічна документація. Pololu. URL: https://www.pololu.com/file/0j450/a4988_dmos_microstepping_driver_with_translator.pdf.
28. IMX219PQ CMOS Image Sensor : технічна документація. Open Source Instruments. URL: <https://www.opensourceinstruments.com/Electronics/Data/IMX219PQ.pdf#page=19>.
29. 5" HDMI TFT Display : вебсайт. Winstar. URL: <https://www.winstar.com.tw/ru/products/tft-lcd/hdmi-tft-lcd/5-hdmi.html>.
30. XL6019 Datasheet : технічна документація. XLSEMI. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1134396/XLSEMI/XL6019.html>.

31. Paralleling with DLS : технічна примітка. Flex Power Modules. URL: <https://flexpowermodules.com/resources/fpm-appnote324-paralleling-with-dls>.
32. Raspberry Pi Compute Module 5 Datasheet : технічна документація. Raspberry Pi. URL: <https://datasheets.raspberrypi.com/cm5/cm5-datasheet.pdf>.
33. Кроковий двигун JK42HS34-1334AC : вебсайт. Arduino.ua. URL: <https://arduino.ua/prod2945-shagovii-dvigatel-jkongmotor-nema17-jk42hs34-1334ac>.
34. Двигун постійного струму 12-24В 895: вебсайт. Mini-Tech. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/895-motor>.

Додаток А – Перелік елементів верстату

Модуль камери 8MP IMX219 Autofocus

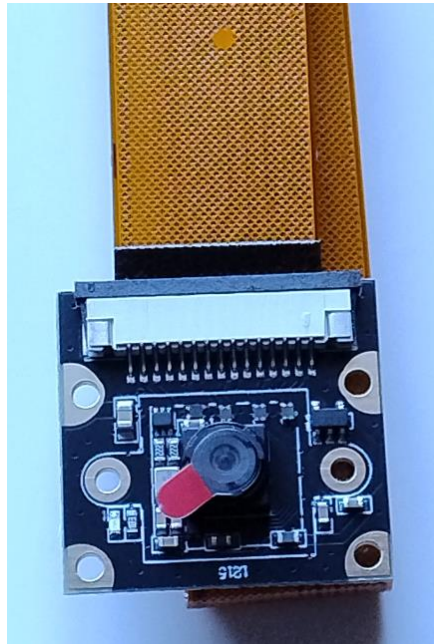


Рисунок А.1 – Модуль камери 8MP IMX219 Autofocus

Дисплей Raspberry Pi 5.0 inch LCD 800x480 Capacitive Touch Screen



Рисунок А.2 – Дисплей Raspberry Pi 5.0 inch

Продовження додатку А

Мікрокомп'ютер Raspberry Pi 5 8GB



Рисунок А.3 – Мікрокомп'ютер Raspberry Pi 5 8GB

Перетворювач напруги XL6019 підвищуючий/знижуючий DC-DC

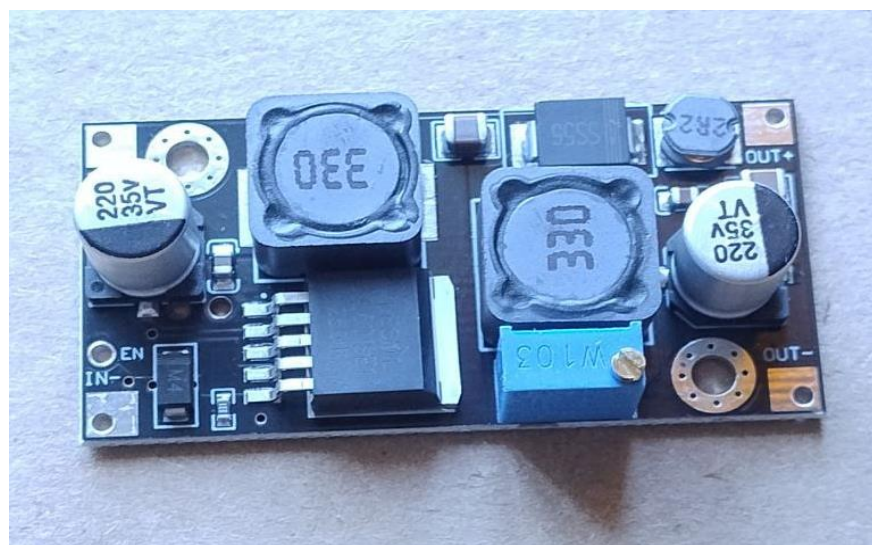


Рисунок А.4 – Перетворювач напруги XL6019

Продовження додатку А

Імпульсний блок живлення S-60-12, 12В 5А

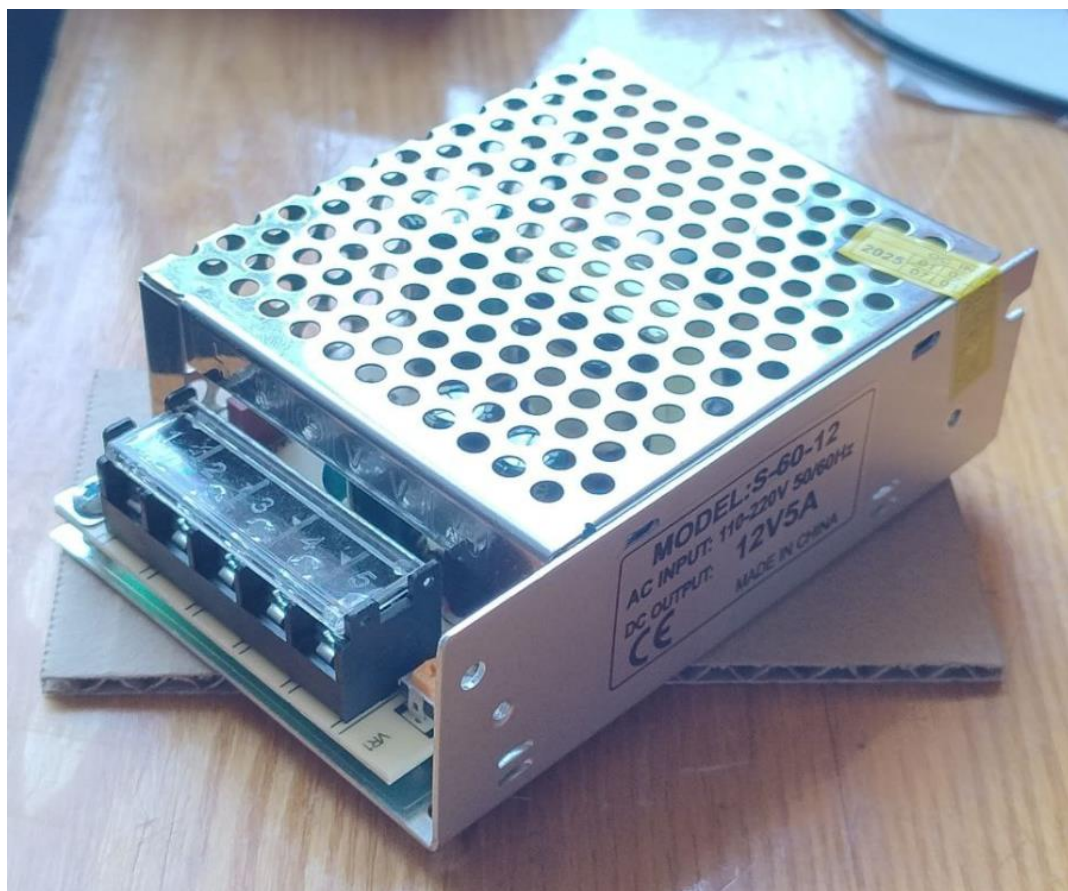


Рисунок А.5 – Імпульсний блок живлення 12В

Додаток Б – Характеристики елементів верстату

Таблиця Б.1 Характеристики камери

($V_{ANA} = 3.0\text{ V}$, $V_{DDL} = 1.3\text{ V}$, $V_{DIG} = 1.98\text{ V}$, $T_J = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Item	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Comment
Current consumption (Full, 30 frame/s)	IVAVA_strm		33	38	mA	VTmax is max speed read out from pixel array CSI2 4 lanes, V_{ANA} current
	IVDDL_strm		100	160	mA	VTmax is max speed read out from pixel array CSI2 4 lanes, V_{DDL} current Defect Correction, L.S.C. function off
HW-Standby current	ISTB_ana			50	μA	XCLR = Lo, V_{ANA} current
	ISTB_dig			10	μA	XCLR = Lo, V_{DIG} current
	ISTB_iddl			50	μA	XCLR = Lo, V_{DDL} current

Таблиця Б.2 Характеристики дисплею

Item	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Supply Voltage For LCM	VDD	4.9	5	5.1	V
Supply Current For LCM	IDD	—	490	750	mA

Таблиця Б.3 Характеристики драйверу крокового двигуна

Назва	Режим роботи	Значення	Одиниця виміру
Load supply Voltage Range	Operating	8 – 35	В
Logic supply Voltage Range	Operating	3 – 5.5	В
Motor supply current	$f_{pwm} < 50\text{ кГц}$	4	mA
	Виходи вимкнені	2	
Logic supply current	$f_{pwm} < 50\text{ кГц}$	8	mA
	Виходи вимкнені	5	

Продовження додатку Б

Таблиця Б.4 Характеристики драйвера двигуна постійного струму

Назва	Значення
Напруга живлення мікросхеми:	5В
Напруга живлення моторів:	5В - 35В
Споживаний струм мікросхеми:	36мА
Кількість каналів:	2
Максимальний струм на канал:	2А
Максимальна потужність, що розсіюється:	25Вт

Таблиця Б.5 Характеристики перетворювача напруги XL6019

Назва	Значення
Ефективність перетворення (ККД) ($U_{\text{вих}} = 5\text{В}$) :	80%
Частота перемикання	180 кГц
Вхідна напруга	5-32 В
Вихідна напруга	1.3-35 В
Максимальний струм навантаження (Вихідний струм)	4 А

Таблиця Б.6 Характеристики Raspberry Pi

Назва	Значення
Живлення	5V 5A
Струм очікування	400 mA

Таблиця Б.7 Характеристики крокового двигуна

Назва	Значення
Модель	JK42HS34-1334AC
Кут повороту за один крок	1.8 °
Струм на одну обмотку	1.33 А
Опір обмотки	2.1 Ом
Індуктивність обмотки	2.5 мГн

Продовження додатку Б

Таблиця Б.8 Характеристики двигуна постійного струму 895

Назва	Значення
Робоча напруга	6-24 В
Швидкість обертання (12В)	3000 об/хв
Швидкість обертання (24В)	6000 об/хв
Споживаний струм (12В, холостий хід)	1.1А
Споживаний струм (24В, холостий хід)	1.3А
Діаметр валу	5мм