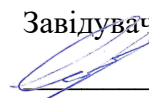


**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет
Кафедра радіоінженерії**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Сергій ЛІТВІНЦЕВ

«17 » 06 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра за освітньою програмою

«Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Апаратно-програмний пристрій для автоматизації процесів пайки
роз'ємів типу ХТ»**

Виконав (-ла):

студент IV III курсу, групи РІ-п31

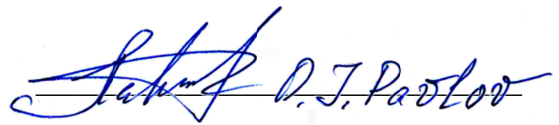
Перепелиця Максим Володимирович

 _____

Керівник:

Ст. викладач

Павлов Олег Ігорович

 _____

Рецензент:

Асистент

Олійник М.В.

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент  _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіоінженерії

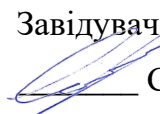
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Сергій ЛІТВІНЦЕВ

«_20_» ____ 04 ____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Перепелиці Максиму Володимировичу

1. Тема проекту **«Апаратно-програмний пристрій для автоматизації процесів пайки роз'ємів типу ХТ»**,

керівник роботи ПАВЛОВ Олег Ігорович,

затверджені наказом по університету від «28» 05 2026 р. №1990-с

2. Термін подання студентом проекту 14.06.2026

3. Вихідні дані до проекту:

3.1. Система керування пристрій будується на базі мікроконтролера Arduino або подібному.

3.2. Пристрій має забезпечувати:

- 1) зчитування сигналів із датчиків;
- 2) керування виконавчими механізмами;
- 3) контроль температури паяльного вузла;
- 4) реалізацію алгоритму автоматичної роботи станка.

3.2. Канали реєстрації сигналів від датчиків: Для контролю роботи паяльного устаткування мають використовуватися такі цифрові та аналогові датчики:

- 1) оптичний датчик (контроль наявності роз'єму для пайки) — 2 шт;
- 2) кінцевий вимикач (контроль положення механізмів) — 3 шт;
- 3) датчик температури (контроль температури жала) — 1 шт;
- 4) кнопка аварійної зупинки (аварійне вимкнення) — 1 шт.

3.5. Канали формування сигналів керування: Пристрій має формувати сигнали керування такими виконавчими механізмами паяльного устаткування:

- 1) сигнал керування вібробункером (подача роз'ємів) — 1;
- 2) сигнал керування кроковим двигуном (позиціонування) — 1;
- 3) сигнал керування серводвигуном (фіксація роз'єму) — 1;
- 4) сигнал керування нагрівачем паяльника (нагрів жала) — 1;
- 5) сигнал керування світлодіодною індикацією (індикація стану) — 2;
- 6) сигнал керування звуковим сигналізатором (аварійний сигнал) — 1.

3.7. Опис функцій, які мають бути реалізовані для автоматизації процесів:

- 1) Після запуску станка пристрій керує вібробункером, який подає роз'єми ХТ у робочу зону.
- 2) Оптичні датчики контролюють правильність подачі та позиціонування роз'єму.
- 3) Після фіксації деталі сервоприводом активується паяльний вузол.
- 4) Температура жала контролюється термодатчиком у режимі реального часу.
- 5) Після завершення пайки система повертається у початковий стан та повторює цикл роботи.

3.8. Мінімально-обов'язкові вимоги, які мають бути закладені в ТЗ: Пристрій має забезпечувати:

- 1) автоматичну орієнтацію та подачу роз'ємів за допомогою вібробункера;
- 2) позиціонування роз'єму у зоні пайки;
- 3) фіксацію деталі;
- 4) керування процесом пайки;
- 5) підвищення продуктивності та повторюваності якості пайки.

4. Зміст пояснювальної записки:

4.1. У рамках проектування мають бути виконані такі роботи:

- 1) розробка конструкції вібробункера та механізму подачі;
- 2) проектування вузла фіксації роз'ємів;
- 3) розробка системи автоматичного керування на базі датчиків та виконавчих механізмів;
- 4) створення 3D-моделі станка;
- 5) підбір електроприводів, датчиків і компонентів системи автоматизації;
- 6) розробка електричної схеми керування.

4.2. Пояснювальна записка має містити:

- 1) Огляд об'єкту, процеси якого потрібно автоматизувати.
- 2) Огляд автоматизованого прототипу.
- 3) Розробка ТЗ.
- 4) Розробку функціональної схеми із зазначенням списку функцій, які має виконувати пристрій.
- 5) Розробку структурної схеми пристрою із зазначенням які функції будуть виконуватися якими блоками пристрою.
- 6) Розробку вузлів принципової схеми.
- 7) Розробку фрагментів алгоритму роботи.
- 8) Розділ конструкторського проектування.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): презентація з 10-15 слайдів, що ілюструють результати проектування:

- 1) Схема функціональна.
- 2) Схема структурна.
- 3) Схема електрична принципова.
- 4) Конструкторські креслення (друкована плата, деталі вузлів та/чи корпусу).
- 5) Схема підключення пристрою до об'єкту автоматизації.

6. Дата видачі завдання: 20.04.2026р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Огляд об'єкту автоматизації та автоматизованого прототипу	20.04 — 26.04	Не відповідає вимогам
	Розробка ТЗ	27.04 — 03.05	Не відповідає вимогам
	Розробка функціональної схеми	04.05 — 10.05	Не відповідає вимогам
	Розробка структурної схеми	11.05 — 17.05	Не відповідає вимогам
	Розробка принципової схеми	18.05 — 24.05	Не відповідає вимогам
	Розробка фрагментів алгоритму роботи	25.05 — 31.05	Не відповідає вимогам
	Конструкторське проектування	01.06 — 07.06	Не відповідає вимогам
	Оформлення ПЗ та презентації	08.06 — 14.06	Не відповідає вимогам

Студент

Песе

Максим Перепелиця

Керівник

О.І. Павлов

Олег Ігорович ПАВЛОВ

АНОТАЦІЯ

Тема дипломного проекту: «Апаратно-програмний пристрій для автоматизації процесів пайки роз'ємів типу ХТ».

Структура пояснювальної записки містить вступ, чотири розділи, загальні висновки, перелік інформаційних джерел та додатки. Обсяг роботи становить __ сторінок, містить 17 рисунків, 5 таблиць та 3 додаток.

Об'єкт розробки: технологічний процес автоматизації монтажу високострумової комутації.

Предмет розробки: апаратно-програмні засоби для автоматизації процесів пайки роз'ємів типу ХТ

Мета роботи: Проектування та реалізація автоматизованого апаратно-програмного комплексу на базі мікроконтролерного керування та крокових приводів для забезпечення точного, повторюваного та безпечного процесу пайки роз'ємів сімейства ХТ.

У дипломному проєкті розроблено апаратно-програмний комплекс для автоматизації процесу монтажу силових роз'ємів сімейства ХТ. В межах роботи реалізовано систему автоматизованої подачі компонентів із використанням вібробункера, який спрямовує роз'єми на спеціально спроектовану платформу зони пайки. Оптимізовано процес позиціонування та фіксації: за сигналом оптичного датчика наявності роз'єму система переходить у режим очікування команди оператора, після чого натисканням на ножну педаль активується подальший цикл. При цьому спрацьовує пневмопоршень, що здійснює притиск деталі, а для надійної фіксації кабелю застосовано оригінальну авторську притискну матрицю. Блок автоматичної пайки реалізовано у вигляді рухомої платформи, яка оснащена механізмом дозованої подачі припою за допомогою крокового двигуна та системою термостабілізації. Розроблений комплекс дозволяє значно інтенсифікувати та пришвидшити процес пайки, забезпечуючи високу точність і повторюваність з'єднань.

ABSTRACT

The topic of the diploma project: "Hardware and software device for automating the soldering processes of XT type connectors".

The structure of the explanatory note includes an introduction, four sections, general conclusions, a list of information sources and appendices. The volume of the work is __ pages, contains 17 figures, 5 tables and 3 appendices.

Object of development: technological process of automating the installation of high-current switching.

Subject of development: hardware and software tools for automating the soldering processes of XT type connectors

Purpose of work: Design and implementation of an automated hardware and software complex based on microcontroller control and stepper drives to ensure an accurate, repeatable and safe soldering process of XT family connectors.

The diploma project developed a hardware and software complex for automating the installation process of XT family power connectors. Within the scope of the work, an automated component feed system was implemented using a vibrating hopper, which directs the connectors to a specially designed platform of the soldering zone. The positioning and fixing process was optimized: according to the signal of the optical sensor of the presence of a connector, the system goes into standby mode for the operator's command, after which the next cycle is activated by pressing the foot pedal. At the same time, a pneumatic piston is triggered, which presses the part, and an original author's clamping matrix is used to securely fix the cable. The automatic soldering unit is implemented in the form of a moving platform, which is equipped with a metered solder feed mechanism using a stepper motor and a thermal stabilization system. The developed complex allows you to significantly intensify and speed up the soldering process, ensuring high accuracy and repeatability of connections.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення			Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4				Завдання на дипломний проєкт		
2	A4	РІ-п31 .4210 00.001 ПЗ			Пояснювальна записка		
3	A1	РІ-п31 .4210 01.000 ТК					
4	A1	РІ-п31 .4210 02.000 ТК					
5	A1	РІ-п31 .4210 03.000 ТК					
6	A1	РІ-п31 .4210 04.000 ТК					
7	A1	РІ-п31 .4210. 05.000 ТК					
8	A1	РІ-п31 .4210 06.000 ТК					
9	A1	РІ-п31 .4210 07.000 ТК					
					РІ-п31 .4210 00.001		
		ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.					Відомість дипломного проєкту	Лист 1	Листів 1
Керівн.						КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. РТФ Гр. РІ-п31	
Консульт.							
Н/контр.							
Зав.каф.							

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	5
ABSTRACT	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	10
ВСТУП.....	11
1 АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОТОТИПУ	13
2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ.....	17
3 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ.....	19
3.1 Опис функціональної схеми системи керування та автоматичної подачі	20
3.2 Обґрунтування вибору виконавчого паяльного інструменту	21
3.3 Порівняльний аналіз обчислювальних платформ для системи керування....	22
3.4 Обґрунтування вибору приводу вузла подачі припою	24
3.5 Обґрунтування вибору та режимів роботи драйвера крокового двигуна.....	26
3.6 Обґрунтування та вибір модуля індикації параметрів пристрою	27
4 ОПИС СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ	31
4.1 Прецизійні термодатчики основних каналів (Картриджі Hakko T12)	31
4.2 Датчик позиціонування та дозволу початку подачі (XT SENSOR):	32
4.3 Датчик механічного керування — Модуль Енкодер KY-040 (J4).....	32
4.4 Датчик стану робочого процесу — Педаль активації (J6).....	33
5 КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРАХУНКИ	34
5.1 Розрахунок параметрів крокового двигуна підсистеми подачі припою	34
5.2 Розрахунок теплового режиму силового MOSFET-ключа.....	34
5.3 Проектування друкованої плати.....	35
5.3.1 Розрахунок ширини струмопровідних доріжок	36
5.3.2 Розділ 3.3 Порівняння розрахункових та прийнятих значень.	37
6 РОЗРОБКА ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ	39
7 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ПРИСТРОЮ	41

7.1.1	Розрахунок середнього напрацювання на відмову	41
8	РОЗРОБКА 3D МОДЕЛІ ВУЗЛІВ	42
9	РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	44
9.1	Обґрунтування структури ПЗ та вибору середовища розробки	44
9.2	Алгоритм функціонування паяльної станції та обробки сигналів датчиків..	44
9.3	Реалізація цифрового ПІД-регулятора термостабілізації.....	47
9.4	Програмний опис координатно-часового алгоритму випереджального ретракту	47
9.5	Програмний опис бездротового IoT-моніторингу.....	48
	ВИСНОВКИ	50
	Додаток А	51
	Додаток В	56
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Скорочення / Позначення	Розшифровка та зміст
АЦП	Аналогово-цифровий перетворювач (вживається для мікросхем MAX31855)
МК	Мікроконтролер (головний обчислювальний елемент системи)
ПІД	Пропорційно-інтегрально-диференціальний (алгоритм регулювання температури)
ШИМ	Широтно-імпульсна модуляція (для керування потужністю нагрівачів)
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i> (протокол бездротового зв'язку модуля NINA-W102)
CS	<i>Chip Select</i> (сигнал вибору мікросхеми на апаратній шині SPI)
EEPROM	Енергонезалежна пам'ять для збереження налаштувань уставки
I2C	Послідовна шина даних (використовується для підключення дисплея LCD1602)
IoT	<i>Internet of Things</i> / Інтернет речей (концепція віддаленого моніторингу)
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> (інтерфейс для зчитування даних з MAX31855)
АПП АП	апаратно-програмний пристрій автоматичної пайки

ВСТУП

У процесі виробництва та монтажу електронного обладнання широко застосовуються силові роз'єми типу ХТ, які використовуються для підключення акумуляторних батареї, зарядних пристроїв, безпілотних літальних апаратів та іншого обладнання, що працює зі значними струмами навантаження. Якість пайки таких роз'ємів безпосередньо впливає на надійність електричного контакту, механічну міцність з'єднання та безпечність подальшої експлуатації виробу.

Під час проходження виробничої практики та ознайомлення з технологічним процесом пайки роз'ємів типу ХТ було виявлено низку проблем, пов'язаних із виконанням даної операції вручну. Зокрема, спостерігалася нерівномірність якості паяних з'єднань, яка виникала через різний рівень підготовки операторів, нестабільність температурного режиму та відмінності у тривалості нагрівання контактів.

Крім того, під час виконання пайки періодично виникали випадки перегріву роз'єму, що призводило до оплавлення його пластикового корпусу. Такі дефекти не лише погіршували зовнішній вигляд виробу, а й могли негативно впливати на механічну міцність та надійність електричного з'єднання. Також було встановлено, що якість пайки значною мірою залежить від людського фактора, а тривалість виконання операції залишається відносно високою.

Для усунення зазначених недоліків було прийнято рішення щодо розроблення апаратно-програмного пристрою для автоматизації процесів пайки роз'ємів типу ХТ. Використання автоматизованої системи дозволяє забезпечити стабільне підтримання температури нагрівальних елементів, повторюваність технологічного процесу, зменшення ймовірності виникнення браку та підвищення продуктивності праці.

Запропонований пристрій може бути використаний як альтернатива ручній пайці на підприємствах малого та середнього виробництва, де існує потреба у забезпеченні стабільної якості паяних з'єднань без значних витрат на промислові

					РІ-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		11

роботизовані комплекси. Впровадження такого рішення дозволяє зменшити вплив людського фактора, скоротити час виконання операцій та підвищити ефективність виробничого процесу.

Тема роботи: «Апаратно-програмний пристрій для автоматизації процесів пайки роз'ємів типу ХТ»

Метою дипломного проекту є розробка апаратно-програмного пристрою для автоматизації процесів пайки роз'ємів типу ХТ

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих методів пайки силових роз'ємів типу ХТ та засобів автоматизації процесів пайки;
- сформулювати технічні вимоги до розроблюваного пристрою;
- виконати вибір елементної бази системи;
- розробити структурну та електричну принципову схеми пристрою;
- розробити алгоритм автоматизованого керування процесів пайки;
- реалізувати систему контролю та підтримання температури нагрівальних елементів;
- виконати проектування друкованої плати пристрою;
- оцінити можливість практичного застосування розробленої системи як альтернативи ручному виконанню процесів пайки.

Об'єктом дослідження є процесів пайки силових роз'ємів типу ХТ.

Предметом дослідження є апаратні та програмні засоби автоматизації процесів пайки роз'ємів типу ХТ.

Практичне значення роботи полягає у створенні пристрою автоматизації процесів пайки роз'ємів типу ХТ та забезпечує стабільну якість паяних з'єднань, зменшення кількості браку, запобігання перегріву корпусу роз'єму та підвищення продуктивності праці.

					РІ-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		12

1 АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОТОТИПУ

Основним представником спеціалізованого промислового обладнання, що представлене на міжнародному ринку для автоматизації процесів збирання силових кабельних збірок, є автоматизований комплекс моделі **УН-НХТ** серії *Bowl Feeder Xt* (див. рис. 2). Дане обладнання спроектоване для виконання високоточних операцій термічного з’єднання елементів, що критично важливо при роботі з високострумовими інтерфейсами.

Проте ціна для малого та середнього бізнесу завелика.



Паяльна машина для роз'ємів серії X чашечкою-годівницею

5 650,00 доларів США
1 КОМПЛЕКТ (МІНІМАЛЬНА КОМІСІЯ)

[Розпочати запит на](#) [Надіслати заг](#)

Все ще віришете? Отримайте зразки на **3350 дол**

Деталі продукту

Налаштування:	Доступно
КОНТРОЛЬ:	Напівавтоматичні
Спосіб охолодження:	Повітряне охолод

Доставка

- - -

Модель	WL-NXT
Потужність	400 Вт
Розміри (Д×Ш×В)	1100×800×1100 мм
Вага машини	130 кг
Вхідна напруга	220 В
Тип паяльного дроту	Без свинцю та екологічно чистий
Вхідний тиск повітря	0,3-0,5 МПа

Рисунок 2 Промисловий автоматизований комплекс пайки силових роз'ємів серії ХТ у базовій комплектації:

Обґрунтування вибору схеми підключення та інтерфейсу комутації виконавчого органу

Для забезпечення надійного функціонування Апаратно-програмного пристрою для автоматизації процесів пайки роз'ємів типу ХТ, мінімізації похибок вимірювання температури та захисту елементної бази від статичної напруги, особливу увагу приділено вибору схеми інтерфейсного з'єднання паяльного інструменту з блоком керування. На **рисунку 2.1** приведено схему електричну принципову підключення виконавчого паяльного інструменту Hakko T12 за допомогою уніфікованого п'ятиконтактного роз'єму типу **GX12-5 (GX12-5 PLUG)**.

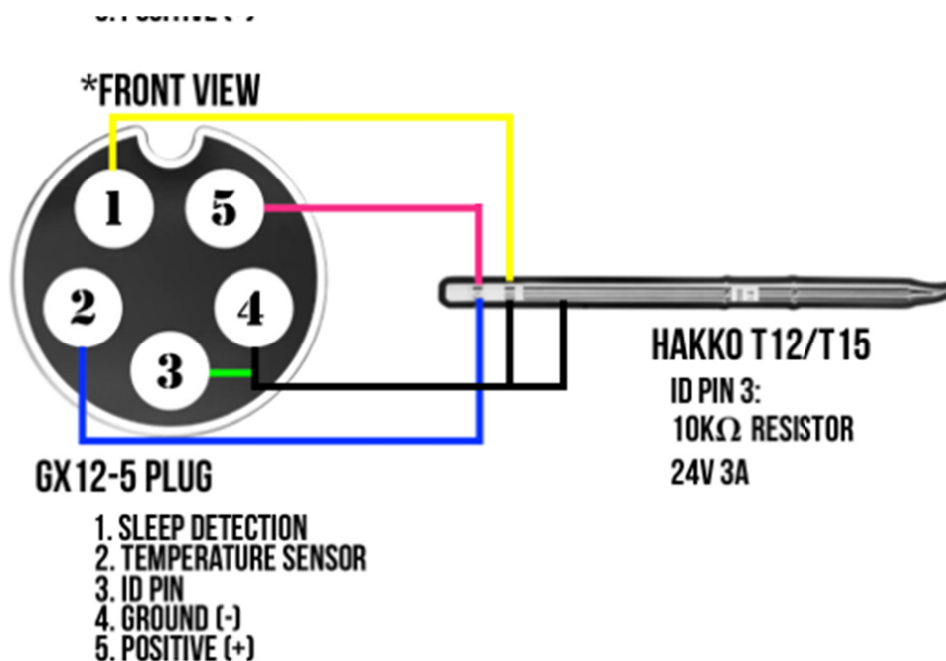


Рисунок 1.1 Схема з'єднань елементів паяльного інструменту Hakko T12

Вибір даної конфігурації комутації є оптимальним рішенням у межах розроблюваного дипломного проекту, що обумовлено наступними чинниками:

Реалізація інтелектуальних режимів енергозбереження (Pin 1 — SLEEP DETECTION): Наявність виділеної лінії контролю положення дозволяє інтегрувати в ручку паяльника датчик вібрації (руху). Це забезпечує апаратну підтримку програмного алгоритму переходу мікроконтролера в режим очікування («Sleep Mode») або глибокого сну при тривалій відсутності механічних рухів

виконавчого механізму. Дане рішення суттєво подовжує термін служби картриджів жала T12 та знижує загальне енергоспоживання верстата.

Висока точність замкненого контуру термостабілізації (Pin 2 — TEMPERATURE SENSOR): Інтегрований у картридж термодатчик (термопара типу К) підключається через окрему сигнальну лінію. Оскільки нагрівальний елемент і термопара з'єднані послідовно, диференціація сигналів реалізується за допомогою ШІМ-керування (широтно-імпульсної модуляції). Окрема лінія датчика температури забезпечує точне зняття сигналу зворотного зв'язку для PID-регулятора мікроконтролера у моменти пауз подачі живлення.

Апаратна ідентифікація інструменту (Pin 3 — ID PIN): Використання виділеного виводу із вбудованим резистором номіналом 10 кОм призначене для автоматичного визначення підключеного типу картриджа (T12/T15) системою керування. Це дозволяє реалізувати захист від підключення невідповідного інструменту та автоматично завантажувати відповідні калібрувальні таблиці температурних профілів у пам'ять мікроконтролера.

Забезпечення ESD-безпеки та електромагнітної сумісності (Pin 4 — GROUND): Лінія заземлення корпусу та жала інструменту виведена окремим провідником на загальну шину заземлення пристрою. Це критично важливо для нейтралізації статичного потенціалу в точці пайки та захисту чутливих напівпровідникових компонентів і мікросхем на збіральних платах від електричного пробоя (відповідно до вимог ESD-захисту).

Силова сумісність та надійність роз'єму (Pin 5 — POSITIVE): Нагрівальний елемент розрахований на роботу в режимі форсованого нагріву за напруги живлення **24 В** та струму до **3 А** (номінальна потужність до 72 Вт). Використання циліндричного нарізного роз'єму серії GX12 гарантує низький перехідний опір контактів, надійну фіксацію кабелю від випадкового від'єднання під час вібрацій, та здатність тривалий час комутувати вказані струми без термічного руйнування вузла підключення.

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		15

Таким чином, застосування представленої на рис. 2.1 схеми підключення на базі роз'єму GX12-5 дозволяє повністю реалізувати технічний потенціал жала T12, забезпечити високу точність вимірювання (24В, 3А) та гарантувати безпеку і стабільність технологічного процесу пайки роз'ємів серії ХТ.

Техніко-економічний аналіз вибору виконавчого інструменту на локальному та міжнародному ринках

При проектуванні та макетуванні апаратно-програмного пристрою для автоматизації процесів пайки роз'ємів типу ХТ одним із ключових етапів є оптимізація витрат на комплектуючі без втрати загальної надійності системи. На **рисунку 2.2.2** наведено порівняльний аналіз комерційних пропозицій виконавчого паяльного інструменту (ручки серії 907 під жала T12) на вітчизняному маркетплейсі та міжнародному торговельному майданчику AliExpress.

Дослідження ринкової вартості та логістичних факторів дозволило сформулювати такі висновки:

Локальний ринок (Верхній сегмент на рис. 2.2.2): Вартість змінного паяльного модуля Quicksko 907 з інтегрованим кабелем та авіаційним роз'ємом GX16-4 (або GX12-5) в українських постачальників становить **497 грн**. Головною перевагою закупівлі на локальному ринку є мінімальний термін доставки (1–2 доби) та наявність гарантійних зобов'язань від продавця. Це є критично важливим чинником у випадку виникнення браку або необхідності термінової заміни вузла під час фінального складання макету.

Міжнародний ринок (Нижній сегмент на рис. 2.2.2): Пряма закупівля аналогічного компонента на платформі AliExpress під час сезонних знижок становить **121,33 грн** (близько 3 USD). Економічна вигода у цьому випадку є чотирикратною (497 грн проти 121 грн, що суттєво знижує кінцеву собівартість розроблюваного виробу при переході до дрібносерійного виробництва. Проте, суттєвим недоліком є тривалий термін логістики (від 14 до 30 діб) та ризик отримання невідповідної модифікації внутрішньої розпіновки датчиків.

					РІ-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		16

2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

Технічне завдання (ТЗ) визначає сукупність технічних, програмних, конструкторських та експлуатаційних вимог до розроблюваного апаратно-програмного пристрою для автоматизації процесів пайки роз'ємів типу ХТ.

Цей документ є основою для проведення подальших конструкторських розрахунків, схемо технічного проектування та написання програмного забезпечення мікроконтролера.

Найменування та галузь застосування

Найменування виробу: Апаратно-програмний пристрій для автоматизації процесів пайки роз'ємів типу ХТ.

Галузь застосування: Дрібносерійне та серійне виробництво радіоелектронної апаратури, сильних акумуляторних батарей, систем живлення БПЛА та робототехнічних комплексів.

А. Вимоги до електричного живлення та енергоспоживання:

Напруга живлення силової частини (нагрівальні елементи картриджів T12, кроковий двигун NEMA 17): **24 В DC** (постійний струм).

Напруга живлення цифрової логічної частини (мікроконтролер RP2040, АЦП MAX31855, дисплей LCD1602, датчики): **5 В DC** (постійний струм).

Максимальний струм споживання пристрою у піковому режимі (одночасний розігрів двох каналів та робота приводу): не більше **10 А**.

Б. Вимоги до параметрів термостабілізації (робочого органу):

Кількість незалежних каналів нагріву: **2 канали**.

Діапазон регулювання робочої температури паяльних жал: **280°C – 420°C**.

Точність підтримки заданої температури у статичному та динамічному режимах: **5°C** (цільова програмна точність за алгоритмом ПД — до 1°C).

Час первинного виходу системи на робочий температурний режим (від кімнатної температури до 320°C): не більше **15 сек**.

В. Вимоги до автоматизації, координатної подачі та інтерфейсу:

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		17

Тип механізму подачі: координатно-часовий, на базі крокового двигуна NEMA 17 та мікрокрокового драйвера з можливістю програмного налаштування швидкості протяжки дроту припою.

Функція захисту від дефектів: обов'язкова реалізація програмного алгоритму випереджального ретракту (зворотного ходу двигуна на 2–3 мм) за 200 мс до закінчення загального часу циклу пайки.

Спосіб завантаження компонентів: інтеграція з автономним вібробункером, який виконує автоматичну орієнтацію та поштучну видачу роз'ємів ХТ у зону фіксації.

Взаємодія з бункером: інформаційна, через кінцевий датчик позиціонування деталі, що є тригером для запуску робочого циклу мікроконтролера.

Елементи індикації та керування: символний дисплей LCD1602 (інтерфейс I2C) для відображення поточних температур та лічильника готової продукції; інкрементальний енкодер для навігації по меню налаштувань.

Бездротові функції (IoT): підтримка стеків Wi-Fi/Bluetooth для віддаленої передачі телеметрії на хмарний сервер контролю якості.

Для наочності та зручності нормоконтролю основні параметри розробленого ТЗ зведені у таблицю 1.

Таблиця 1 технічних параметрів виробу

Напруга живлення	24В DC, 5В DC (Логіка)
Максимальний струм	10 А
Діапазон температури	280-420°C
Точність підтримки температури	5°C
Час виходу на робочий режим	< 15сек

3 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

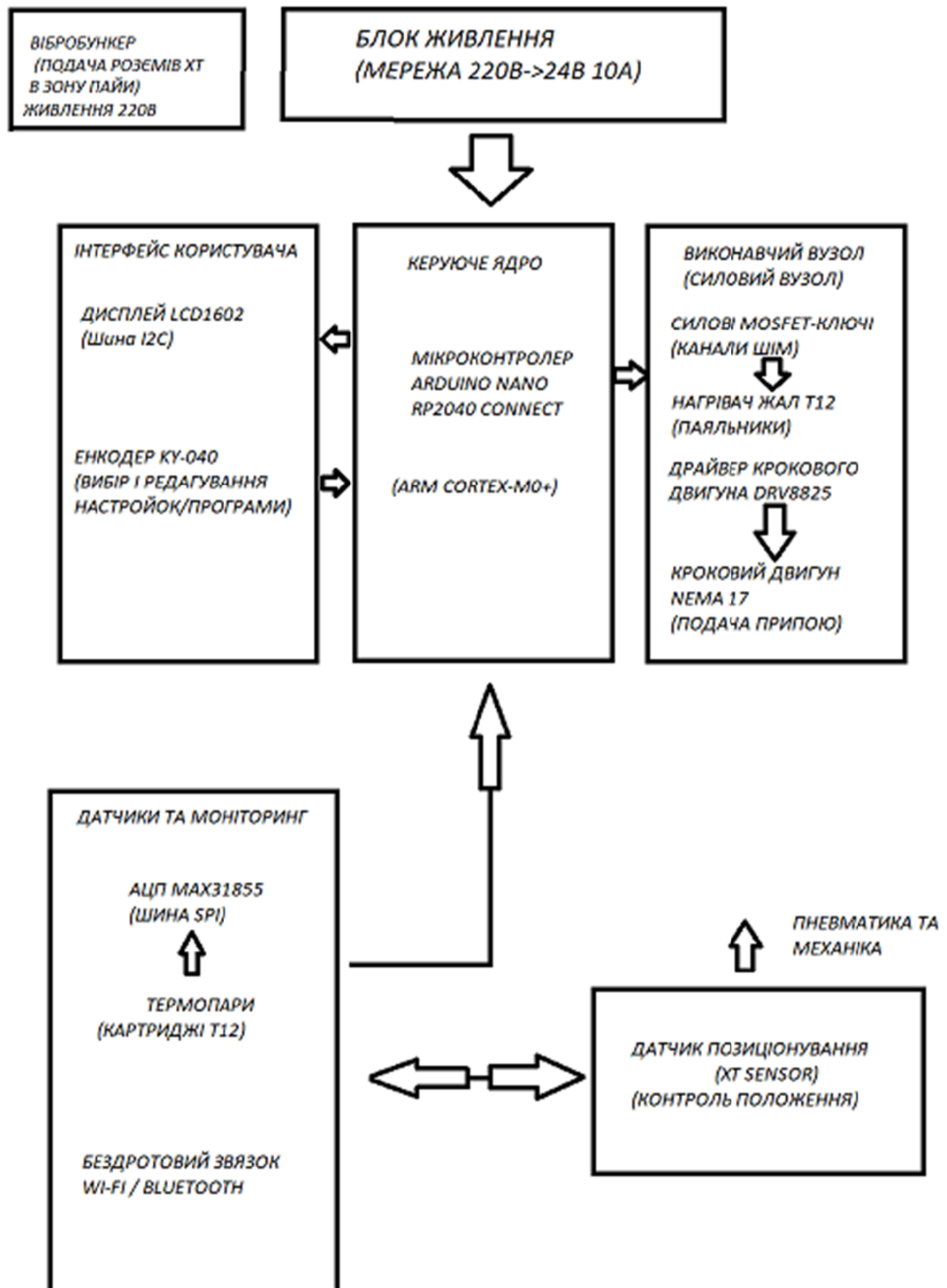


Рисунок. Структурна схема

3.1 Опис функціональної схеми системи керування та автоматичної подачі

Розроблена функціональна схема відображає децентралізовану структуру автоматизації, де контур підготовки та видачі деталей відокремлений від центрального обчислювального контуру мікроконтролера. Взаємодія між блоками схеми здійснюється в наступній послідовності:

Етап автономної подачі та орієнтації (Контур вібробункера):

Силові роз'єми серії ХТ60/ХТ90 завантажуються навалом у чашу **Вібробункера**. Пристрій працює повністю автономно від мережі змінного струму.

Завдяки механічним пасткам і спіральному лотку, вібробункер виконує поштучну орієнтацію роз'ємів у просторі (контактами в заданому напрямку) і переміщує їх до лінійного накопичувача.

Роботою приводу керує вбудований локальний датчик заповнення лотка: коли черга роз'єктів заповнює лінійний накопичувач, вібробункер автоматично вимикається, запобігаючи заклинюванню деталей, а при опустінні лотка — вмикається знову.

Етап ініціалізації та позиціонування:

Орієнтований роз'єм ХТ під дією сили інерції та ваги черги проштовхується з лотка вібробункера безпосередньо в зону пайки.

У момент фіксації роз'єму в робочій зоні спрацьовує **Датчик позиціонування** (ХТ_SENSOR). Він переходить у активний логічний стан, замикаючи цифровий вхід (GPIO) головного **Мікроконтролера RP2040**.

Етап вимірювання та термостабілізації (ПІД-контур):

Отримавши сигнал наявності деталі, мікроконтролер запускає робочий цикл. Одночасно з цим через високошвидкісну шину SPI знімаються покази з прецизійних **АЦП MAX31855**, які оцифровують сигнали від **Термопар** паяльних картриджів Hakko T12.

На основі реальної температури мікроконтролер розраховує похибку та формує керуючий ШІМ-сигнал для **Драйверів та силових ключів** (на базі

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		20

MOSFET IRLZ44N). Ключі комутують потужність 24 В на **Нагрівачі жал**, утримуючи температуру з точністю до 2С для запобігання оплавленню пластику роз'ємів.

Етап координатно-часової подачі припою:

Після виходу на робочий температурний режим мікроконтролер подає послідовність імпульсів на мікрокроковий драйвер **DRV8825**.

Драйвер комутує обмотки **Крокового двигуна NEMA 17**, який через механізм протяжки дозовано подає дріт припою безпосередньо в зону контакту роз'єму.

За 200 мс до завершення фази паяння мікроконтролер інвертує сигнал напрямку драйвера, змушуючи двигун виконати швидкий ретракт (зворотне відведення) припою, що виключає утворення напливів.

Контур інтерфейсу та моніторингу (IoT):

Паралельно з виконанням технологічного процесу поточний стан системи, температура та лічильник готової продукції виводяться на **Дисплей LCD1602** через шину I2C, а уставка задається **Енкодером KY-040**.

Вбудований радіомодуль здійснює бездротову передачу телеметрії по Wi-Fi/Bluetooth для хмарного моніторингу та ведення логів якості.

3.2 Обґрунтування вибору виконавчого паяльного інструменту

Для забезпечення процесу пайки високострумівих роз'ємів сімейства ХТ було обрано уніфікований паяльний інструмент конструктиву 907, адаптований під нагрівальні елементи серії T12. Вибір даного типу виконавчого органу обумовлений його конструктивними та теплофізичними характеристиками:

Висока інтеграція термоелементів: Картриджі типу T12 об'єднують в одному корпусі нагрівач, термопару (хромель-алюмель) та паяльне жало. Це мінімізує тепловий опір між зоною нагріву та точкою зняття температури, забезпечуючи високу динамічну точність роботи ППД-алгоритму керування.

					<i>PI-п31 .421000.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		21

Енергетичні параметри: Потужність картриджа становить 70 Вт при живленні 24 В, що дозволяє реалізувати швидку теплопередачу до масивних латунних контактів роз'ємів типу ХТ, які мають високу теплоємність.

Конструктивна гнучкість: Використання виключно виконавчого модуля (без сторонніх блоків керування) дозволяє повністю інтегрувати силове керування нагрівом, комутацію вбудованого датчика вібрації (сну) та зчитування сигналу термопари на розроблену в межах проєкту материнську плату пристрою. Це забезпечує монолітність архітектури та реалізацію авторських алгоритмів термостабілізації.

- Для формування паяних з'єднань силових роз'ємів серії ХТ у розроблюваному апаратно-програмному пристрої застосовано трубчастий олов'яно-свинцевий припій марки Sn60Pb40 виробництва компанії Cypel Unipress із номінальним діаметром дроту 1,00 мм (рис. 2.2). Внутрішня структура дроту містить 2,5% активованого флюсу на основі каніфолі типу SW26 (згідно зі стандартом ISO 1.1.2.B).
- Вибір діаметра 1,00 мм обумовлений конструктивними особливостями виконавчого механізму автоматичної подачі витратних матеріалів: зменшений діаметр поперечного перерізу забезпечує високу точність дискретного дозування об'єму розплаву та вимагає меншої теплової енергії від паяльного інструменту T12 для досягнення **температури плавлення (яка для сплаву Sn60Pb40 становить 183–191 °C)**, що мінімізує ризик термічного пошкодження нейлонового корпусу роз'ємів.

3.3 Порівняльний аналіз обчислювальних платформ для системи керування

Мікроконтролерна плата ESP32 MiniKit характеризується високою тактовою частотою двоядерного 32-бітного процесора (до 240 МГц), об'ємом оперативної (520 КБ SRAM) та флеш-пам'яті (до 4 МБ). Платформа має вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth для передачі телеметрії. Проте архітектура ESP32 має суттєвий недолік в умовах промислового використання: підвищене енергоспоживання у моменти активної роботи радіомодуля (піки до 250 мА) та надзвичайно високу чутливість логічних рівнів 3,3 В до імпульсних та високочастотних завад по лініях живлення, які неминуче виникають під час ШІМ-

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		22

комутації потужних нагрівачів паяльника (70 Вт, 24 В) та індуктивних навантажень крокових двигунів.

Платформа Arduino Uno (ATmega328P) є стійкою до завад завдяки п'ятивольтовій логіці (5 В периферії). Проте її 8-бітна архітектура, низька тактова частота (16 МГц) та критично обмежений об'єм пам'яті (2 КБ SRAM, 32 КБ Flash) унеможливають одночасне виконання складних обчислювальних завдань: швидкісного ПД-регулювання двох каналів температури, обробки сигналів датчиків позиціонування, керування кроковими приводами за мікрокроковими алгоритмами та підтримки мережесхем зв'язку.

Платформа Arduino Nano RP2040 Connect (модифікація ABX00053), яка обрана як основне обчислювальне ядро, забезпечує оптимальний баланс характеристик. Двоядерний 32-бітний процесор Raspberry Pi RP2040 з частотою 133 МГц та 264 КБ SRAM дозволяє розділити обчислювальні процеси: одне ядро виділене під критичні за часом завдання реального часу (генерація імпульсів кроків для NEMA 17, опитування АЦП MAX31855 та розрахунок ПД-функції нагріву), а друге ядро — під завдання інтерфейсу та бездротової передачі даних через вбудований модуль u-blox NINA-W102. Наявність апаратного завадостійкого захисту та великої кількості GPIO (22 цифрових, 8 аналогових) повністю задовольняє вимогам щодо побудови надійної локальної системи автоматизації.

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		23

Таблиця 2.1 порівняння Arduino

Характеристика	ESP32 MiniKit	Arduino Uno (ATmega328P)	Arduino Nano RP2040 Connect
Архітектура процесора	32-біт, 2 ядра	8-біт, 1 ядро	32-біт, 2 ядра (ARM Cortex-M0+)
Тактова частота, МГц	240	16	133
Оперативна пам'ять (SRAM), КБ	520	2	264
Флеш-пам'ять (Flash), МБ	4	0,032	16
Кількість цифрових входів/виходів	30	14	22
Кількість аналогових входів	12	6	8
Бездротові інтерфейси	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth Classic / BLE	Відсутні	Wi-Fi, Bluetooth (модуль u-blox NINA-W102)
Напруга логічних рівнів, В	3,3	5	3,3
Додаткові апаратні сенсори	Відсутні	Відсутні	6-осьовий IMU-сенсор, крипточип ATECC608A
Орієнтовна вартість (станом на 2026 р.), дол. США	7	5,5	27,11

3.4 Обґрунтування вибору приводу вузла подачі припою

Для забезпечення стабільної, дозованої та прецизійної автоматичної подачі дротяного припою у зону паяльного з'єднання необхідне використання приводу з можливістю кутового позиціонування та регулювання швидкості без застосування додаткових контурів зворотного зв'язку за положенням.

Кінематика вузла протяжки реалізована за фрикційним принципом, де дріт припою затискається між ведучим рифленим роликом та притискним

підшипником. Специфіка цього процесу висуває ряд вимог до виконавчого двигуна:

Подолання механічного опору: Двигун повинен забезпечувати крутий момент, достатній для протягування дроту крізь гнучкий тефлоновий канал (боуден) та подолання інерції розмотування котушки з припійним матеріалом.

Реалізація функції ретракту: Для запобігання утворенню напливів припою, система має виконувати зворотний хід (ретракт) дроту на 2–3 мм за заданий часовий проміжок (до 200 мс), що вимагає від приводу відповідних динамічних характеристик під час реверсу під навантаженням.

Дискретність дозування: Об'єм припою для кожного роз'єму типу ХТ має відповідати фіксованому значенню, тому привід повинен відпрацьовувати мінімальні кутові переміщення з мінімальною похибкою.

Враховуючи зазначені технологічні вимоги, як виконавчий орган було обрано біполярний кроковий двигун стандарту **NEMA 17 (модифікація 17HS4401)** з таких міркувань:

Технічні параметри крутного моменту: Статичний утримуючий момент моделі 17HS4401 становить 0,42Н*м (42 Н*см). Цього значення достатньо для подолання сил тертя жорсткого дроту діаметром 1,00 мм у боуден-каналі та виконання реверсу без пропуску кроків ротора чи заклинювання механізму протяжки.

Роздільна здатність регулювання: Базовий кутовий крок двигуна становить 1,8° (200 кроків на один оберт валу). Використання мікрокрокового режиму керування драйвера дозволяє зменшити дискретність ходу до часток міліметра, що забезпечує нормоване за ТЗ дозування об'єму припою в зоні пайки.

Електрична сумісність: Номінальний струм фази (1,7А) крокового двигуна та його стійкість до електричних завад дозволяють виконати інтеграцію з промисловими ШІМ-драйверами (серії А4988 або ТМС). Живлення приводу здійснюється безпосередньо від наявної в системі силової лінії 24 В DC.

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		25

3.5 Обґрунтування вибору та режимів роботи драйвера крокового двигуна

Для керування біполярним кроковим двигуном 17HS4401 було обрано мікрокроковий драйвер на базі інтегральної мікросхеми **DRV8825** виробництва Texas Instruments. Вибір даного електронного модуля зумовлений його архітектурними та експлуатаційними характеристиками, які зіставлено з параметрами базових аналогів (зокрема, серії A4988):

Теплові та струмові характеристики: Мікросхема DRV8825 виконана в корпусі HTSSOP з донною теплопровідною площадкою (PowerPAD), що за умови використання чотиришарової друкованої плати з оптимізованими полігонами заземлення забезпечує ефективне відведення тепла. Згідно з паспортними даними, драйвер забезпечує тривалий робочий струм до 1,5А на фазу за умов природної конвекції, та до 2,2А за наявності пасивного радіатора. Оскільки номінальний струм обраного двигуна становить 1,7А робота силових каскадів (внутрішніх Н-мостів на MOSFET-ключах) у поєднанні з радіатором протікає в межах допустимого теплового режиму із запасом за струмом.

Дискретність позиціонування: Наявність вбудованого індексатора з підтримкою режиму мікрокроку до 1/32 (розщеплення базового кроку 1,8° на 32 дискретні частини) дозволяє знизити рівень механічних вібрацій і резонансних явищ у вузлі протяжки. Це забезпечує лінійну дискретність ходу дроту припою на рівні десятих часток міліметра, що відповідає вимогам щодо дозованого внесення матеріалу в зону пайки.

Апаратний інтерфейс керування: Керування драйвером здійснюється за допомогою стандартного логічного інтерфейсу STEP/DIR. Лінія DIR (Direction) задає рівень напруги (логічний «0» або «1»), що визначає напрямок обертання валу (вперед для подачі припою, назад — для ретракту). Кожен дискретний імпульс прямокутної форми, що надходить на лінію STEP (Step), змушує драйвер змістити ротор двигуна на один мікрокрок. Використання цього протоколу дозволяє інтегрувати модуль із керуючим мікроконтролером за допомогою лише

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		26

двох цифрових ліній загального призначення (GPIO). Це виключає потребу в безпосередньому програмному перемиканні чотирьох силових фаз двигуна, перекладаючи цю задачу на внутрішню логіку драйвера DRV8825 і суттєво зменшуючи кількість операцій, які процесорне ядро має виконувати для генерації кожного кроку.

Силова шина живлення драйвера підключена до імпульсного джерела напруги 24В. Висока напруга живлення (при номінальній напрузі обмоток двигуна близько 2,6 В необхідна для компенсації дії проти-ЕРС та забезпечення високої швидкості наростання струму в індуктивності обмоток ($L = 3,7$ мГн). Це дозволяє підтримувати розрахований крутний момент у динамічних режимах, зокрема під час реверсу (ретракту) припою.

Налаштування інтегрованого контуру обмеження струму вихідних каскадів здійснюється шляхом виставлення опорної напруги (V_{ref}) на рівні 0.75В за формулою

$$I_{lim} = \frac{V_{ref}}{5 * R_{sense}}$$

За умови використання в модулі струмовимірювальних $R_{sense} = 0.1$ Ом максимальний фазний струм обмежено на рівні 1,5А. Даний режим є компромісним рішенням, яке знижує теплове навантаження на обмотки двигуна під час тривалого утримання ротора, зберігаючи при цьому необхідну жорсткість фіксації та точність кроку механізму.

3.6 Обґрунтування та вибір модуля індикації параметрів пристрою

Для проектування ефективного апаратно-програмного комплексу необхідно розглядати пайку високострумових роз'ємів серії ХТ не як поодинокі дію, а як сукупність послідовних технологічних процесів, кожен з яких підлягає автоматизації для усунення людського фактора та забезпечення стабільної якості з'єднань.

У межах даного проекту автоматизації підлягає такий комплекс фізико-технологічних процесів:

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
						27
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Процес дискретної поштучної видачі та просторової орієнтації деталей:

Через складну геометрію пластикового корпусу роз'ємів ХТ, процес їх первинної орієнтації у просторі автоматизовано за допомогою чашкового вібробункера, який вишиковує компоненти в лінію та подає їх у лоток завантаження верстата.

Процес просторового позиціонування та жорсткої фіксації: Латунні контакти роз'єму та силові мідні дроти мають значну пружність і механічний опір. Автоматизація цього процесу передбачає застосування механічних притисків і спеціалізованих матриць, які жорстко утримують дріт у кабельному пазу роз'єму під час термічного впливу.

Процес термічної підготовки та активації флюсу: Масивні контакти ХТ60/ХТ90 мають високу теплоємність. Процес автоматичного підведення виконавчого інструменту (картриджів Nakko T12) реалізує фазу попереднього прогріву стику, що необхідно для активації флюсу, який міститься всередині трубчастого припою Sn60Pb40, та очищення поверхонь від оксидних плівок.

Процес прецизійного дозування та розподілу витратних матеріалів: Швидкість та об'єм подачі дротяного припою автоматизовано за допомогою крокового приводу NEMA 17. Дозування розраховується за координатно-часовим принципом для рівномірного заповнення капілярного зазору між дротом та стінкою контакту.

Процес запобігання термічній деформації (захисний ретракт та охолодження): Оскільки ізоляційним матеріалом роз'ємів є нейлон, тривалий перегрів призводить до зміщення контактів у розплавленому пластику. Цей процес автоматизовано програмно: за 200 мс до завершення циклу виконується випереджальний ретракт (відведення дроту припою на 2–3 мм для розриву меніска розплаву) та миттєве виведення паяльних жал із зони контакту, після чого починається процес кристалізації паяного шва.

У межах конструкторського розділу вирішено комплекс задач із проектування вузла фіксації, створення тривимірної 3D-моделі вузлів верстата в

					РІ-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		28

середовищі AutoCAD для контролю збіжності деталей, а також здійснено підбір електроприводів, датчиків положення та розробку електричної схеми керування.

Обґрунтування вимог до модуля індикації та відображення параметрів

Для забезпечення контролю за ходом напіваавтоматичного технологічного циклу пайки, налаштування температурних режимів та безпеки оператора, система автоматичного керування (САК) повинна візуалізувати поточний стан апаратно-програмного комплексу.

На основі аналізу раніше визначених технологічних процесів сформовано перелік параметрів та динамічних даних, які потребують обов'язкового виведення на модуль індикації в реальному часі:

Технологічні параметри нагріву: Поточна температура паяльних жал T12 для обох каналів (у градусах Цельсія, °C) — для візуального контролю готовності інструменту до контакту з латунними елементами роз'єму ХТ, а також задана (цільова) температура нагріву під час налаштування.

Стан автоматизованого циклу (Телеметрія процесу): Поточний етап програми автоматизації (наприклад: «Очікування деталі», «Фіксація», «Пайка», «Ретракт»). Це необхідно оператору для моніторингу дій автомата та відображення повідомлень про аварійні ситуації («Перегрів», «Помилка датчика»).

Статистичні дані виробництва: Кількість успішно сформованих паяних з'єднань (лічильник готової продукції) за поточну робочу зміну.

Аналіз інформаційної ємності наведених параметрів показує, що для їх відображення достатньо знакосимвольного дворядкового дисплея із довжиною рядка у 16 символів (формат 1602). Перший рядок виділяється під відображення температурних режимів каналів пайки, а другий — під лічильник готової продукції та текстовий статус поточної операції системи автоматизації.

Апаратна архітектура САК побудована за модульним принципом на базі мікроконтролера Arduino Nano RP2040 Connect. Центральний процесор у реальному часі опитує блок входних датчиків (оптичні датчики наявності деталей

					РІ-пЗ1 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		29

та магнітні кінцевики положення виконавчих механізмів) і через силові ключі комутує нагрівальні елементи картриджів T12.

Для відображення параметрів без перевитрати GPIO-портів контролера, до апаратної шини I2C (піни D4/SDA та D5/SCL) через розширювач портів на базі мікросхеми **PCF8574T** підключено знакосимвольний дисплей LCD 1602. Таке рішення зменшило кількість задіяних ліній МК з 6 до 2, зберігши ресурси для підключення драйверів двигунів та датчиків системи.

Модуль індикації разом із логічною частиною отримує стабільне живлення +5 В DC від завадостійкого імпульсного DC-DC перетворювача LM2596T-5.0, що виключає мережеві пульсації та нестабільність яскравості екрана під час комутації силових навантажень верстата.

					РІ-пЗ1 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		30

4 ОПИС СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ

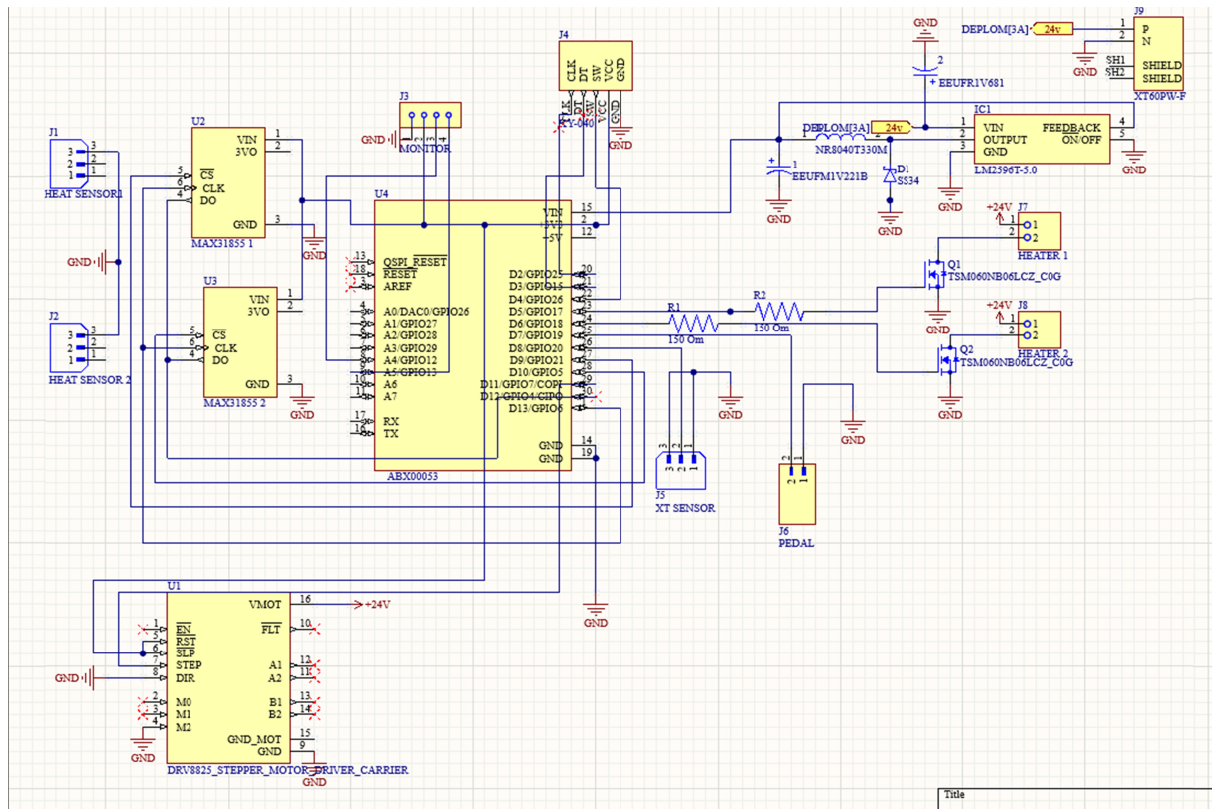


Рисунок 3 Електрична принципова схема

Для забезпечення повної автоматизації технологічного процесу, високоточного контролю температурних профілів та створення ергономічного інтерфейсу взаємодії оператора з двоканальною паяльною станцією, в електричній принциповій схемі реалізовано розгалужену систему датчиків та пристроїв введення-виведення інформації.

До складу вимірювально-керуючого комплексу входять такі функціональні вузли:

4.1 Прецизійні термодатчики основних каналів (Картриджі Накко T12)

Призначення: Неперервне вимірювання поточної температури жала паяльників у діапазоні від **50°C** до **450°C**.

Елементна база: Роль первинних сенсорів виконують термопари, що конструктивно інтегровані всередину нагрівальних елементів картриджів T12.

Підключення здійснюється через силова роз'єми J1 (HEAT SENSOR 1) та J2 (HEAT SENSOR 2).

Принцип обробки сигналу: Наднизька термо-ЕРС (одиниці мілівольт) з роз'ємів надходить на спеціалізовані мікросхеми **MAX31855** (U2 та U3). Вони виконують інструментальне підсилення, апаратну компенсацію температури холодного спаю та прецизійне АЦП-перетворення із розрядністю 14 біт. Дані передаються в мікроконтролер по завадостійкій цифровій шині **SPI**.

4.2 Датчик позиціонування та дозволу початку подачі (XT SENSOR):

Призначення: Організація автоматичного зворотного зв'язку для фіксації просторового положення робочого органу станції (або наявності деталі) та видачі апаратного дозволу на старт технологічного циклу подачі припою.

Конструктивне рішення та принцип дії: Реалізовано на базі трьоххвильного інтерфейсного роз'єму J5. Як первинний сенсор у цій лінії використовується кінцевий датчик (механічний мікроперемикач, індуктивний або оптичний ендстоп), який встановлюється на рухомому механізмі верстата.

Схемотехнічна інтеграція: Сигнальний вивід роз'єму підключено безпосередньо до порту мікроконтролера Arduino. Коли робочий орган досягає цільової координати (координати початку паяння), датчик змінює свій логічний стан. Мікроконтролер фіксує цей сигнал як тригер готовності ("*Дозвіл початку друку/подачі*"), після чого програмний алгоритм миттєво активує драйвер крокового двигуна **DRV8825** для прецизійної подачі розрахункової дози припою в зону нагріву. Таке рішення повністю автоматизує цикл роботи, виключаючи передчасну або запізнїлу подачу матеріалу».

4.3 Датчик механічного керування — Модуль Енкодер KY-040 (J4)

Призначення: Головний орган інтерфейсу користувача. Забезпечує плавне цифрове регулювання заданої температури (лівого/правого каналу), навігацію по меню налаштувань паяльної станції та вибір режимів роботи.

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		32

Принцип дії: На схемі роз'єм J4 підключений до модуля енкодера типу **KY-040**. При обертанні ручки датчик генерує дві послідовності квадратних імпульсів на виходах CLK (частота) та DT (напрямок), які зсунуті за фазою на 90°. Опитування цих ліній мікроконтролером дозволяє визначити кут та швидкість обертання. Вбудована тактова кнопка (лінія SW) використовується для підтвердження вибору в меню.

4.4 Датчик стану робочого процесу — Педаль активації (J6)

Призначення: Фіксація команди оператора на короткочасне форсоване підвищення температури (режим *Boost*) або запуск циклу вузла автоматичної подачі дровового припою за допомогою крокового двигуна.

Принцип дії: Підключається через двоконтактний роз'єм J6 (PEDAL) і працює за принципом сухого контакту (кінцевий вимикач / замикаюча педаль). Лінія підтягнута до високого логічного рівня, а при натисканні педалі оператором замикається на землю (**GND**), викликаючи апаратне переривання в мікроконтролері для миттєвого відпрацювання алгоритму.

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		33

5 КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРАХУНКИ

5.1 Розрахунок параметрів крокового двигуна підсистеми подачі припою

Для надійної протяжки дроту припою через напрямну фільтру (сопло) механізм повинен розвивати певне зусилля. Розрахуємо необхідний обертовий момент крокового двигуна NEMA 17.

Необхідний момент на валу двигуна $M_{\text{необ}} (H * м)$ визначається як:

$$M_{\text{необ}} = F_{\text{прот}} * R * S_f$$

де $F_{\text{прот}} = 15H$ — експериментально визначене зусилля, необхідне для проштовхування дроту припою діаметром 1.5 мм через сопло з урахуванням тертя;

$R = 0.005 \text{ м}$ (5мм) — радіус притискного зубчастого ролика на валу двигуна;

$S_f = 1.5$ — коефіцієнт запасу міцності.

$$M_{\text{необ}} = 15 * 0,005 * 1,5 = 0.1125H * м$$

Обраний біполярний кроковий двигун серії NEMA 17 (наприклад, 42HS40-1704) має утримуючий момент (Holding Torque)

$$M_{\text{утрим}} = 0.42H * м.$$

Перевірка умови працездатності приводу:

$$M_{\text{утрим}} \geq M_{\text{необ}} = 0.42H * м > 0.1125H * м$$

Висновок: Обраний двигун NEMA 17 забезпечує майже чотирикратний запас за крутним моментом, що повністю виключає пропускання кроків під час подачі або швидкого ретракту припою.

5.2 Розрахунок теплового режиму силового MOSFET-ключа

Для комутації струму нагрівача ($I_{\text{канал}} = 4$) використовується силовий транзистор IRLZ44N. Розрахуовую температуру його кристалу без використання додаткового радіатора, щоб перевірити, чи не перегріється він у закритому корпусі станції.

Потужність статичних втрат на транзисторі $P_{\text{втр}}$ Вт в режимі повного відкриття каналу:

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		34

$$P_{\text{Втр}} = I_{\text{канал}}^2 \cdot R_{DS(on)}$$

де $R_{DS(on)} = 0.022 \text{ Ом}$ — опір відкритого каналу транзистора IRLZ44N при логічному рівні керування затвором 5 В.

$$P_{\text{Втр}} = 4^2 \cdot 0.022 = 16 \cdot 0.022 = 0.352 \text{ Вт}$$

Температура переходу (кристалу) транзистора T_j °C обчислюється за формулою:

$$T_j = T_a + P_{\text{Втр}} \cdot R_{\theta JA}$$

де $T_a = 40^\circ\text{C}$ — максимально можлива температура повітря всередині корпусу пристрою;

$R_{\theta JA} = 62^\circ\text{C /Вт}$ — тепловий опір «кристал–навколишнє середовище» для корпусу TO-220.

$$T_j = 40 + 0.352 \cdot 62 = 40 + 21.82 = 61.82^\circ\text{C}$$

Максимально допустима температура кристалу для IRLZ44N за даташитом становить

$$T_{j_{\text{max}}} = 175^\circ\text{C}$$

Оскільки $61.82^\circ\text{C} < 175^\circ\text{C}$, тепловий режим транзистора є абсолютно безпечним.

Висновок: Силкові ключі IRLZ44N працюють у полегшеному тепловому режимі й **не потребують встановлення додаткових алюмінієвих радіаторів**, що дозволяє зменшити габарити та масу друкованої плати блока керування.

5.3 Проектування друкованої плати

На попередніх етапах проектування було повністю обґрунтовано схемотехнічну архітектуру двоканальної паяльної станції, проведено аналітичний розрахунок режимів роботи силових каскадів та сформовано остаточну специфікацію елементної бази. Зокрема, підібрано центральний обчислювальний модуль Arduino Nano RP2040 Connect, прецизійні інтерфейсні мікросхеми термометрування MAX31855, компоненти імпульсного DC-DC перетворювача, драйвер крокового двигуна DRV8825 та модуль LCD-індикації.

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
						35
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Наступним критично важливим етапом розробки є конструкторсько-технологічне об'єднання дискретних компонентів та модулів у єдиний, фізично функціональний пристрій шляхом проектування топології друкованої плати (ДП).

Головне завдання даного розділу — реалізувати оптимальне просторове розміщення обраних елементів та трасування провідників у середовищі САПР **Altium Designer** з урахуванням жорстких технічних обмежень:

- 1. Електромагнітна сумісність (ЕМС):** Необхідно просторово та гальванічно розділити слабкострумний аналоговий контур зчитування сигналів термопар (мікрровольтні рівні) від потужних імпульсних завод, що генеруються ШІМ-ключами комутації нагрівачів та драйвером крокового двигуна.
- 2. Струмове навантаження:** Конструкція плати має безпомилково витримувати магістральний струм до 10 А від первинного блока живлення 24 В без критичного падіння напруги та перегріву мідних провідників.
- 3. Мінімізація габаритів:** Перехід на сучасну SMD-елементну базу (зокрема, використання силових діодів Шоттки типу SS34 в корпусах DO-214) дозволяє досягти високої щільності монтажу та зменшити площу плати.

У межах цього розділу буде виконано розрахунок геометричних параметрів провідників за стандартами IPC-2221, сформовано топологічні правила трасування (Design Rules), обґрунтовано контури заземлення та проведено повну верифікацію конструкції за допомогою трьохвимірного твердотілого 3D-моделювання для виключення колізій при монтажі в корпус.

5.3.1 Розрахунок ширини струмопровідних доріжок

Під час проектування друкованої плати автоматизованої системи подачі припою необхідно забезпечити надійну передачу струму до паяльників без надмірного нагрівання провідників. Для виготовлення плати використовується стандартна мідна фольга товщиною 35 мкм (1 oz).

У розробленому пристрої застосовуються два паяльники типу T12 потужністю 72 Вт кожний. Живлення здійснюється від джерела постійної напруги 24 В.

Струм, що споживається одним паяльником, визначається за формулою:

$$I = P / U$$

де $P = 72$ Вт – потужність паяльника; $U = 24$ В – напруга живлення.

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		36

Тоді струм одного паяльника становить:

$$I = 72/24 = 3 \text{ А}$$

З урахуванням можливих перевантажень, пускових режимів та похибок вимірювання приймаємо розрахунковий струм одного каналу:

$$I_{\text{розр}} = 3,4 \text{ А}$$

Оскільки система використовує два паяльники, максимальний сумарний струм силового кола дорівнює:

$$I_{\Sigma} = 2 \cdot 3,4 = 6,8 \text{ А}$$

Відповідно до рекомендацій стандарту IPC-2221 для зовнішніх шарів друкованої плати при струмі 3,4 А мінімальна необхідна ширина доріжки становить приблизно 1,2 мм.

У проекті для живлення паяльників використані доріжки шириною 2,5 мм на верхньому та нижньому шарах друкованої плати. Обидві доріжки з'єднані між собою перехідними отворами, тому фактично струм розподіляється між двома шарами. Еквівалентна провідна здатність такого рішення відповідає приблизно 5 мм ширини доріжки на одному шарі.

5.3.2 Розділ 3.3 Порівняння розрахункових та прийнятих значень.

Параметр	Значення
Розрахунковий струм одного паяльника	3,4 А
Сумарний струм двох паяльників	6,8 А
Мінімальна необхідна ширина доріжки	1,2 мм
Фактична ширина доріжки на одному шарі	2,5 мм
Кількість шарів для силового кола	2
Еквівалентна ширина доріжки	≈ 5 мм

Таблиця 3 Порівняння розрахункових та прийнятих параметрів

Таким чином, відносно мінімально необхідної ширини 1,2 мм забезпечено запас:

$$K = 5/1,2 \approx 4,2$$

Отже, силові доріжки мають запас понад 4 рази за пропускною здатністю.

Для сигнальних ланцюгів та живлення мікроконтролера Arduino застосовано доріжки шириною 1 мм. При струмах споживання, що не перевищують 0,2 А, така ширина забезпечує значний запас по допустимому струмовому навантаженню.

Враховуючи прийняту конструкцію силових доріжок, друкована плата здатна безпечно передавати струм до 12–15 А без критичного перегріву провідників, що суттєво перевищує максимальний робочий струм пристрою 6,8 А.

Отримані результати підтверджують правильність вибору ширини струмопровідних доріжок та забезпечують надійну роботу системи в тривалому режимі експлуатації.

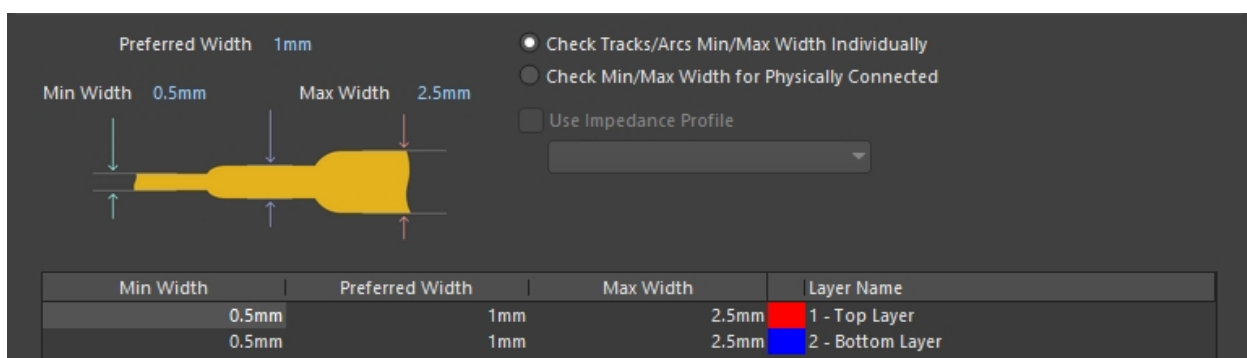


Рисунок 3.1 розраховані та прийняті значення ширин провідників

6 РОЗРОБКА ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

Перелік схеми керування розміщено в додатку В

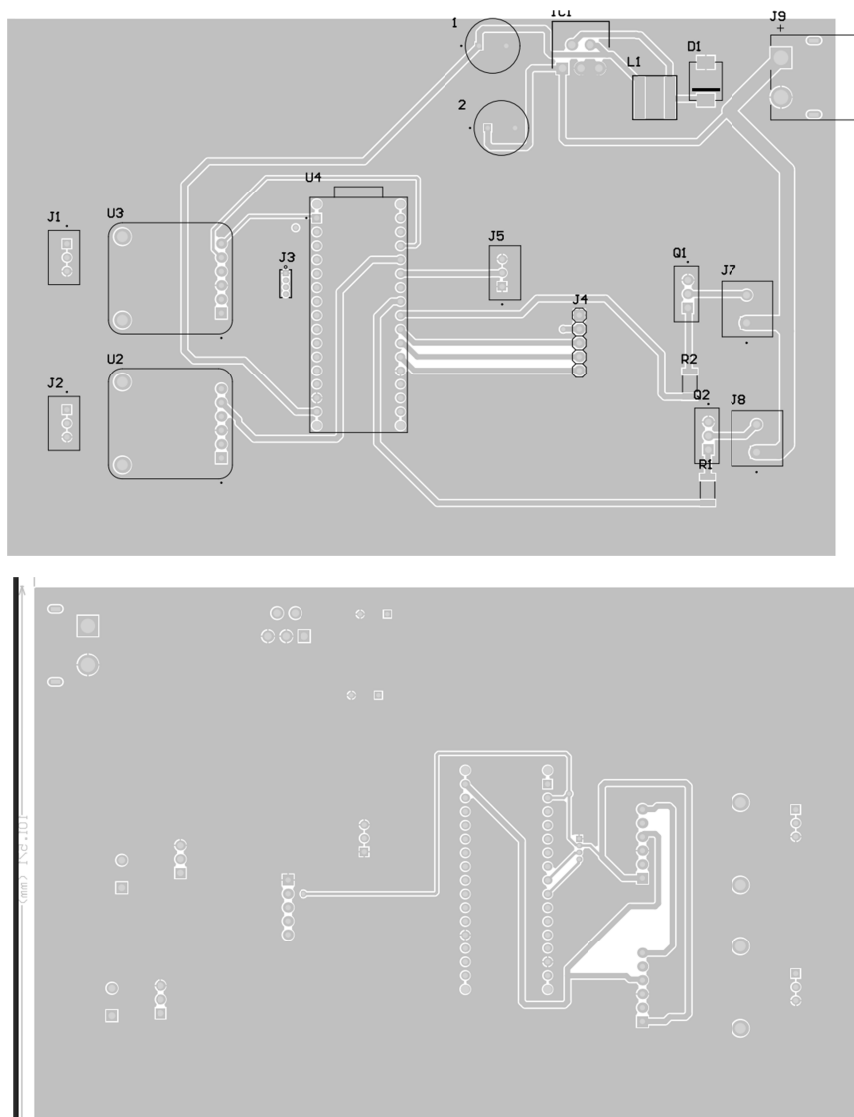


Рисунок 3.2 друкована плата двоканальної паяльної станції вид зверху
вид знизу

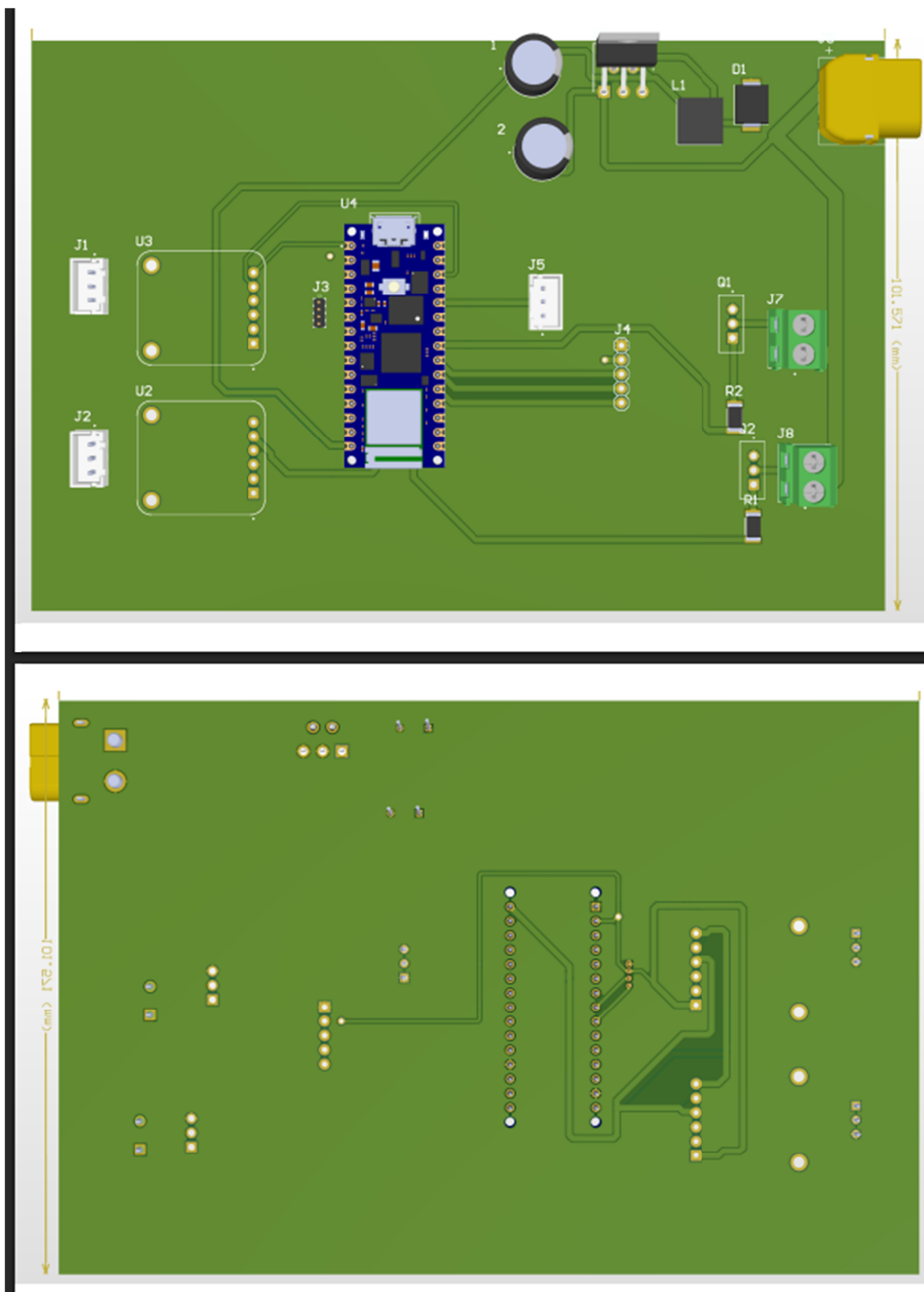


Рисунок 3.3 Трьохвимірна твердотільна модель (3D-view) розробленої друкованої плати двоканальної паяльної станції від зверху, від знизу

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-п31 .421000.001 ПЗ

Лис

40

7 РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ПРИСТРОЮ

Розрахунок надійності розробленого пристрою проводиться математичним методом за базовими інтенсивностями відмов електронних компонентів. Для оцінки надійності використовується експоненціальний закон розподілу відмов, який широко застосовується для електронної апаратури в періоді нормальної експлуатації.

Вихідні дані для розрахунку наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 4 – Інтенсивності відмов компонентів пристрою

Найменування елемента	Кількість, шт.	Інтенсивність відмов, $\lambda \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$
Arduino Nano RP2040 Connect	1	2
MAX31855	2	1
MOSFET-транзистори	2	1,5
DC-DC перетворювач LM2596	1	1,5
Пасивні компоненти (резистори, конденсатори, діоди, дроселі)	1 комплект	1
Роз'єми та паяні з'єднання	1 комплект	0,8

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

Підставляючи значення з таблиці 3.1, отримуємо:

$$\lambda_{\Sigma} = 2,0 + 1,0 + 1,5 + 1,5 + 1,0 + 0,8$$

$$\lambda_{\Sigma} = 7,8 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$$

7.1.1 Розрахунок середнього напрацювання на відмову

Середній час напрацювання на відмову визначається за формулою: $T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}}$

Після підстановки значення сумарної інтенсивності відмов маємо: $T_{\text{ср}} = \frac{1}{7,8 \cdot 10^{-6}}$

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{7,8 \cdot 10^{-6}} = 128205 \text{ год} = \frac{128205}{24 \cdot 365} = 14,6 \text{ років}$$

8 РОЗРОБКА 3D МОДЕЛІ ВУЗЛІВ

Вузол подачі припою за допомогою двигуна Minebea NEMA 17 3D модель самого двигуна була скачана на офіційному сайті :<https://www.autodesk.com>

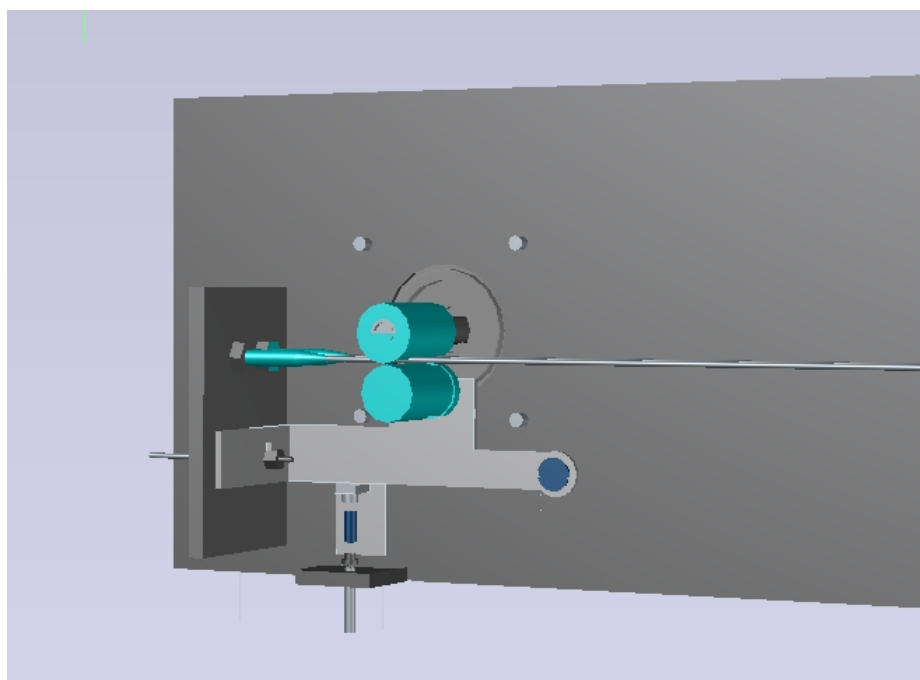
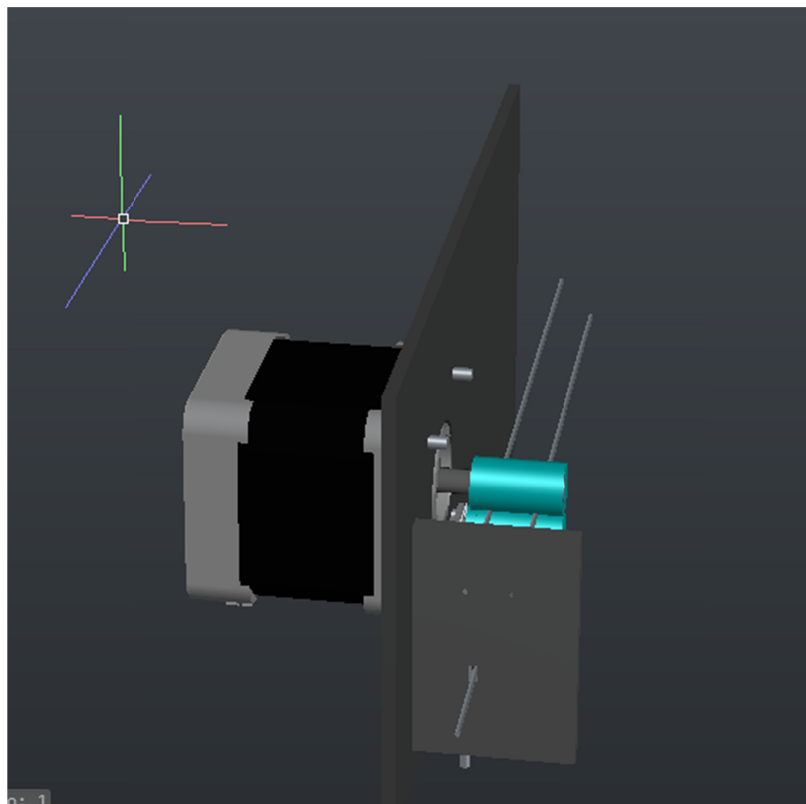


Рисунок 3 3D вигляд вузла подачі припою.

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		42

Вузол фіксації кабелю і роз'єму при пайці розроблений з розрахунком можливості настройки вильоту(сходження 2 зон), при потребі передбачено технічний отвір поза робочою зоною для заміни чи ремонту притискних матриць.

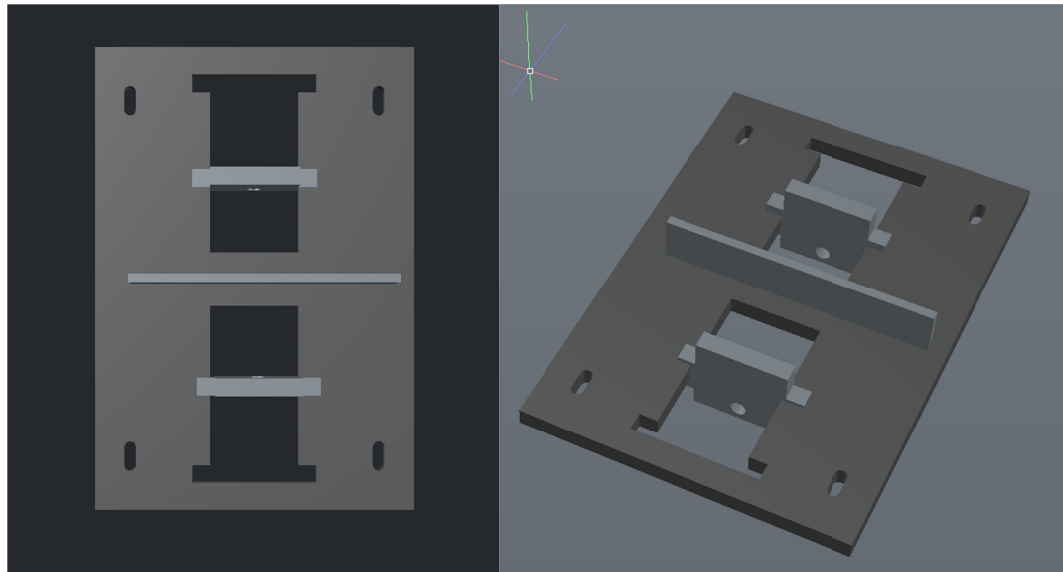


Рисунок 3.0.1 вузол фіксації кабелю

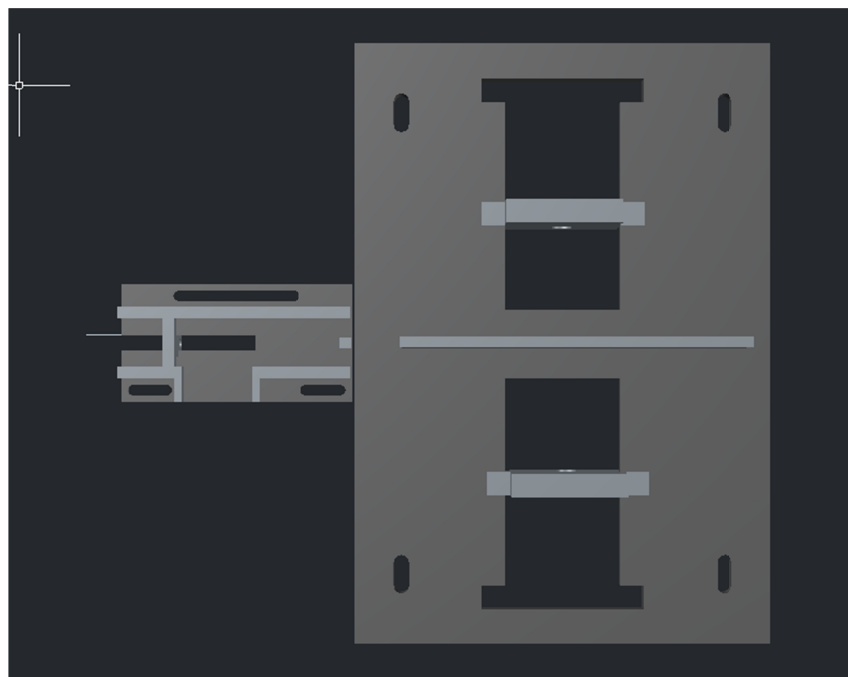


Рисунок 3.0.2 зона фіксації і пайки вид зверху

Вихід з вібробункера підключається до лівого майданчика рисунок 3.0.2 там уже пневмоциліндр здійснює лінійне переміщення притискної матриці (пластини) фіксує розєм ХТ у зоні пайки.

9 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

9.1 Обґрунтування структури ПЗ та вибору середовища розробки

Програмне забезпечення (ПЗ) апаратно-програмного пристрою автоматизації пайки розроблено для архітектури мікроконтролера RP2040 (процесорне ядро ARM Cortex-M0+ із тактовою частотою 133 МГц). Основними вимогами до функціонування ПЗ є забезпечення жорсткого реального часу для контуру термостабілізації (точність утримання температури до 5°C синхронізація кроків подачі припою з сигналами датчиків позиціонування та реалізація бездротової IoT-телеметрії.

Як середовище розробки було обрано **Arduino IDE** спільно з офіційним інструментальним пакетом підтримки платформ Raspberry Pi Pico / Arduino Nano RP2040. Прошивка написана мовою **C++** із застосуванням низькорівневих бібліотек апаратних інтерфейсів SPI та I2C, що дозволило мінімізувати час виконання логічних операцій.

9.2 Алгоритм функціонування паяльної станції та обробки сигналів датчиків

Логіка роботи програми побудована за принципом замкненого кінцевого автомата (Finite State Machine). Основний цикл програми (loop) безперервно опитує стан інформаційних підсистем та керує силовими виконавчими органами.

Головні етапи алгоритму прошивки:

Ініціалізація системи (setup): Виконується конфігурація напрямку ліній GPIO (входи датчиків, виходи ШІМ та драйвера двигуна), запуск апаратних шин SPI (для АЦП MAX31855) та I2C (для дисплея LCD1602), а також зчитування збережених значень робочої температури з EEPROM-пам'яті мікроконтролера.

Опитування датчиків та термостабілізація: У кожному циклі програма зчитує 14-бітні дані з АЦП MAX31855. Отримане цифрове значення поточної температури жал порівнюється із заданою користувачем уставкою. На основі

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		44

різниці температур обчислюється величина керуючого впливу за алгоритмом ПІД-регулювання, яка транслюється у ШІМ-сигнал для затворів силових MOSFET-транзисторів IRLZ44N.

Очікування сигналу готовності роз'єму: Програма блокує запуск механічних виконавчих органів, доки на цифровому вході PIN_XT_SENSOR утримується високий логічний рівень (датчик вільний). Автономний вібробункер самостійно транспортує та орієнтує деталі. Як тільки роз'єм XT потрапляє у фіксатор зони пайки, він перекриває датчик позиціонування, викликаючи перехід лінії PIN_XT_SENSOR у стан логічного нуля (LOW). Це є тригером до початку циклу паяння

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		45

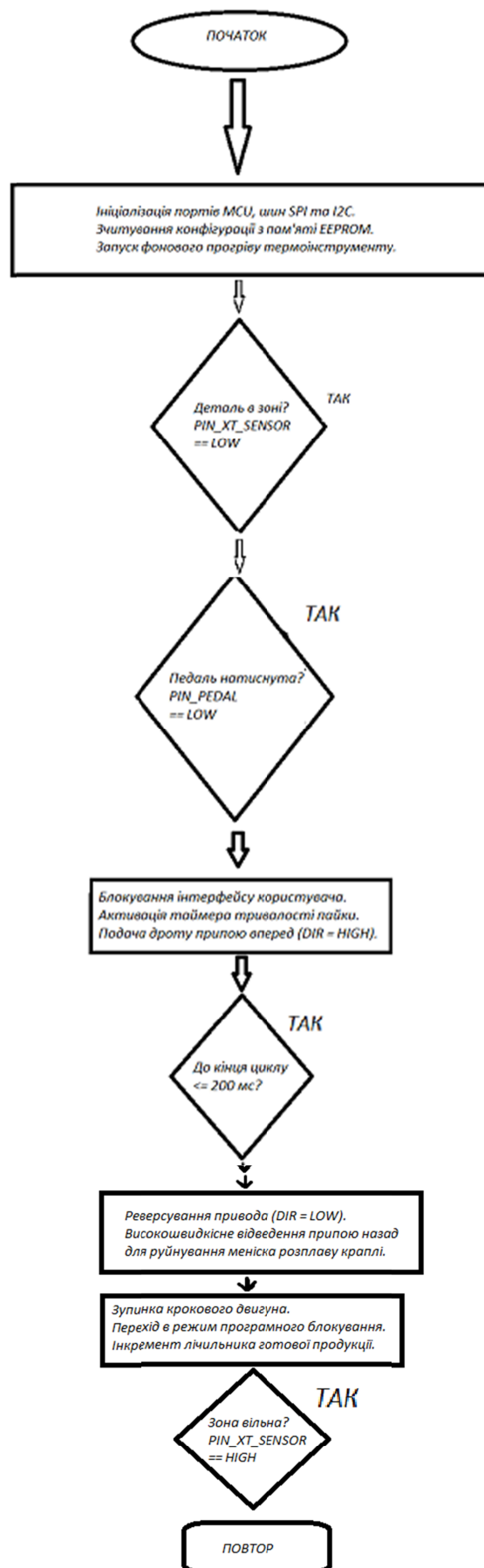


РИСУНОК 5 Схема алгоритму блока керування

9.3 Реалізація цифрового ПІД-регулятора термостабілізації

Для утримання стабільної температури жала та захисту пластикових корпусів роз'ємів ХТ від теплової деградації у програмі реалізовано алгоритм пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання. Обчислення керуючого сигналу $U(t)$ виконується за класичною дискретною формулою:

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \sum e(t) \Delta t + K_d \cdot \frac{e(t) - e(t-1)}{\Delta t}$$

де $T_{set} - T_{fact}$ — поточна помилка неузгодженості температури;

K_p , K_i , K_d — коефіцієнти регулятора, підібрані експериментальним методом Циглера-Ніколса для паяльних картриджів типу T12.

У програмному коді обчислене значення $U(t)$ обмежене діапазоном [0...255] і записується в регістр таймера за допомогою функції `analogWrite(PIN_HEATER, pwm_value)`. Це забезпечує високочастотну комутацію нагрівального елемента силовим ключем, підтримуючи задану температуру з точністю до $\pm 5^\circ\text{C}$.

9.4 Програмний опис координатно-часового алгоритму випереджального ретракту

Найбільш критичною частиною ПЗ є підрозділ керування кроковим двигуном NEMA 17 через драйвер DRV8825. Для виключення дефектів пайки, таких як утворення бурульок припою або заклинювання дроту в соплі подачі, в прошивку впроваджено оригінальну логіку часового випередження зворотного ходу (ретракту).

Програмний алгоритм фази пайки виконується у такій послідовності:

Після фіксації роз'єму датчиком XT_SENSOR програма витримує паузу прогріву контактів (DELAY_PREHEAT).

На лінію PIN_MOTOR_DIR подається високий рівень (напрямок «Вперед»), і за допомогою циклічної генерації імпульсів на лінії PIN_MOTOR_STEP

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		47

запускається кроковий двигун для дозованого виштовхування припою в зону нагріву зі швидкістю, визначеною уставкою.

Функція випереджального ретракту: За 200 мілісекунд до розрахункового закінчення загального часу паяння (коли жала ще торкаються контактів), програма миттєво інвертує прапорець напрямку `digitalWrite(PIN_MOTOR_DIR, LOW)` і генерує високочастотну пачку імпульсів для швидкого реверсу двигуна.

Дріт припою різко відводиться назад на 2–3 мм. Це забезпечує акуратний розрив рідкого меніска металу під дією сил поверхневого натягу безпосередньо у зоні нагріву, ліквідує напливи і повністю звільняє зріз сопла паяльного верстата від залишків припою перед відведенням жал.

9.5 Програмний опис бездротового IoT-моніторингу

Завдяки інтегрованому в Arduino Nano RP2040 Connect со-процесору **u-blox NINA-W102**, у ПЗ реалізовано підтримку бездротових стеків Wi-Fi та Bluetooth Low Energy (BLE).

У фоновому програмному потоці (реалізованому на базі архітектури другого ядра процесора ARM Cortex-M0+) викликається функція передачі телеметричних даних. Програма кожні 500 мс пакує поточні змінні (`T_fact1`, `T_fact2`, `solder_counter`, `system_status`) у JSON-строку та відправляє її по протоколу MQTT або через веб-сокети на сервер моніторингу підприємства. Це забезпечує віддалений контроль дотримання температурних профілів кожної пайки та автоматичне ведення цифрового журналу обліку випущеної продукції.

Написаний код розміщено в додатку А.

Короткий алгоритм:

1. **Етап позиціонування об'єкта:** Автономний вібробункер забезпечує лінійне переміщення та орієнтацію роз'єму серії XT у робочу зону ложементу. Оптичний датчик фіксує базове положення об'єкта, змінюючи логічний рівень на вході мікроконтролера (`PIN_XT_SENSOR = LOW`).

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		48

2. **Формування дозволу на запуск:** Пристрій переходить у стан очікування команди оператора. Замикання контактів ножного перемикача (PIN_PEDAL = LOW) є апаратною умовою старту автоматичного циклу.
3. **Контроль вихідних параметрів:** Через послідовний інтерфейс SPI мікроконтролер зчитує дані з 14-бітних аналогово-цифрових перетворювачів мікросхем термоінструменту MAX31855. За умови досягнення заданого теплового режиму ($T \geq T_{\text{уставки}} - 5^{\circ}\text{C}$), інтерфейс введення блокується і запускається внутрішній таймер фіксації часу пайки.
4. **Програмно-керована подача компонентів:** Драйвер крокового двигуна DRV8825 активує пряме обертання вала (DIR = HIGH), здійснюючи координатно-часову подачу дроту припою в зону термодоту протягом інтервалу $t_{\text{пайки}} - 200\text{мс}$. Стабільність температури забезпечується безперервною роботою ПІД-регулятора.
5. **Динамічний відрив краплі припою:** За 200 мс до закінчення загального технологічного часу виконується реверсування привода (DIR = LOW). Формується високошвидкісне зворотне відведення дроту для миттєвого руйнування поверхневого натягу розплаву та запобігання утворенню напливів матеріалу.
6. **Фіксація та блокування системи:** Подача керуючих сигналів на нагрівачі припиняється, значення загального лічильника готової продукції збільшується на одиницю. Блок керування переходить у стан програмного блокування до моменту зміни логічного сигналу датчика наявності об'єкта (PIN_XT_SENSOR = HIGH), що свідчить про евакуацію готового виробу з робочої зони.

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		49

ВИСНОВКИ

У дипломному проекті вирішено завдання автоматизації виробничих процесів у радіоелектронній промисловості, а саме — розроблено апаратно-програмний пристрій автоматичної пайки (АПП АП) роз'ємів типу ХТ.

Основные результаты работы:

Оптимізація логістики: Завдяки автономному вібробункеру автоматизовано орієнтацію деталей, що знизило час підготовчого циклу з 4–5 до 0.8 секунд.

Апаратна платформа: Систему керування побудовано на базі двоядерного мікроконтролера RP2040, що забезпечило паралельне виконання задач термоконтролю та керування приводами без взаємних затримок.

Конструкторська частина: В Altium Designer розроблено топологію двошарової плати за ЄСКД та IPC, розраховано теплові бар'єри та ширину провідників під загальну споживану потужність системи близько **200 Вт** (включаючи два нагрівачі паяльних картриджів по **72 Вт** та живлення супутньої апаратури).

Програмне забезпечення: В Arduino IDE мовою C++ реалізовано алгоритм ПІД-регулювання (з АЦП MAX31855) для стабілізації температури пайки, що виключає оплавлення пластикових корпусів.

Прецизійне дозування: Впроваджено алгоритм випереджального ретракту дроту припою (реверс двигуна на базі DRV8825 за 200 мс до кінця циклу), що ліквідувало утворення «бурульок».

Інтерфейс та IoT: Реалізовано вивід даних на LCD 1602 та бездротову передачу JSON-телеметрії на хмарний сервер через со-процесор u-blox NINA-W102 для контролю якості.

Особистий внесок полягає в огляді уже існуючих технологій, та виробів, розробці структури, трасуванні друкованої плати, написанні всього програмного коду, виконанні тривимірних 3D-моделей вузлів апаратної частини, а також у збірці та тестуванні діючого макету. Повної автоматизації технологічного циклу досягнуто завдяки впровадженню підсистеми пневмофіксації (використання пневмоциліндрів для притиску паяльників та матриці фіксації роз'єму і проводів).

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
						50
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А

Для мінімізації браку при формуванні паяного з'єднання та запобігання ефекту «холодної пайки» або заклинювання розхідного матеріалу в барелі, в систему керування впроваджено **алгоритм випереджального динамічного ретракту (Advanced Retract Control)**.

Суть алгоритму полягає в асинхронному часовому розділенні процесів подачі та нагріву. Традиційні системи виконують реверс двигуна протяжки після повного закінчення циклу паяння, коли силова ШІМ-генерація вже зупинена. Це призводить до відтягування припою у фазі його первинного охолодження та втрати плинності.

У розробленій прошивці реверс крокового двигуна ініціюється примусово за **0,2с 200мс**) до завершення встановленого оператором загального часу паяння .

Процес протікає за такою часовою діаграмою:

1. При спрацюванні тригера XT SENSOR запускається таймер відліку часу пайки.
2. Протягом циклу виконується пряма подача заданої дози припою.
3. При досягненні часової мітки 200мс мікроконтролер перериває фазу очікування і подає команду драйверу DRV8825 на зворотний хід (ретракт). В цей момент температура жала картриджа T12 залишається максимальною, що гарантує легке та безперешкодне відсікання рідкої фази припою від зони меніска.
4. Останні 200 мс термостабілізація продовжує працювати, забезпечуючи остаточне розтікання флюсу та формування правильної увігнутої геометрії галтелі паяного з'єднання, після чого нагрів вимикається.

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		51

```

Код для ARDUINO:
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SPI.h>

// --- Конфігурація пінів ---
#define PIN_ENCODER_CLK 2
#define PIN_ENCODER_DT 3
#define PIN_ENCODER_SW 4
#define PIN_XT_SENSOR 5 // Датчик позиціонування роз'єму від вібробункера

#define PIN_HEATER_1 6 // ШІМ вихід на перший MOSFET
#define PIN_HEATER_2 7 // ШІМ вихід на другий MOSFET

#define PIN_MOTOR_STEP 8 // Драйвер DRV8825 Step
#define PIN_MOTOR_DIR 9 // Драйвер DRV8825 Dir

#define PIN_MAX31855_CS1 10 // CS першого АЦП термопари
#define PIN_MAX31855_CS2 11 // CS другого АЦП термопари

// --- Налаштування екрану I2C (Адреса 0x27 або 0x3F) ---
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

// --- Змінні меню та енкадера ---
enum MenuMode { DISPLAY_INFO, SET_TEMP, SET_TIME, SET_SPEED };
MenuMode currentMode = DISPLAY_INFO;

volatile int encoderPos = 0;
int lastClkState;
unsigned long lastButtonPress = 0;

// --- Технологічні параметри (Уставки з меню) ---
int setTemperature = 320; // °C
int setSolderTime = 1500; // мс, загальний час пайки
int setFeedSpeed = 800; // Швидкість крокового двигуна (затримка мікросекунд)

// --- Телеметрія та лічильники ---
int finishedCyclesCounter = 0; // Лічильник готових виробів
int currentTemp1 = 0;
int currentTemp2 = 0;

// --- Змінні ПІД-регулятора ---
float Kp = 4.5, Ki = 0.2, Kd = 1.2;
float errSum1 = 0, lastErr1 = 0;
float errSum2 = 0, lastErr2 = 0;

// --- Функція читання температури з MAX31855 по SPI ---
int readMax31855(int csPin) {
    digitalWrite(csPin, LOW);
    delayMicroseconds(10);
    uint32_t value = 0;
    value |= SPI.transfer(0x00) << 24;
    value |= SPI.transfer(0x00) << 16;
    value |= SPI.transfer(0x00) << 8;
    value |= SPI.transfer(0x00);
    digitalWrite(csPin, HIGH);

    if (value & 0x7) return -1; // Помилка датчика (урвище термопари)
    int16_t tempRaw = (value >> 18) & 0x3FFF;
    if (value & 0x80000000) tempRaw |= 0xF000; // Знак мінуса
    return tempRaw * 0.25;
}

// --- Розрахунок ПІД та керування ШІМ ---
void updatePID() {
    currentTemp1 = readMax31855(PIN_MAX31855_CS1);
    currentTemp2 = readMax31855(PIN_MAX31855_CS2);

    // Канал 1

```

					РІ-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
						52
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		


```

float error1 = setTemperature - currentTemp1;
errSum1 += error1;
float dErr1 = error1 - lastErr1;
int pwm1 = constrain((Kp * error1) + (Ki * errSum1) + (Kd * dErr1), 0, 255);
analogWrite(PIN_HEATER_1, pwm1);
lastErr1 = error1;

// Канал 2
float error2 = setTemperature - currentTemp2;
errSum2 += error2;
float dErr2 = error2 - lastErr2;
int pwm2 = constrain((Kp * error2) + (Ki * errSum2) + (Kd * dErr2), 0, 255);
analogWrite(PIN_HEATER_2, pwm2);
lastErr2 = error2;
}

// --- Обробка обертання енкодера ---
void checkEncoder() {
    int clkState = digitalRead(PIN_ENCODER_CLK);
    if (clkState != lastClkState && clkState == LOW) {
        if (digitalRead(PIN_ENCODER_DT) != clkState) {
            encoderPos++;
            if (currentMode == SET_TEMP) setTemperature += 5;
            if (currentMode == SET_TIME) setSolderTime += 100;
            if (currentMode == SET_SPEED) setFeedSpeed -= 50; // Чим менше затримка, тим швидше
        } else {
            encoderPos--;
            if (currentMode == SET_TEMP) setTemperature -= 5;
            if (currentMode == SET_TIME) setSolderTime -= 100;
            if (currentMode == SET_SPEED) setFeedSpeed += 50;
        }
        setTemperature = constrain(setTemperature, 200, 420);
        setSolderTime = constrain(setSolderTime, 500, 5000);
        setFeedSpeed = constrain(setFeedSpeed, 200, 2000);
        updateDisplay();
    }
    lastClkState = clkState;
}

// --- Обробка натискання кнопки енкодера (Зміна режимів) ---
void checkButton() {
    if (digitalRead(PIN_ENCODER_SW) == LOW) {
        if (millis() - lastButtonPress > 300) { // Захист від брязкіту контактів
            if (currentMode == DISPLAY_INFO) currentMode = SET_TEMP;
            else if (currentMode == SET_TEMP) currentMode = SET_TIME;
            else if (currentMode == SET_TIME) currentMode = SET_SPEED;
            else if (currentMode == SET_SPEED) currentMode = DISPLAY_INFO;

            lcd.clear();
            updateDisplay();
            lastButtonPress = millis();
        }
    }
}

// --- Оновлення інформації на дисплеї ---
void updateDisplay() {
    if (currentMode == DISPLAY_INFO) {
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("T:" + String(currentTemp1) + "/" + String(setTemperature) + "C ");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("READY TOTAL:" + String(finishedCyclesCounter));
    }
    else if (currentMode == SET_TEMP) {
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("MENU: SET TEMP ");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("Temp: > " + String(setTemperature) + " C ");
    }
}

```

					РІ-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		53

```

else if (currentMode == SET_TIME) {
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("MENU: SOLDER TIME");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Time: > " + String(setSolderTime) + " ms ");
}
else if (currentMode == SET_SPEED) {
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("MENU: FEED SPEED");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Step Dly: >" + String(setFeedSpeed) + "us");
}
}

// --- Технологічний цикл пайки з випереджальним ретрактом за 200 мс ---
void executeSolderCycle() {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("SOLDER PROCESS..");

    // 1. Фаза випереджальної подачі припою (Загальний час мінус 200 мс ретракту)
    digitalWrite(PIN_MOTOR_DIR, HIGH); // Напрямок "Вперед"
    unsigned long startFeedTime = millis();
    unsigned long forwardDuration = setSolderTime - 200;

    while (millis() - startFeedTime < forwardDuration) {
        digitalWrite(PIN_MOTOR_STEP, HIGH);
        delayMicroseconds(setFeedSpeed);
        digitalWrite(PIN_MOTOR_STEP, LOW);
        delayMicroseconds(setFeedSpeed);
        updatePID(); // Безперервно тримаємо ПІД під час руху двигуна
    }

    // 2. Фаза ВИПЕРЕДЖАЛЬНОГО РЕТРАКТУ (Різке відведення дроту назад за 200 мс)
    digitalWrite(PIN_MOTOR_DIR, LOW); // Напрямок "Назад" (Ревверс)
    unsigned long startRetractTime = millis();

    while (millis() - startRetractTime < 200) {
        digitalWrite(PIN_MOTOR_STEP, HIGH);
        delayMicroseconds(250); // Висока швидкість ретракту для відриву краплі
        digitalWrite(PIN_MOTOR_STEP, LOW);
        delayMicroseconds(250);
        updatePID();
    }

    // Cycle Complete
    finishedCyclesCounter++; // Збільшуємо лічильник готових виробів
    lcd.clear();
    updateDisplay();

    // Очікуємо, поки датчик звільниться (вібробункер забере готовий роз'єм)
    while (digitalRead(PIN_XT_SENSOR) == LOW) {
        checkEncoder();
        checkButton();
        updatePID();
        delay(10);
    }
}

// --- Початкова конфігурація системи ---
void setup() {
    pinMode(PIN_ENCODER_CLK, INPUT_PULLUP);
    pinMode(PIN_ENCODER_DT, INPUT_PULLUP);
    pinMode(PIN_ENCODER_SW, INPUT_PULLUP);
    pinMode(PIN_XT_SENSOR, INPUT_PULLUP);

    pinMode(PIN_HEATER_1, OUTPUT);
    pinMode(PIN_HEATER_2, OUTPUT);
    pinMode(PIN_MOTOR_STEP, OUTPUT);
}

```

					PI-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		54

```

pinMode(PIN_MOTOR_DIR, OUTPUT);

pinMode(PIN_MAX31855_CS1, OUTPUT);
pinMode(PIN_MAX31855_CS2, OUTPUT);
digitalWrite(PIN_MAX31855_CS1, HIGH);
digitalWrite(PIN_MAX31855_CS2, HIGH);

SPI.begin();
lcd.init();
lcd.backlight();

lastClkState = digitalRead(PIN_ENCODER_CLK);
updateDisplay();
}

// --- Головний нескінченний робочий цикл ---
void loop() {
    checkEncoder();
    checkButton();
    updatePID();

    // Періодичне оновлення екрану в режимі очікування
    static unsigned long lastDisplayTime = 0;
    if (millis() - lastDisplayTime > 500 && currentMode == DISPLAY_INFO) {
        updateDisplay();
        lastDisplayTime = millis();
    }

    // Перевірка датчика позиціонування (тригер від автономного вібробункера)
    if (digitalRead(PIN_XT_SENSOR) == LOW && currentMode == DISPLAY_INFO) {
        // Додаткова перевірка виходу на задану температуру перед пайкою
        if (currentTemp1 >= (setTemperature - 5) && currentTemp2 >= (setTemperature - 5)) {
            executeSolderCycle();
        }
    }
}

```

					РІ-п31 .421000.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		55

Додаток В

ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМИ КЕРУВАННЯ,

Назва	Кількість	Примітка
Мікроконтролерна платформа Arduino Nano RP2040 Connect	1	Головний процесор системи
Аналогово-цифровий перетворювач (підсилювач термопари) MAX31855	2	Інтерфейс SPI (для зчитування температури)
Мікрокроковий драйвер двигуна DRV8825	1	Керування кроковим приводом
Датчики (Термопари та позиціонування)		
Термопара К-типу (інтегрована в паяльний картридж Nakko T12)	2	Датчики температури жал паяльника
Датчик позиціонування роз'єму XT (PIN_XT_SENSOR)	1	Оптичний датчик наявності деталі від бункера
Транзистори (Силові ключі)		
Польовий транзистор MOSFET IRLZ44N	2	Комутація нагрівачів каналів пайки
Дисплеї та механічні вузли		
Рідкокристалічний символний дисплей LCD1602 (з I2C модулем)	1	Екран індикації та лічильника
Біполярний кроковий двигун NEMA 17	1	Привід подачі дроту припою
Інкrementальний енкодер з кнопкою KY-040	1	Керування та навігація по меню

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Машина для паяння конекторів серії Bowl Feeder Xt Xt30 Xt60 Xt90
 - a. https://kscrown.en.made-in-china.com/product/twpGAJaVgCTo/China-Bowl-Feeder-Xt-Xt30-Xt60-Xt90-Series-Connector-Soldering-Machine.html?pv_id=1jrkbftkncb1&faw_id=1jrkc04fube0&bv_id=1jrkc04g06d6&pbv_id=1jrkbft8mf1
- 2) Роз'єми живлення AMASS XT30/XT60/XT90/XT120
 - a. https://detectori.com.ua/ua/catalog/razemy-pitaniya-xt30-xt60-xt90/?srsltid=AfmBOooIP7sZJLvtI2TeXP93IlKDOpXY_AVK8JRle3mfs70onjlkHKwM
 - b. Arduino. Arduino Nano RP2040 Connect datasheet. Official Arduino Documentation, 2021. URL:
<https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00053-datasheet.pdf>
- 3) T12 DIY Solder Controller with 1.3" OLED Display
- 4) <https://www.robotics.org.za/T12-OLED13-KIT>
 - a. Дисплей LCD 1602 + модуль I2C/IIC
 - b. https://arduinoakit.com.ua/ua/p1433688907-displej-lcd-1602.html?srsltid=AfmBOorhgAm0xXCrW_jMnwu42phO5YpFEE5EnSlbMO3-AJA0px7RddqO,
- 5) Бібліотеки Altium Designer: <https://www.snapeda.com>
- 6) 3D модель Крокового двигуна NEMA 17
 - a. <https://www.autodesk.com/community/gallery/project/148023/minebea-nema-17-stepper-motor--42mm-x-42mm-x-44-5mm--step-and-dwg-model>