

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

(тема)

Розроблення системи управління технологічним процесом

лазерної пайки з використанням ЧПК

Виконав: здобувач 2 курсу, гр. КІТІВМ-23-1

Лихошвай І.П.

(прізвище, ініціали)

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

освітньої програми Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва напряму)

Тип програми освітньо-професійна

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. КІТАР Омаров Ш.А.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

Невлюдов І.Ш.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва (код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Лихошваю Іллі Павловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи управління технологічним процесом лазерної пайки з використанням ЧПК

затверджена наказом по університету від _____ 22.11. 2024 р. № 1231 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії _____ 31.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Макет, пристосований для 3D-друку;

3.2 Система керування макетом на основі GRBL;

3.3 Мінімальні посадкові майданчики 0402.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ;

4.2 Аналіз переваг і недоліків лазерної пайки;

4.3 Розробка макету апаратної частини системи;

4.4 Адаптація програмного забезпечення для макету

4.5 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 14 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури за темою кваліфікаційної роботи	25.11.2024 – 27.11.2024	виконано
2	Аналіз технологічного процесу лазерної пайки	28.11.2024 – 03.12.2024	виконано
3	Розробка та вибір апаратних складових макету	04.12.2024 – 08.12.2024	виконано
4	Збірка макету системи	09.12.2024 – 12.12.2024	виконано
5	Проектування програмного модуля	13.12.2024 – 16.12.2024	виконано
6	Розробка програмного модуля	17.12.2024 – 25.12.2024	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	25.12.2024 – 30.12.2024	виконано
8	Подання роботи у ЕК	31.12.2024	виконано

Дата видачі завдання

25.11.2024

Здобувач

(підпис)

Лихошвай І.П.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

проф. каф. КІТАР

Омаров Ш.А.

(посада, прізвище, ініціали)

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

"23" грудня 2024 р.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'I.P. Likhoshvai', enclosed in a thin black rectangular border.

Лихошвай І.П.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 110 с., 21 рис., 3 дод., 27 джерел.

ЛАЗЕРНА ПАЙКА, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, ЧИСЛОВЕ ПРОГРАМНЕ КЕРУВАННЯ, G-CODE, ДРУКОВАНІ ПЛАТИ, МОРФОЛОГІЧНА ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ

Мета роботи – підвищення ефективності та точності управління технологічним процесом лазерної пайки шляхом розробки системи на основі числового програмного керування (ЧПК).

Об'єкт дослідження – процес автоматизації лазерної пайки електронних компонентів.

Предмет дослідження – система управління, що включає програмне забезпечення для ЧПК, що забезпечують виконання лазерної пайки електронних компонентів.

У даній кваліфікаційній роботі був розглянутий технологічний процес лазерної пайки та проаналізоване обладнання для лазерної пайки. Також, був проведений аналіз та наведені переваги і недоліки лазерної пайки. В кінці теоретичної частини були розглянуті сучасні тенденції в технології лазерної пайки.

Наступною частиною роботи стала розробка макету системи лазерної пайки. Було підготовлено структурну схему макету, був здійснений підбір апаратних та програмних засобів для макету системи. Була розроблена 3D-модель макету, деталі, оптимізовані для 3D-друку виготовлені на 3D-принтері. Готове програмне забезпечення GRBL було адаптовано для отриманого макету. В кінці цього етапу було отримано зібраний макет системи.

Для розробленого макету системи було спроектовано та реалізовано програмне забезпечення для створення керуючої програми у вигляді G-code

при вхідних даних – Gerber файли, що отримуються при фінальній підготовці друкованих плат для виготовлення. Був сформований опис алгоритмів управління процесом лазерної пайки. Проведено моделювання та симуляцію технологічного процесу. В кінці було проведено розрахунок освітлення та наведені міри безпеки роботи з лазером.

Також, отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 8 ”Гідна праця та економічне зростання”, а саме п.8.2 “Підвищувати ефективність виробництва на засадах сталого розвитку та розвитку високотехнологічних конкурентних виробництв”. Впровадження автоматизованої системи управління процесом лазерної пайки сприяє підвищенню ефективності виробництва завдяки застосуванню ЧПК та сучасних технологій. Розробка дозволяє: автоматизувати процеси пайки, сприяти розвитку високотехнологічного виробництва, забезпечувати сталість розвитку.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 110 p., 21 fig., 3 pp., 27 sources.

LASER SOLDERING, AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES, CONTROL SYSTEM, COMPUTER NUMERICAL CONTROL (CNC), G-CODE, PRINTED CIRCUIT BOARDS, MORPHOLOGICAL IMAGE PROCESSING

The purpose of work is to improve the efficiency and accuracy of laser brazing process control by developing a system based on numerical control (NC).

The object of research is the process of automation of laser soldering of electronic components.

The subject of research is a control system that includes CNC machine software that ensures the performance of laser soldering of electronic components.

In this qualification work, the technological process of laser soldering and the equipment used for laser soldering were examined. An analysis was conducted, and the advantages and disadvantages of laser soldering were presented. At the end of the theoretical part, modern trends in laser soldering technology were reviewed.

The next part of the work involved the development of a prototype for the laser soldering system. A structural diagram of the prototype was prepared, and hardware and software components were selected for the system. A 3D model of the prototype was developed, with components optimized for 3D printing and fabricated using a 3D printer. The ready-made GRBL software was adapted for the prototype. By the end of this stage, a fully assembled system prototype was obtained.

For the developed system prototype, software was designed and implemented to generate control programs in the form of G-code based on input data – Gerber files obtained during the final preparation of printed circuit boards for manufacturing. A description of the control algorithms for the laser soldering

process was formulated. Modeling and simulation of the technological process were carried out. In the final stage, lighting calculations were performed, and safety measures for working with the laser were provided.

Furthermore, the results of this work can be aligned with Sustainable Development Goal 8: “Decent Work and Economic Growth,” specifically point 8.2: “Achieve higher levels of economic productivity through diversification, technological upgrading, and innovation, including through a focus on high-value added and labor-intensive sectors.” The implementation of an automated control system for the laser soldering process contributes to improving production efficiency through the application of CNC technology and modern solutions. This development enables the optimization of soldering processes, fosters the advancement of high-tech manufacturing, and ensures sustainable development.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	10
Вступ.....	11
1 Сучасний стан лазерної пайки.....	13
1.1 Поняття і принципи лазерної пайки.....	13
1.2 Аналіз технологічного процесу лазерної пайки.....	16
1.3 Обладнання для лазерної пайки.....	21
1.4 Переваги і недоліки лазерної пайки.....	24
1.5 Сучасні тенденції в технології лазерної пайки.....	27
1.6 Висновки до першого розділу.....	30
2 Розробка макету системи лазерної пайки.....	31
2.1 Розробка структурної схеми макету.....	31
2.2 Підбір апаратних та програмних засобів для макету системи.....	34
2.3 Розробка 3D-моделі макету.....	41
2.4 Адаптація програмного забезпечення для макету.....	45
2.5 Комп'ютерне моделювання системи автоматичного управління.....	52
2.6 Збірка макету системи.....	54
2.7 Висновки до другого розділу.....	57
3 Розробка системи управління лазерною пайкою із застосуванням ЧПК.....	58
3.1 Проектування програмного забезпечення.....	58
3.2 Опис алгоритму управління процесом лазерної пайки.....	64
3.3 Моделювання та симуляція технологічного процесу.....	73
3.4 Тестування і валідація системи управління.....	74
3.5 Розрахунок освітлення та міри безпеки роботи з лазером.....	77
3.6 Висновки до третього розділу.....	80
Висновки.....	81
Перелік джерел посилання.....	83
Додаток А Апробація теми роботи.....	86
Додаток Б Фрагменти коду реалізації програмної частини.....	91
Додаток В Демонстраційний графічний матеріал.....	109

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

КД – кроковий двигун

ЛП – лазерна пайка

МК – мікроконтролер

ТП – технологічний процес

ЧПК - числове програмне керування

ЕСАD – програма автоматизованого проєктування для електроніки (англ. Electronic Computer-Aided Design)

ЕDА – програми проєктування електронних пристроїв (англ. Electronic Design Automation)

SMD – поверхневий монтаж (англ. Surface Mount Design)

ТНТ – наскрізний монтаж (англ. Through Hole Technology)

ВСТУП

Розроблення системи управління технологічним процесом лазерної пайки з використанням числового програмного керування (ЧПК) є важливим етапом в автоматизації сучасних виробничих процесів. У сучасному виробництві друкованих плат та електронних компонентів значна увага приділяється підвищенню точності, ефективності та швидкості процесів, серед яких лазерна пайка займає важливе місце.

За останні роки спостерігається стійка тенденція до впровадження автоматизованих рішень у виробництво. Зокрема, технології лазерної пайки широко застосовуються в електронній промисловості для забезпечення високої точності монтажу компонентів та оптимізації виробничих витрат. Це обумовлено зростаючою потребою у мініатюризації пристроїв, підвищенні їхньої надійності та швидкості виготовлення.

Розроблення системи на основі ЧПК дозволяє забезпечити автоматизацію процесу пайки, впроваджуючи сучасні підходи до програмування траєкторій руху лазера, управління режимами його роботи та інтеграції із виробничими конвеєрами. Це відкриває можливості для підвищення продуктивності та якості, що є критично важливим у сучасних умовах висококонкурентного ринку.

Мета роботи – підвищення ефективності та точності управління технологічним процесом лазерної пайки шляхом розробки системи на основі числового програмного керування (ЧПК).

Об'єкт дослідження – процес автоматизації лазерної пайки електронних компонентів.

Предмет дослідження – система управління, що включає програмне забезпечення для ЧПК, що забезпечують виконання лазерної пайки електронних компонентів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати технологічного процесу лазерної пайки та обладнання, що може бути використано для автоматизації лазерної пайки
- проаналізувати переваги і недоліки ЛП;
- розробити макет апаратної частини системи;
- адаптувати програмне забезпечення для зібраного макету;
- спроектувати та реалізувати програмне забезпечення для отриманого макету аби за вхідними даними із Gerber файлів друкованої плати отримати програму керування процесом лазерної пайки у вигляді G-code.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 2015 [1] та спираючись на методичні вказівки [2].

1 СУЧАСНИЙ СТАН ЛАЗЕРНОЇ ПАЙКИ

1.1 Поняття і принципи лазерної пайки

Лазерна пайка (ЛП) є високотехнологічним процесом з'єднання матеріалів, заснованим на застосуванні лазерного випромінювання як джерела тепла. Цей метод використовується для з'єднання металевих компонентів за допомогою припою, який плавиться під дією концентрованого лазерного променя. Лазер забезпечує точне і локальне нагрівання матеріалів, що дозволяє отримати надійні з'єднання при мінімальному впливі на навколишні ділянки [3].

ЛП особливо корисна для обробки делікатних, чутливих до перегріву або викривлення компонентів. Такий тип пайки (рис. 1.1) широко застосовується у мікроелектроніці, автомобілебудуванні, при виробництві медичних пристроїв та в інших галузях, що вимагають високої точності.

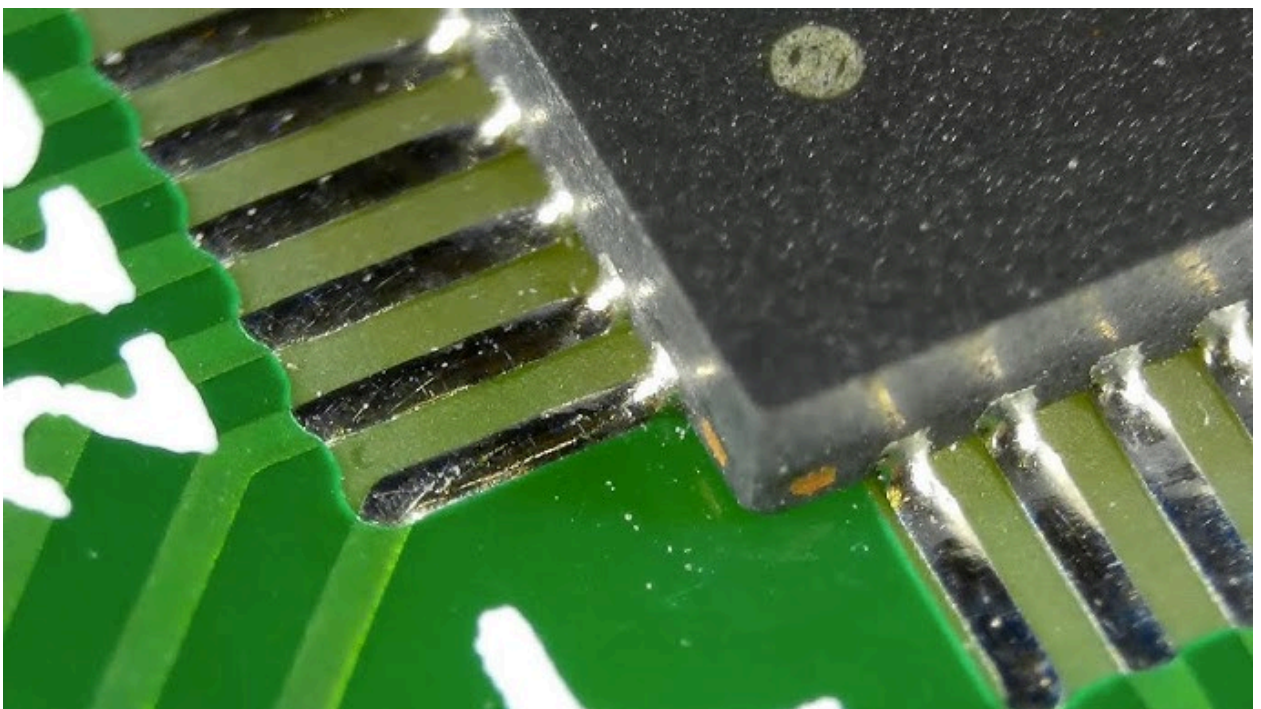


Рисунок 1.1 – Приклад результату лазерної пайки [4]

Принципи лазерної пайки [5]:

– застосування лазерного випромінювання: в основі лазерної пайки лежить використання лазера як джерела енергії для нагрівання припою і матеріалу в зоні з'єднання. Лазерний промінь концентрується в одній точці, що забезпечує високу точність процесу;

– контроль нагрівання: лазери дозволяють точно контролювати температурний профіль в процесі пайки. Це мінімізує ризик перегріву матеріалів і дозволяє уникнути термічних деформацій, характерних для традиційних методів пайки;

– механізм формування з'єднання: процес починається з підготовки деталей, включаючи їхнє очищення та нанесення припою. Лазерний промінь спрямовується на точку пайки, підвищуючи її температуру до моменту плавлення припою. Після охолодження припою формується надійне з'єднання;

– можливість локалізації процесу: лазер дозволяє обмежувати зону нагрівання, що є важливим при роботі з компонентами, чутливими до температури, такими як мікросхеми або тонкі металеві деталі;

– безконтактність: на відміну від традиційної пайки, де застосовуються паяльні пристрої, лазерна пайка є безконтактною, що зменшує ризик механічного впливу на матеріал і забруднення поверхні;

– висока повторюваність і автоматизація: завдяки тому, що процес лазерної пайки легко інтегрується в автоматизовані виробничі лінії, використання систем ЧПК дозволяє досягти високої повторюваності та точності з'єднань.

ЛП знайшла широке застосування в різних галузях промисловості [6] завдяки своїм унікальним можливостям забезпечення високої точності, міцності та якості з'єднань. Вона стала важливим інструментом у виробничих процесах, що вимагають високої точності та надійності.

– мікроелектроніка: у галузі мікроелектроніки лазерна пайка є незамінною для з'єднання мініатюрних компонентів, таких як мікросхеми,

транзистори, резистори та інші електронні елементи. Висока точність і мінімальна зона термічного впливу дозволяють уникнути перегріву чутливих елементів та забезпечити надійність з'єднань. Це особливо важливо для виробництва високотехнологічних пристроїв, де кожен компонент відіграє критичну роль у загальній функціональності системи;

– автомобільна промисловість: в автомобільній індустрії лазерна пайка використовується для з'єднання електронних блоків керування, сенсорів та інших компонентів складних автомобільних систем. Враховуючи, що сучасні автомобілі стають дедалі більш технологічними, із збільшенням кількості електронних компонентів, потреба в точних і надійних з'єднаннях зростає. ЛП дозволяє забезпечити високу швидкість і якість виготовлення цих з'єднань, що позитивно впливає на загальну продуктивність і надійність автомобільних систем;

– аерокосмічна промисловість: у аерокосмічній галузі, де надійність та точність є критично важливими, лазерна пайка використовується для з'єднання компонентів, що піддаються значним навантаженням та впливу екстремальних умов. Наприклад, вона застосовується для виготовлення деталей літальних апаратів та космічних кораблів, де мінімальні похибки в з'єднаннях можуть мати фатальні наслідки. Завдяки здатності створювати міцні та герметичні з'єднання, ЛП сприяє підвищенню надійності і безпеки конструкцій в аерокосмічній техніці;

– медицина: у медичній сфері ЛП використовується для створення високоякісних з'єднань в мікрохірургічних інструментах, імплантатах та інших медичних пристроях, які потребують виняткової точності та біосумісності. Вона дозволяє створювати надійні з'єднання без використання шкідливих речовин, що є особливо важливим для медичних пристроїв, які контактують з організмом людини. Наприклад, лазерна пайка використовується при виготовленні серцевих імплантатів або стоматологічних протезів, де необхідна висока точність і міцність з'єднання.

Таким чином, лазерна пайка є важливим інструментом для забезпечення високоякісних і точних з'єднань, що робить її незамінною в багатьох сучасних технологічних галузях. Її універсальність і точність дозволяють використовувати її в складних виробничих процесах, забезпечуючи надійність і довговічність з'єднань.

1.2 Аналіз технологічного процесу лазерної пайки

Технологічний процес (ТП) лазерної пайки є комплексом технологічних операцій, що спрямовані на створення міцного та надійного з'єднання між матеріалами за допомогою лазерного випромінювання. Кожен етап цього процесу є критично важливим для досягнення якісного результату та забезпечення надійності з'єднань. Загальна схема технологічного процесу включає наступні ключові етапи:

– підготовка деталей: перед початком лазерної пайки необхідно ретельно підготувати поверхні деталей. Цей етап включає очищення поверхонь від будь-яких забруднень, таких як окиси, жири чи пил, оскільки присутність сторонніх речовин може вплинути на якість з'єднання. Крім того, важливим є вирівнювання крайок, щоб забезпечити мінімальний зазор між деталями. Деталі фіксуються у необхідному положенні за допомогою спеціальних фіксаторів або пристроїв, щоб уникнути їхнього зміщення під час процесу пайки;

– фокусування лазерного променя: наступним етапом є фокусування лазерного променя на зоні з'єднання. Фокусування дозволяє досягти високої щільності потужності на невеликій площі, що необхідно для швидкого локального нагрівання і плавлення матеріалу. Використання точного фокусування є критичним для мінімізації впливу на навколишні ділянки матеріалу, що дозволяє зберігати структурну цілісність деталі і забезпечує високу якість з'єднання [7];

– взаємодія лазерного випромінювання з матеріалом: після фокусування лазерний промінь починає взаємодіяти з матеріалом. При цьому енергія лазерного випромінювання поглинається поверхнею матеріалу, викликаючи його локальне нагрівання і плавлення. Важливою характеристикою цього етапу є контроль інтенсивності і тривалості лазерного впливу, щоб уникнути перегріву або нерівномірного плавлення, що може призвести до дефектів у з'єднанні;

– формування з'єднання: у зоні фокусування відбувається плавлення матеріалу, який заповнює зазор між деталями. Під час охолодження розплавлений матеріал кристалізується, утворюючи міцне і однорідне металургійне з'єднання. На цьому етапі важливо забезпечити рівномірне розподілення розплавленого матеріалу, щоб запобігти утворенню порожнин чи мікротріщин, які можуть негативно вплинути на довговічність з'єднання;

– охолодження: заключним етапом є швидке охолодження з'єднання. Це необхідно для закріплення структури матеріалу і запобігання утворенню небажаних фазових змін чи деформацій. Охолодження може відбуватися природним шляхом або з використанням спеціальних охолоджуючих систем. Швидке охолодження дозволяє зберегти механічні властивості з'єднання і підвищує його міцність та стійкість до зовнішніх впливів.

Режими лазерної пайки радіоелементів відіграють ключову роль у забезпеченні високої якості з'єднань та оптимізації технологічного процесу. Кожен режим має свої особливості та застосування, які залежать від характеристик матеріалів та вимог до з'єднань. Розглянемо основні режими лазерної пайки:

– безперервний режим: у цьому режимі лазер випромінює безперервний промінь, що забезпечує стабільне нагрівання та плавлення матеріалу. Це дозволяє досягти рівномірного прогріву, що знижує ризик виникнення термічних напружень і деформацій у матеріалі. Безперервний режим особливо корисний при пайці матеріалів, які вимагають тривалого теплового впливу, таких як метали з високою теплопровідністю. Даний

режим також забезпечує високу швидкість пайки, що є важливим фактором для виробництв, де необхідна висока продуктивність;

– імпульсний режим використовується для пайки тонких матеріалів або в ситуаціях, коли потрібно зменшити зону термічного впливу. У цьому режимі лазер випромінює короткі імпульси світла, що дозволяє зосередити енергію на певному ділянці матеріалу протягом дуже короткого часу. Це запобігає перегріву навколишніх областей і зменшує ризик пошкодження чутливих компонентів. Імпульсний режим особливо ефективний для обробки мікроелементів, де точність та контроль за температурою є критичними;

– комбінований режим є поєднанням безперервного і імпульсного режимів, що дозволяє оптимізувати процес пайки в залежності від конкретних вимог. Цей режим може бути корисним для досягнення балансованого нагріву та зниження ризику термічного впливу на матеріал. Використання комбінованого режиму дозволяє адаптувати лазерне випромінювання до характеристик оброблюваних матеріалів та специфіки з'єднання, забезпечуючи при цьому високу якість і надійність з'єднань.

Параметри, що впливають на якість з'єднання в процесі лазерної пайки, є критично важливими для досягнення бажаних механічних і фізичних властивостей з'єднань. Розглянемо основні з цих параметрів:

– потужність лазера є одним з найважливіших параметрів, що визначає швидкість нагрівання матеріалу та глибину його проплавлення. Вища потужність забезпечує швидке нагрівання, що може сприяти більшій швидкості пайки. Проте, надмірна потужність може призвести до перегріву матеріалу, деформації деталей та утворення дефектів у з'єднанні. Важливо ретельно налаштувати потужність, щоб досягти оптимального балансу між швидкістю пайки і якістю з'єднання;

– швидкість переміщення променя: цей параметр визначає, наскільки швидко лазерний промінь переміщується по поверхні матеріалу під час процесу пайки. Швидкість впливає на ширину шва та його форму: при швидшому переміщенні ширина шва може зменшитися, тоді як при

повільному – збільшитися. Неправильне налаштування швидкості призведе до нерівномірного нагрівання, перегріву або недостатнього прогріву матеріалу, що, в свою чергу, негативно вплине на якість з'єднання [8];

– діаметр фокусної плями лазерного променя визначає точність і концентрацію теплового впливу на матеріал. Менший діаметр забезпечує більш точкове нагрівання, що дозволяє зменшити зону термічного впливу і уникнути пошкодження навколишніх матеріалів. Однак, зменшення діаметра фокусної плями може також вимагати більшої потужності для досягнення потрібної глибини проплавлення.

Контроль якості з'єднань, виконаних методом лазерної пайки, є критично важливим етапом, що забезпечує відповідність кінцевого продукту встановленим стандартам та вимогам. Якість з'єднання оцінюється за рядом параметрів, основними з яких є:

– міцність з'єднання є одним з ключових показників, що відображає його здатність витримувати механічні навантаження без руйнування. Для оцінки міцності проводяться різноманітні механічні випробування, такі як випробування на зсув, розрив і вигин. Ці тести дозволяють визначити максимальні навантаження, які може витримати з'єднання, а також його поведінку при різних умовах навантаження. Результати механічних випробувань повинні відповідати технічним умовам, визначеним для конкретного виробу, та забезпечувати необхідний рівень надійності в умовах експлуатації;

– зовнішній вигляд з'єднання є важливим аспектом, що може свідчити про якість виконання пайки (рис. 1.2). Оцінка зовнішнього вигляду здійснюється як візуально, так і за допомогою мікроскопії. Візуальний огляд дозволяє виявити явні дефекти, такі як тріщини, порожнини, нерівності, зміни кольору та інші відхилення, що можуть вказувати на проблеми під час процесу пайки. Мікроскопічний аналіз дозволяє детальніше вивчити поверхню з'єднання, виявити мікротріщини, неоднорідності та інші мікроскопічні дефекти, які можуть бути непомітні при візуальному огляді. Це

особливо важливо для застосувань, де точність і надійність з'єднань є критичними.

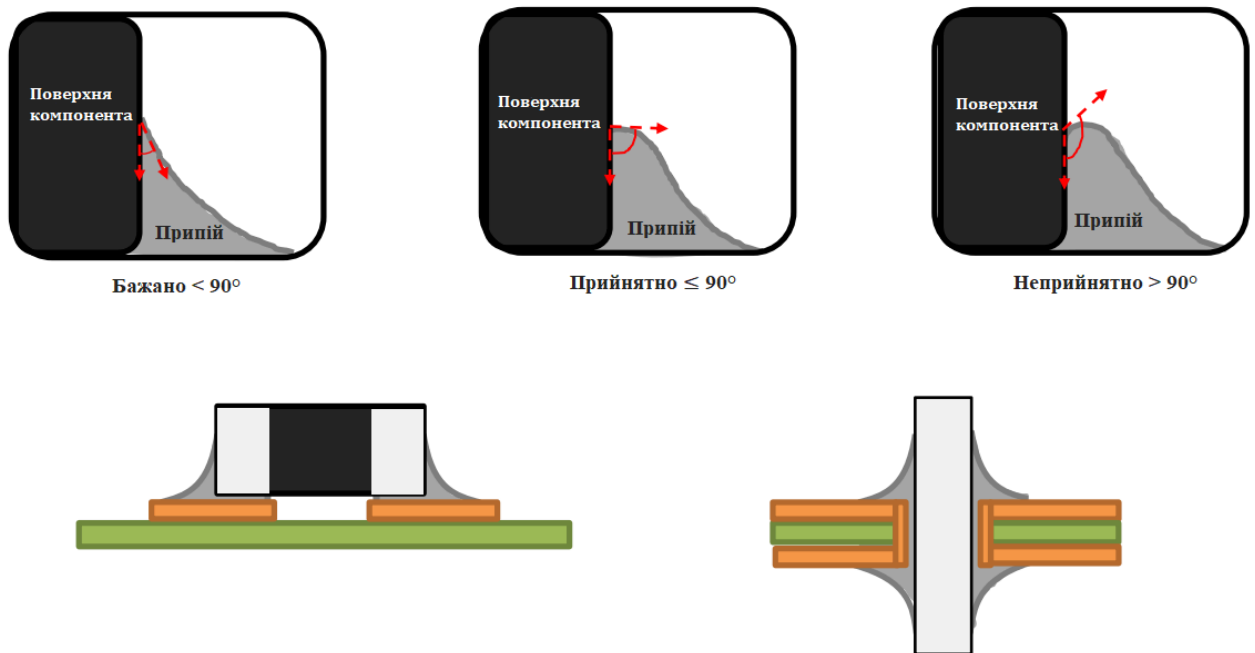


Рисунок 1.2 – Критерії кутів дотику при змочуванні паяних з'єднань (вгорі), бажані форми з'єднань для SMD-компонентів (surface mount design) і виводів ТНТ-компонентів (through-hole technology) (внизу) [4]

Узагальнюючи, контроль якості з'єднань, виконаних лазерною пайкою, включає не тільки механічні випробування для визначення міцності, але й візуальну та мікроскопічну оцінку зовнішнього вигляду. Цей комплексний підхід дозволяє забезпечити високий рівень якості з'єднань і гарантує їх надійність в умовах експлуатації.

ТП лазерної пайки є складним і багатофакторним. Для отримання якісного з'єднання необхідно враховувати велику кількість параметрів і оптимізувати їх під конкретні умови. Застосування сучасних лазерних технологій і систем автоматичного управління дозволяє забезпечити високу точність і повторюваність результатів.

1.3 Обладнання для лазерної пайки

Обладнання для лазерної пайки є серцем цього технологічного процесу. Воно складається з декількох основних компонентів, кожен з яких виконує свою функцію:

- лазерне джерело: генерує лазерне випромінювання необхідної довжини хвилі, потужності та режиму роботи (безперервний або імпульсний). Найчастіше використовуються твердотільні лазери (Nd:YAG, волоконні лазери), газові лазери (CO₂) та напівпровідникові лазери;

- система оптичної передачі: спрямовує лазерне випромінювання від джерела до робочої зони, включаючи систему фокусування. Оптичні елементи (дзеркала, лінзи) забезпечують точне позиціонування променя;

- система керування: забезпечує точне керування параметрами лазерного випромінювання (потужність, режим роботи) та рухом робочої головки. Сучасні системи керування дозволяють реалізувати складні траєкторії руху променя та автоматизувати процес пайки;

- робоча головка: встановлюється на рухомій платформі і містить фокусує оптику, систему захисту від відблисків та інші допоміжні елементи;

- система позиціонування: забезпечує точне позиціонування робочої головки відносно оброблюваної деталі. Може бути виконана на основі координатних столів, роботів-маніпуляторів або інших механізмів;

- система охолодження: відводить тепло, що виділяється під час роботи лазера та в зоні пайки, для забезпечення стабільної роботи обладнання;

- система захисту: забезпечує безпеку оператора та обладнання, включаючи захисні екрани, датчики та аварійну зупинку.

Додаткове обладнання:

- система подачі захисних газів: для створення інертного середовища в зоні пайки і запобігання окисленню матеріалу;

- система візуального контролю: для спостереження за процесом пайки і контролю якості з'єднання;

- система автоматичної подачі припою: для заповнення великих зазорів або для зміни складу шва спаювання.

Вибір обладнання для лазерної пайки радіоелементів є ключовим аспектом, що безпосередньо впливає на якість з'єднань та ефективність технологічного процесу. Розглянемо основні чинники, які необхідно враховувати при виборі лазерного обладнання:

- товщина матеріалу: товщина оброблюваних матеріалів визначає необхідну потужність лазера. Для тонких матеріалів зазвичай достатньо лазерів з меншою потужністю, в той час як для товстих матеріалів потрібні потужніші установки, здатні забезпечити глибоке проплавлення. Окрім цього, вибір режиму (безперервний або імпульсний) також залежить від товщини матеріалу, оскільки це впливає на глибину та якість з'єднання;

- геометрія з'єднання: складність форми та розташування елементів, що підлягають пайці, також впливають на вибір обладнання. Лазерна система повинна бути здатна забезпечити точне фокусування променя на потрібній ділянці з'єднання, особливо в умовах обмеженого простору або при пайці мікроелементів. Гнучкість лазерної установки та можливість налаштування фокусування є критично важливими для досягнення якісних результатів;

- вимоги до якості з'єднання: рівень вимог до якості з'єднань може варіюватися в залежності від застосування радіоелементів. Високі вимоги до міцності, герметичності та електричних характеристик з'єднання потребують відповідного вибору лазерного обладнання, яке здатне забезпечити необхідний рівень точності і контролю за параметрами пайки. Це може включати системи моніторингу та управління, які забезпечують зворотній зв'язок про процес пайки;

- продуктивність обладнання, що є останнім, але не менш важливим чинником. Для підприємств, які займаються серійним виробництвом радіоелементів, важливо, щоб лазерна система могла працювати з високою

швидкістю і без зупинок, забезпечуючи при цьому стабільну якість з'єднань. Вибір обладнання повинен відповідати обсягу виробництва та специфікаціям, що дозволяє оптимізувати виробничі процеси.

Сучасні лазерні установки (рис. 1.3) для пайки відрізняються високою точністю і надійністю у використанні. Вони дозволяють виконувати пайку з високою швидкістю і забезпечують відмінну якість з'єднань.

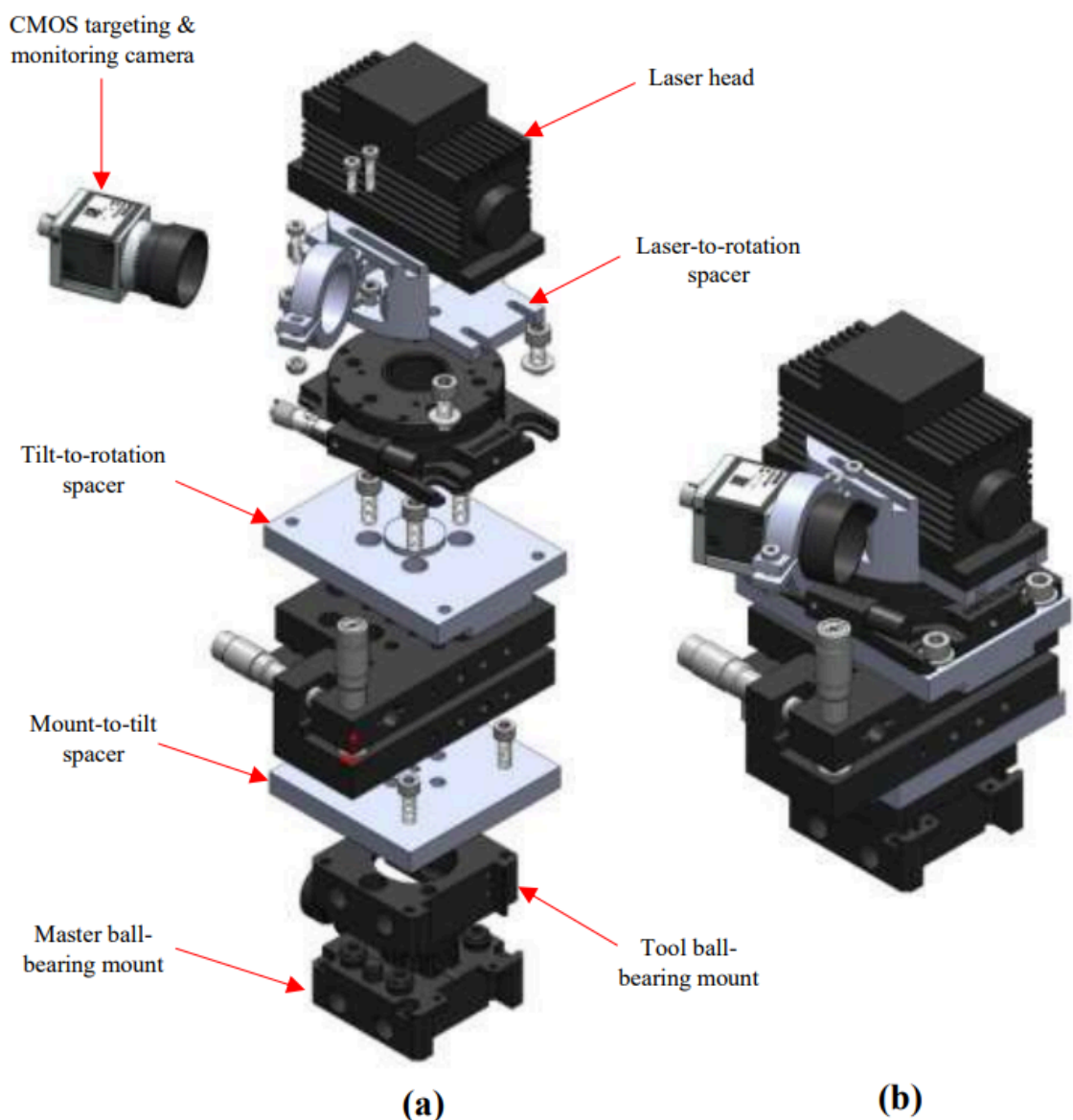


Рисунок 1.3 – Зображення лазерного паяльного інструменту в розгорнутому вигляді (a) та зображення лазерного паяльного інструменту в зборі [4]

1.4 Переваги і недоліки лазерної пайки

Лазерна пайка, незважаючи на свої очевидні переваги, має також певні обмеження. Розглянемо детальніше як позитивні, так і негативні сторони цього методу з'єднання матеріалів.

Переваги лазерної пайки:

– висока точність: однією з ключових переваг лазерної пайки є її здатність забезпечувати надзвичайно високу точність процесу, яка може досягати рівня мікронів. Це особливо важливо для мікроелектроніки та прецизійної механіки, де навіть найменші відхилення можуть негативно вплинути на функціонування пристроїв. Лазерне випромінювання дозволяє здійснювати пайку з мінімальними відхиленнями від заданих параметрів, що забезпечує високу якість з'єднань;

– мінімальна зона термічного впливу: ЛП відзначається надзвичайно локалізованим нагріванням, що зменшує термічний вплив на навколишній матеріал. Це мінімізує ризик деформації або пошкодження компонентів, особливо в тих випадках, коли пайка здійснюється на тонких або чутливих матеріалах. Така перевага дозволяє використовувати лазерну пайку в прецизійних технологіях, де збереження механічних і фізичних властивостей матеріалів є критичним;

– швидкість: процес лазерної пайки характеризується високою швидкістю виконання завдяки короткому циклу нагрівання та охолодження. Така швидкість суттєво підвищує продуктивність, що є важливим чинником в умовах серійного або масового виробництва. Швидке охолодження також зменшує час, протягом якого деталі піддаються термічному впливу, що сприяє збереженню їх властивостей [9];

– гнучкість у використанні різних матеріалів: ЛП є універсальною технологією, яка дозволяє здійснювати з'єднання різноманітних матеріалів, таких як метали, кераміка, полімери, і навіть їх комбінації. Ця технологічна гнучкість відкриває широкі можливості для застосування лазерної пайки в

різних галузях промисловості, включаючи авіабудування, автомобільну та медичну техніку [10];

– автоматизація: лазерна пайка легко інтегрується в автоматизовані виробничі лінії, що дозволяє значно підвищити ефективність виробничих процесів. Автоматизація пайки забезпечує стабільність якості, повторюваність операцій і зменшення витрат на робочу силу. Сучасні системи управління дозволяють інтегрувати лазерну пайку з іншими технологічними процесами, що робить її невід'ємною частиною індустрії 4.0;

– екологічність: ЛП є однією з найбільш екологічно чистих технологій. Вона практично не виробляє шкідливих викидів і не потребує використання великої кількості припою, що зменшує кількість відходів. Крім того, ця технологія дозволяє уникати застосування токсичних речовин, характерних для інших методів пайки, що робить її привабливою з точки зору охорони довкілля [11];

– міцні і герметичні з'єднання: лазерна пайка забезпечує високу механічну міцність та герметичність з'єднань, що є важливим для галузей, де ці параметри мають критичне значення. Наприклад, у виробництві електронних компонентів або у медичній техніці, де герметичність забезпечує захист від зовнішнього впливу та продовжує термін служби виробів;

– можливість пайки складних геометричних форм: лазерний промінь, завдяки своїй здатності до високоточного фокусування, дозволяє здійснювати пайку деталей із складною геометрією, а також у важкодоступних місцях. Це робить лазерну пайку ідеальним рішенням для з'єднання мініатюрних або складно структурованих компонентів, що потребують високої точності.

Недоліки лазерної пайки:

– висока вартість обладнання є одним із основних бар'єрів для впровадження лазерної пайки, особливо для малих і середніх підприємств, є висока вартість лазерних установок. Сучасне лазерне обладнання включає в себе складні компоненти, такі як джерела лазерного випромінювання, системи охолодження, а також точні оптичні елементи, що значно підвищує

його собівартість. Крім того, вартість обслуговування і регулярної калібровки такого обладнання також може бути значною. Для підприємств, які працюють на ринках з низькими маржинальними прибутками, інвестиції в лазерні системи можуть бути економічно не виправданими [12];

– висока кваліфікація персоналу: використання лазерної технології вимагає високого рівня технічних знань і досвіду. Оператори повинні володіти навичками налаштування та управління лазерними системами, знати принципи роботи обладнання, розуміти параметри впливу лазера на різні матеріали, а також вміти правильно налаштовувати режими пайки в залежності від специфіки завдання. Навчання та сертифікація персоналу можуть бути затратними та часоємними процесами, що також підвищує загальну вартість впровадження лазерної пайки на підприємстві;

– обмеження за товщиною матеріалу: лазерна пайка є ефективною при роботі з тонкими матеріалами, однак зі збільшенням товщини матеріалу зростають і вимоги до потужності лазера. Для пайки товстих металів або інших матеріалів потрібно використовувати лазери високої потужності, що в свою чергу значно збільшує вартість обладнання та енерговитратність процесу. Крім того, для дуже товстих матеріалів можуть виникнути технічні труднощі в забезпеченні рівномірного прогрівання всього об'єму з'єднання, що може вплинути на якість шва;

– вплив відбиваючих поверхонь: відбивання лазерного випромінювання від поверхні матеріалу може призвести до нерівномірного розподілу тепла, що негативно впливає на якість з'єднання. Матеріали з високою відбивною здатністю, такі як мідь, золото або срібло, можуть створювати додаткові труднощі при пайці через здатність лазера відбиватися від їх поверхні. Це може призвести до недостатнього нагріву зони з'єднання або пошкодження оптичних елементів лазерної системи, що підвищує ризик несправності обладнання;

– необхідність захисту очей: лазерне випромінювання, яке використовується для пайки, може бути небезпечним для людського зору.

Навіть короточасний вплив лазера на очі може призвести до серйозних травм, таких як опіки сітківки або сліпота. Тому робота з лазерними системами вимагає обов'язкового використання спеціальних захисних окулярів або шоломів, які здатні блокувати шкідливе випромінювання. Додаткові заходи безпеки, такі як встановлення захисних екранів і відповідного маркування зон роботи з лазером, також є необхідними, що ускладнює організацію робочого місця і збільшує витрати на його облаштування.

Лазерна пайка є потужним інструментом для з'єднання матеріалів, але її застосування має бути обґрунтоване з урахуванням конкретних умов виробництва. Вибір лазерної пайки як основного методу з'єднання залежить від багатьох факторів, таких як тип матеріалів, точність, швидкість, вартість і інші.

1.5 Сучасні тенденції в технології лазерної пайки

Технологія лазерної пайки постійно розвивається, відкриваючи нові можливості та розширюючи сфери її застосування. Розглянемо основні сучасні тенденції в цій галузі [13]:

– мініатюризація: зростаючий попит на мініатюрні електронні пристрої, такі як смарт-гаджети, медичні сенсори та мікрочіпи, стимулює розвиток лазерних систем, здатних здійснювати високоточну пайку електронних елементів. Мініатюризація стає критичним фактором у таких галузях, як мікроелектроніка та медична техніка, де зменшення розмірів компонентів є основою для подальших технологічних інновацій;

– інтеграція з іншими технологіями: ЛП все частіше поєднується з передовими технологіями, такими як 3D-друк, адитивне виробництво та роботизація. Така інтеграція дозволяє створювати складні багатофункціональні вироби, що поєднують в собі властивості різних матеріалів і методів виробництва. Поєднання технологій також сприяє

підвищенню точності і продуктивності процесу, забезпечуючи можливість пайки складних конструкцій та деталей;

– нові матеріали: впровадження інноваційних матеріалів, таких як композити, полімери, кераміка та інші передові матеріали, вимагає розробки нових методів лазерної пайки. Високі вимоги до міцності, хімічної стійкості та термічної стабільності цих матеріалів ставлять нові виклики перед розробниками лазерних технологій. Відповідно, з'являються нові способи управління лазерними параметрами для адаптації до цих матеріалів;

– інтелектуальні системи керування: застосування штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання стає одним із ключових напрямків розвитку сучасних технологій пайки. Інтелектуальні системи керування дозволяють автоматично оптимізувати параметри процесу пайки в реальному часі, що зменшує кількість помилок і підвищує продуктивність. Такі системи здатні навчатися на базі великих обсягів даних, що дозволяє передбачати можливі дефекти та запобігати їх виникненню ще до початку процесу;

– моніторинг процесу в реальному часі: для забезпечення стабільної якості з'єднань все частіше використовуються сенсори та системи зображення, що дозволяють здійснювати постійний контроль процесу пайки. Дані, отримані з таких сенсорів, можуть використовуватися для миттєвого коригування параметрів, зменшення кількості дефектів та забезпечення однакової якості з'єднань на різних етапах виробництва;

– екологічність: у контексті глобальних екологічних вимог розробка лазерних технологій, що мінімізують негативний вплив на довкілля, набирає популярності. Використання лазерної пайки дозволяє зменшити кількість шкідливих викидів і токсичних матеріалів, які використовуються при традиційних методах пайки. Це робить процес екологічно чистішим і більш відповідним до сучасних стандартів сталого розвитку;

– збільшення швидкості: пошук нових способів підвищення швидкості процесу пайки є важливим для збільшення загальної продуктивності виробництва. Завдяки вдосконаленню лазерних установок і автоматизації

процесу вдалося значно прискорити час пайки, що, в свою чергу, дозволяє виробляти більшу кількість продукції за коротший проміжок часу;

– зменшення вартості: одним із пріоритетних напрямків розвитку є зменшення вартості лазерних систем і їхньої експлуатації. Розробка доступніших та економічно ефективних лазерних установок дозволить розширити застосування технології в різних галузях промисловості, включаючи малий і середній бізнес.

Перспективні напрямки розвитку [13]:

– лазерна техніка надкоротких імпульсів: одним із ключових напрямків розвитку є впровадження фемтосекундних лазерів, що дозволяють виконувати надзвичайно точну пайку тонких матеріалів і мікроструктур. Фемтосекундні лазери генерують імпульси тривалістю в декілька фемтосекунд (1 фемтосекунда = 10^{-15} секунди), що дозволяє зводити термічний вплив на матеріал практично до нуля. Це відкриває нові можливості для роботи з надтонкими плівками, наноматеріалами та мікроелектронікою, де потрібна мінімальна деформація та надзвичайна точність. Такі лазери можуть бути використані для створення надмалих і складних структур, наприклад, в оптоелектроніці або біомедичних приладах;

– адитивне виробництво: комбінація технологій лазерної пайки та 3D-друку стає перспективним напрямком для створення деталей зі складною геометрією та спеціалізованими властивостями. Адитивне виробництво дозволяє поступово додавати матеріал, а інтеграція лазерної пайки забезпечує високоякісне з'єднання різних шарів або компонентів. Це особливо корисно для виготовлення металевих або гібридних деталей, що мають високі вимоги до міцності, термостійкості або електропровідності. Такий підхід дозволяє розширити межі можливостей сучасного виробництва, зокрема у галузях авіації, автомобілебудування та медицини;

– розвиток програмного забезпечення: важливою складовою майбутнього розвитку лазерної пайки є створення нових програмних рішень, які забезпечують ефективне управління лазерними системами. Інтуїтивно

зрозуміле програмне забезпечення дозволить не лише полегшити управління складними лазерними установками, але й оптимізувати процес пайки. Моделювання теплових процесів, прогнозування поведінки матеріалів під впливом лазера та автоматичне налаштування параметрів допоможуть зменшити час підготовки та збільшити якість кінцевих виробів. Такі програми також можуть інтегрувати штучний інтелект для автоматизованого аналізу і корекції процесу в реальному часі, що значно підвищить ефективність і надійність технології лазерної пайки.

Лазерна пайка продовжує розвиватися і займати все більш важливе місце в сучасній промисловості. Нові технології і матеріали відкривають широкі перспективи для застосування лазерної пайки в різних галузях, від електроніки до медицини.

1.6 Висновки до першого розділу

В даному розділі був проведений аналіз предметної області роботи. Були розглянуті принципи ЛП, а саме: контроль нагрівання (прямий і непрямий), можливість локалізації нагрівання, безконтактність, висока повторюваність і автоматизації. Було проаналізовано технічні засоби автоматизації, що можуть використовуватись при автоматизації лазерної пайки, а саме: лазерне джерело, системи фокусування, позиціонування, захисту, візуального контролю. Далі, були проаналізовані та наведені переваги ЛП: точність, гнучкість, швидкість, локалізація плями нагрівання. А також деякі недоліки: вплив відбиваючих поверхонь, висока кваліфікація персоналу та високі вимоги задля зменшення ризиків, що несе з собою лазерне випромінювання. Розглянуті перспективи лазерної пайки: покращення програмного забезпечення, фемтосекундні лазери та адитивне виробництво.

2 РОЗРОБКА МАКЕТУ СИСТЕМИ ЛАЗЕРНОЇ ПАЙКИ

2.1 Розробка структурної схеми макету

Структурна схема є важливою частиною проектування, оскільки вона надає загальний огляд роботи системи та її компонентів. Вона визначає, як різні частини системи взаємодіють між собою, дозволяючи зрозуміти логіку функціонування всієї конструкції. У нашому випадку схема надає загальне уявлення про управління рухом по осях, активацію робочого інструменту та моніторинг процесів пайки. Важливо підкреслити, що така схема забезпечує основу для побудови й тестування прототипу системи лазерної пайки, що дозволяє перевірити правильність налаштувань та функціональність усіх компонентів у практичному застосуванні. Структурна схема (рис. 2.1) допомагає систематизувати процес проектування, що є важливим кроком перед розробкою детальної документації та монтажу реального прототипу.

Важливо, що кожна підсистема повинна виконувати чітко визначену функцію для забезпечення стабільної роботи системи в цілому. Центральним елементом управління макетом на фізичному рівні є мікроконтролер (МК), який обробляє вхідні сигнали від сенсорів та користувача, а також контролює активацію робочого режиму інструмента.

Основним елементом системи є плата Arduino Pro Mini. Вона є центральним контролером, що приймає вхідні сигнали від різних сенсорів (включаючи кінцеві вимикачі) і відправляє керувальні сигнали до моторів та робочого інструменту, який у даному випадку є лазерною голівкою.

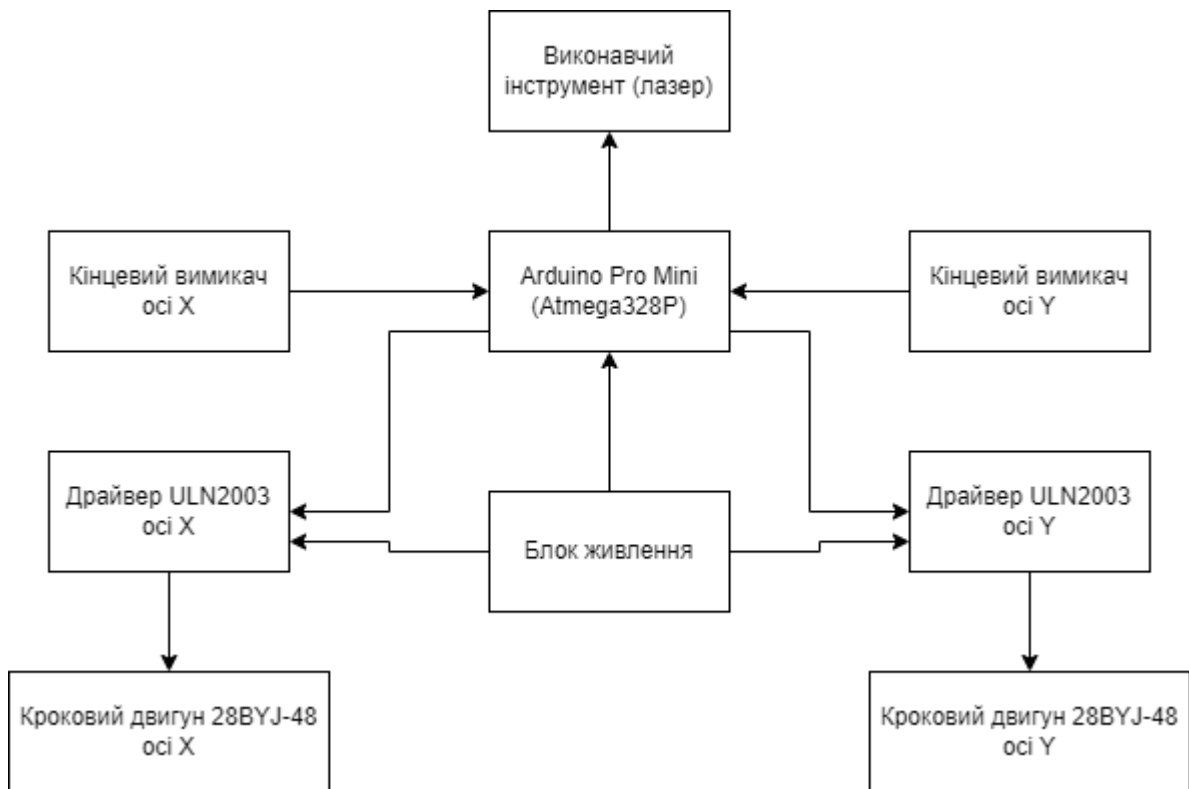


Рисунок 2.1 – Структурна схема макету системи лазерної пайки

З плати Arduino йде три основні гілки, кожна з яких відповідає за управління різними частинами системи макету, що імітує процес лазерної пайки.

Гілка осі X. Ця гілка відповідає за керування рухом плоттера в горизонтальній площині, забезпечуючи точне позиціонування інструменту на осі X. У її складі знаходиться кроковий двигун, який є основним елементом, що рухає платформу або каретку, що утримує робочий інструмент (в даному випадку лазерну головку). Мотор підключений до драйвер, який забезпечує необхідну потужність для роботи мотора, гарантуючи плавний та точний рух. Цей мотор має можливість обертатися в обидва боки, що дозволяє переміщати платформу по осі X в обидва напрямки.

Для безпечної роботи і запобігання перевищення меж робочого простору, гілка осі X включає в себе кінцевий вимикач на осі X. Цей компонент забезпечує сигнал до плати Arduino про досягнення нульової точки переміщення. Кінцевий вимикач, при спрацьовуванні, надсилає сигнал

до контролера, що призводить до зупинки мотора, запобігаючи можливому пошкодженню механізму. Завдяки цьому вдається контролювати точне позиціонування плоттера, а також уникати механічних пошкоджень від надмірних рухів.

Гілка осі Y відповідає за вертикальний рух плоттера, тобто переміщення по осі Y. Як і в попередньому випадку, використовується зв'язка драйвер - кроковий двигун, що дозволяє здійснювати точні рухи по вертикалі. Цей мотор керує переміщенням платформи, на якій розміщена лазерна головка, ввєрх або вниз в межах встановлених меж. Драйвер дозволяє моторам працювати в режимах крокового руху, що гарантує точність та контроль над переміщеннями.

Як і в разі осі X, для забезпечення безпеки гілка осі Y має кінцевий вимикач на осі Y. Цей компонент фіксує досягнення нульової точки руху по вертикалі. Коли кінцевий вимикач спрацьовує, він надсилає сигнал на плату Arduino, що призводить до зупинки руху мотора, запобігаючи пошкодженню системи та забезпечуючи точність переміщення плоттера в межах заданого простору.

Так як кінцеві вимикачі використовуються для знаходження нульової точки (початкового положення) на кожній осі, важливо врахувати, що вони не здатні контролювати крайні положення руху після того, як система перейде в робочий режим. У зв'язку з цим, крайні положення осей повинні контролюватися програмним забезпеченням. Коли платформа досягає кінцевої межі руху, програмне забезпечення повинно здійснювати моніторинг стану руху і коригувати поведінку системи, щоб запобігти перевищенню робочого простору. Це включає в себе програмну перевірку поточного положення платформ і порівняння з заданими межами. Якщо система наближається до крайньої точки, програма повинна зупинити або змінити напрямок руху, забезпечуючи точне позиціонування та безпеку всього механізму. Таким чином, кінцеві вимикачі виступають лише як механізм для знаходження початкової точки, а для точного контролю за робочими межами

необхідно налаштувати програмне управління для ефективної роботи системи в реальному часі.

Гілка керування робочим інструментом (лазерною головкою або її імітацією у випадку макета). Ця гілка керує робочим інструментом – лазерною головкою, що використовуватиметься для пайки. Основна функція цієї гілки полягає в активації та деактивації лазерного модуля. Лазерна головка підключається до плати контролера через транзистор або реле, що дозволяє контролювати вмикання та вимикання лазера в залежності від вимог процесу пайки. При цьому Arduino отримує команди від інших частин системи та на основі цих команд здійснює контроль над лазером, визначаючи, коли і на скільки часу його активувати.

Для цього може бути використано просте реле, що підключається до цифрового виходу і дозволяє вмикати чи вимикати живлення лазерної головки. Крім того, для більш складних задач можна використовувати датчики інтенсивності лазера, що дозволяють регулювати потужність лазерного променя в залежності від потреби, наприклад, змінюючи інтенсивність залежно від товщини або матеріалу паяльної точки. Проте на початкових етапах система може бути зосереджена лише на базовому керуванні включенням та вимиканням лазера без складних функцій зворотного зв'язку.

Таким чином, усі три гілки (керування рухом по осях X та Y, а також керування лазерною головкою) зібрані в одну інтегровану систему, де плата Arduino виступає центральним елементом управління. Вона обробляє вхідні сигнали від кінцевих вимикачів, приймає дані про позицію плоттера, обчислює необхідні рухи та посиляє керуючі сигнали до моторів і лазерної головки, забезпечуючи точність і безпеку роботи системи лазерної пайки.

2.2 Підбір апаратних та програмних засобів для макету системи

Для створення макету системи лазерної пайки, спираючись на структурну схему із рис. 2.1, необхідно вибрати відповідні апаратні компоненти, які забезпечать належну роботу всіх підсистем. Вибір компонентів залежить від конкретних вимог до точності, стабільності та безпеки роботи системи.

Контролер Arduino Pro Mini (рис. 2.2) був обраний через його компактні розміри та здатність працювати з невеликою кількістю виводів, що ідеально підходить для нашої системи. В основі Arduino Pro Mini знаходиться МК Atmega328P, який є ефективним і надійним варіантом для таких проектів. Цей МК підтримує роботу з низьким енергоспоживанням, має достатньо оперативної пам'яті (2 KB SRAM) і флеш-пам'яті (32 KB), що дозволяє реалізувати необхідне програмне забезпечення для керування моторами та інструментом. Arduino Pro Mini також має необхідні інтерфейси для підключення датчиків, драйверів мотора та інших периферійних пристроїв.

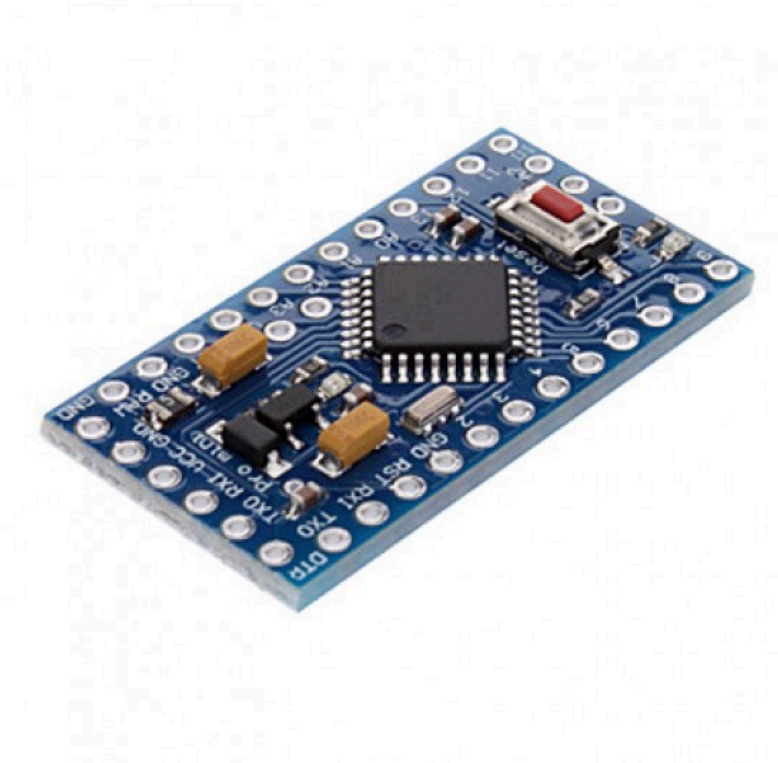


Рисунок 2.2 – Плата Arduino Pro Mini із МК Atmega328P [14]

Для керування рухом по осях було обрано кроковий двигун 28BYJ-48, що зображений на рис. 2.3, який є одним із найбільш доступних і популярних варіантів для подібних систем завдяки своїй компактності та достатній точності для виконання основних завдань. Цей двигун має 5 проводів, що дозволяють здійснювати точний кроковий рух, а також працює при низьких напругах, що робить його сумісним з контролером Arduino Pro Mini. Однією з переваг цього двигуна є його низька вартість та доступність, що робить його чудовим вибором для прототипування і маловартісних систем. Водночас, для більш точних або високошвидкісних рухів можна розглянути альтернативи, такі як NEMA 17 або NEMA 23, які забезпечують вищу потужність і крутний момент, але потребують більш складних драйверів та вищих вимог до живлення.

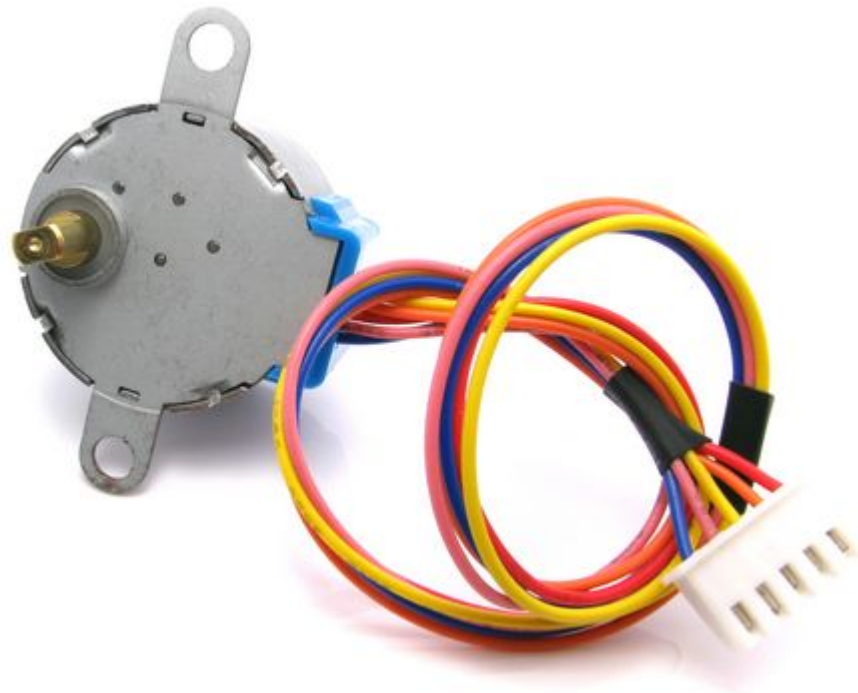


Рисунок 2.3 – Уніполярний кроковий двигун 28BYJ-48 (5В версія) [15]

Для управління кроковим двигуном використовуємо драйвер ULN2003, який є стандартним рішенням для таких моторів. Цей драйвер дозволяє керувати напрямком і швидкістю обертання мотора, знижуючи навантаження на виводи Arduino і забезпечуючи стабільну роботу всієї системи. Драйвер

ULN2003 здатний підтримувати достатні струми, згідно до поставленої задачі, що дозволяє забезпечити необхідний крутний момент для двигуна, особливо при великих навантаженнях або при потребі в більш точному позиціонуванні. Як альтернатива, можна використовувати A4988 або DRV8825, які є більш потужними драйверами для крокових двигунів, що дозволяють працювати з вищими струмами і більш точно контролювати рухи, зокрема для складніших задач або для високошвидкісних систем. Обраний драйвер та можливі альтернативи зображені на рис. 2.4.

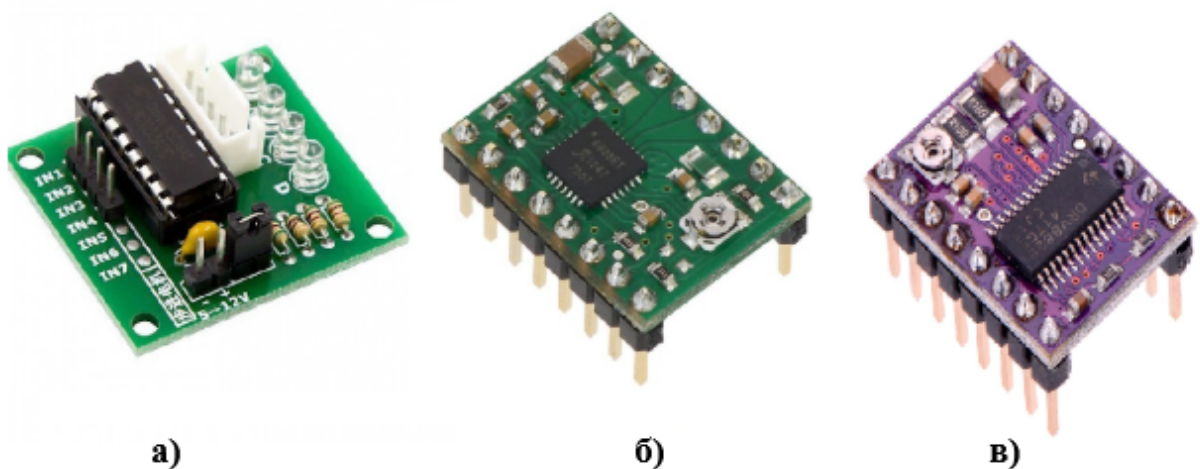


Рисунок 2.4 – Плати драйверів кроковим двигуном

а) ULN2003 [16]; б) A4988 [17]; в) DRV8825 [17]

Для точного визначення нульової точки на кожній осі обрано механічні мікроперемикачі як кінцеві вимикачі. Мікроперемикачі відомі своєю високою надійністю та простотою в експлуатації, а також здатні працювати з малими струмами та напругами, що відповідає вимогам цього проекту. Вони чітко сигналізують про досягнення крайніх точок руху осей X і Y, надсилаючи сигнал до Arduino, що дозволяє зупинити рух і запобігти пошкодженню механізму. Однак, як альтернативу, можна використовувати оптичні датчики або індуктивні сенсори, які забезпечують безконтактне виявлення кінцевих точок. Ці варіанти можуть бути більш стійкими до зносу і мають потенціал для кращої точності, але вони потребують додаткових налаштувань та можуть

бути дорожчими в реалізації. Обраний кінцевий мікроперемикач зображений на рис. 2.5.

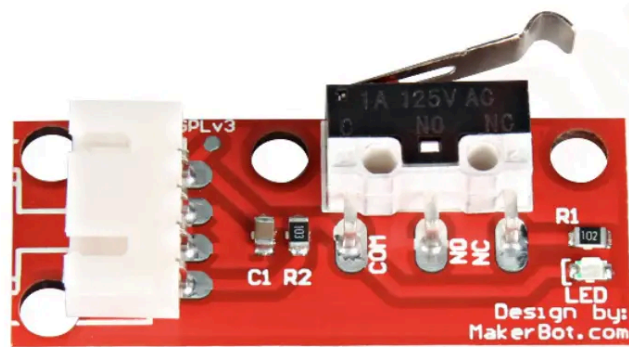


Рисунок 2.5 – Плата механічного кінцевого вимикача [18]

Для програмного забезпечення системи лазерної пайки було обрано GRBL [19], популярне програмне забезпечення з відкритим кодом, яке спеціально розроблене для керування системами з кроковими двигунами, такими як наш макет. GRBL є однією з найбільш використовуваних прошивок для малих CNC-систем завдяки своїй гнучкості, простоті налаштування і широкій підтримці. Вона ідеально підходить для застосувань, де необхідно забезпечити точне керування рухом осей, а також для інтеграції з різними типами робочих інструментів, таких як лазери. Оскільки GRBL розроблений для роботи з Arduino, це робить прошивку доступною і зручною для багатьох користувачів, особливо у проектах на базі Arduino, як наш.

Однією з основних переваг GRBL є його здатність керувати до трьох осями одночасно, що є оптимальним для даної конфігурації макету, який включає дві рухомі осі (X і Y), а також керування робочим інструментом (лазером). Підтримка трьох осей дозволяє здійснювати точне позиціонування лазерної головки в просторі, що є критично важливим для забезпечення високої точності пайки. Крім того, програмне забезпечення забезпечує контроль не тільки за рухами, але й за роботою самого інструменту, що дозволяє ефективно управляти процесом пайки [19].

Однією з головних переваг GRBL є його простота налаштування та ефективність. Встановлення і налаштування прошивки займає мінімум часу і не потребує складних операцій. Крім того, GRBL підтримує стандартний набір команд G-code, який є загальноприйнятим у світі CNC. Це дає змогу користувачам без проблем програмувати рухи, визначати точні траєкторії для осей, а також управляти такими параметрами, як швидкість руху, точність зупинок, включення та вимкнення робочого інструмента. G-code дозволяє задати чіткі інструкції для точного виконання всіх операцій, що є важливим для досягнення високої якості пайки.

GRBL також має вбудовані функції, які дозволяють контролювати швидкість руху і налаштовувати систему для виконання різних завдань. Це робить прошивку гнучкою і адаптивною до різних операцій. Наприклад, для лазерної пайки можна налаштувати швидкість переміщення головки в залежності від типу матеріалу чи вимог до якості з'єднання. Крім того, система дозволяє застосовувати спеціальні команди для управління інструментом, що дає змогу включати або вимикати лазер в залежності від конкретних етапів технологічного процесу.

- підтримка G-коду для опису рухів та команд управління;
- підтримка кількох осей (до 3-х, що відповідає нашим вимогам);
- вбудовані функції безпеки, що дозволяють зупинити систему в разі досягнення меж руху або при помилках;
- оптимізація для роботи з малими системами на базі Arduino, що дає можливість використовувати недорогі і доступні компоненти без втрати точності;
- легкість налаштування і кастомізації, що дозволяє адаптувати прошивку під конкретні задачі проекту.

Вибір GRBL як програмного забезпечення для керування був зроблений через його перевірену ефективність у подібних проектах, доступність документації та простоту інтеграції з обраними апаратними компонентами. Це програмне забезпечення дозволяє зосередитись на розробці технічного

процесу пайки, не витрачаючи час на розробку власної прошивки для контролю двигунів та інструменту [19].

Окрім вибору GRBL для керування системою лазерної пайки, для відладки та тестування макету буде використовуватися UGS (Universal G-Code Sender) [20]. UGS є потужним і зручним програмним забезпеченням з відкритим кодом, яке дозволяє користувачам надсилати G-коди безпосередньо на контролер через USB-з'єднання. Це програмне забезпечення є популярним у середовищі користувачів, які працюють з GRBL та іншими CNC-системами, завдяки своїй простоті, широким можливостям і підтримці різних операційних систем.

UGS дозволяє зручно керувати рухом системи в реальному часі, а також має функції для завантаження та виконання G-кодів, які були створені для конкретних операцій, таких як рух осей, включення і вимкнення лазерного інструмента, зміна швидкості руху тощо. З його допомогою можна легко тестувати механізми, перевіряти точність позиціонування осей і коригувати налаштування, що є важливим для налаштування лазерної пайки. Основними перевагами UGS є:

- підтримка реального часу: дозволяє моніторити і коригувати виконання G-кодів під час тестування макету;
- інтерфейс користувача: зручний і інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що дозволяє швидко налаштувати параметри і контролювати рухи;
- завантаження і виконання G-кодів: можливість безпосередньо передавати G-коди до GRBL через USB і запускати їх на виконання;
- можливість відлагодження та налаштування: UGS надає всі необхідні інструменти для перевірки правильності роботи осей та інструментів, а також для налаштування параметрів руху і точності.

Завдяки використанню UGS можна ефективно здійснювати тестування та відлагодження макету, що є важливим етапом для забезпечення належної роботи системи. UGS дозволяє перевіряти кілька ключових аспектів, зокрема, коректність роботи кінцевих вимикачів для пошуку нульової точки. За

допомогою цієї програми можна точно налаштувати кінцеві вимикачі, що використовуються для визначення нульової точки координатної системи, що є критично важливим для правильного старту і точності всіх подальших рухів системи.

UGS також дає змогу перевірити ефективність управління лазером, зокрема, його ввімкнення та вимкнення в потрібний час. Це важливо для того, щоб лазер працював точно в межах необхідних контурів і з потрібною інтенсивністю. Завдяки цьому забезпечується висока точність і стабільність роботи системи, оскільки потенційні проблеми можна виявити на ранніх етапах розвитку і оперативно усунути. Крім того, UGS дозволяє зберігати налаштування та конфігурації, що значно спрощує подальшу експлуатацію макету. У разі потреби користувач може швидко відновити попередні параметри або налаштування, що робить систему гнучкою та зручною для використання в умовах реальних тестів.

2.3 Розробка 3D-моделі макету

Основою 3D-моделі є L-подібна платформа, яка забезпечує компактність і функціональність всієї системи. Така конструкція дозволяє одночасно працювати з двома осями (X і Y) та забезпечує необхідний простір для монтажу компонентів, таких як двигуни, зубчасті рейки, кінцеві вимикачі, і електроніка. Платформа виконана таким чином, щоб її було легко друкувати на 3D-принтері, забезпечуючи мінімальну кількість підтримок і максимальну точність. Враховано оптимізацію для зменшення ваги, що особливо важливо при переносному застосуванні макету. Усі основні елементи спроектовані з урахуванням кріплення за допомогою стандартних гвинтів і болтів. 3D-модель і вигляді вибух-схеми зображена на рис. 2.6.

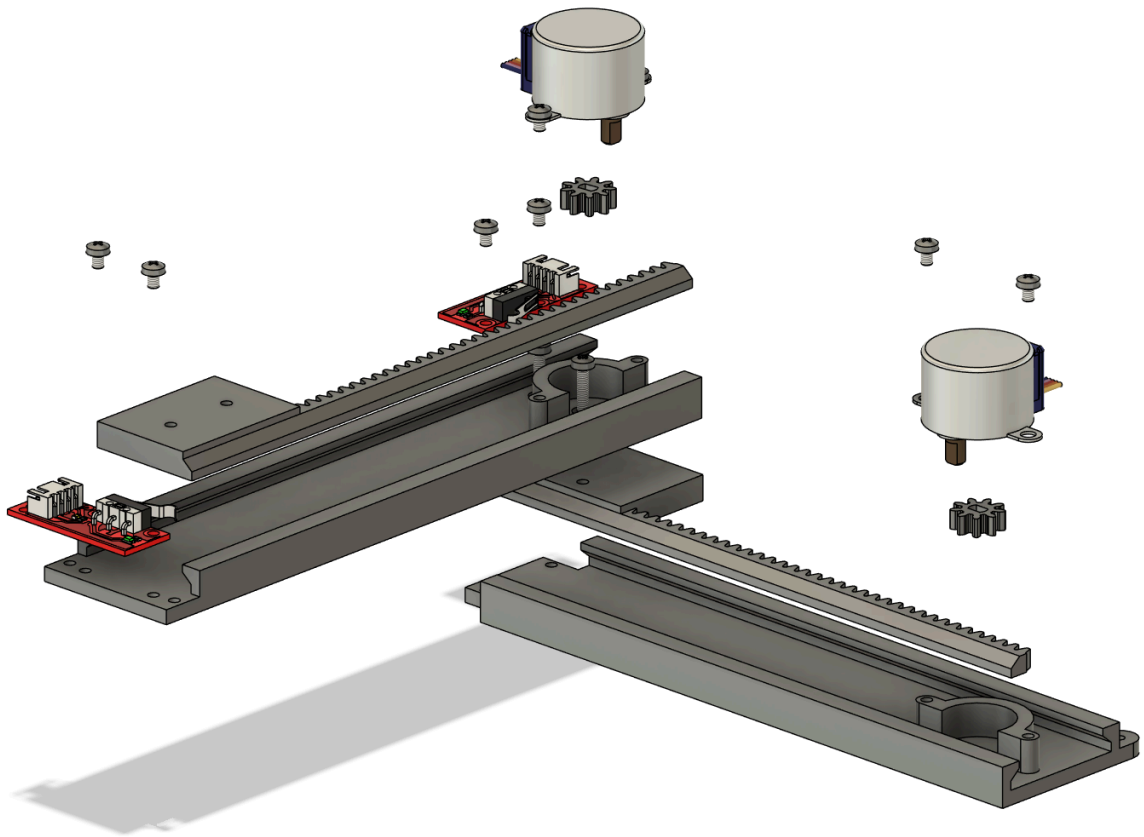


Рисунок 2.6 – Вибух-схема 3D-моделі макету

Крокові двигуни 28BYJ-48 інтегруються в конструкцію макету за допомогою спеціально спроектованих круглих посадочних місць. Ці місця точно відповідають формі і розмірам корпусу двигуна, забезпечуючи щільне прилягання без будь-яких люфтів, що є критично важливим для стабільної роботи. Конструкція посадочних місць також передбачає кріпильні отвори, які дозволяють зафіксувати двигуни гвинтами. Такий підхід забезпечує надійну фіксацію навіть за умов вібрацій, що можуть виникати під час роботи, наприклад, через швидкі зміни напрямку руху чи нерівномірний розподіл навантаження.

Кроковий двигун 28BYJ-48 є ідеальним вибором для цієї системи завдяки його характеристикам. Він має робочу напругу 5 В, що дозволяє йому безпосередньо живитися від Arduino або простих джерел живлення. Цей двигун є уніполярним і має 4 фази, що забезпечують плавний і точний рух із високою роздільною здатністю. Кроковий двигун оснащений редуктором із

передаточним співвідношенням 1:64, що дозволяє отримати дуже малий кут кроку – приблизно 0.088° на крок, завдяки чому можна досягти точності, необхідної для позиціонування в макеті. Максимальний крутний момент двигуна становить близько 34 мН·м, що достатньо для переміщення рейки та робочих елементів макета.

Для забезпечення точного і стабільного переміщення по осях X і Y у конструкцію включено зубчасті рейки, інтегровані з напрямними. Зубчасті рейки виготовлені з розрахунком на оптимальне зчеплення з шестернями двигунів, що мінімізує ризик пропуску кроків. Рейки розташовані в спеціальних пазах, які утримують їх на місці та зменшують можливість зсуву під час роботи. Напрямні забезпечують плавний рух каретки, знижуючи тертя і підвищуючи довговічність конструкції. Важливо зазначити, що геометрія напрямних дозволяє уникнути заїдань навіть при незначних похибках складання.

У конструкції макету використовується циліндрична шестерня, яка відіграє ключову роль у забезпеченні передачі руху між кроковим двигуном і зубчастою рейкою. Шестерня має модуль 1.25, що визначає розмір зубців і забезпечує сумісність із зубчастою рейкою. Завдяки кількості зубців – 9, її діаметр становить 12 мм, що дозволяє досягти компактності конструкції і необхідного передаточного співвідношення.

Матеріал шестерні – PETG-пластик, обраний через його хорошу механічну міцність, стійкість до тертя і здатність витримувати помірні навантаження, характерні для макетів. Товщина шестерні становить 5 мм, що є достатнім для забезпечення її жорсткості і довговічності в умовах експлуатації. Посадка на вал здійснюється за допомогою отвору, виконаного з точністю, яка забезпечує надійне з'єднання і запобігає прокручуванню під час роботи.

Для лінійного переміщення макету використовується зубчаста рейка, яка працює у парі з циліндричною шестернею. Довжина рейки становить 150 мм, що визначає робочий хід макету по осі. Рейка виготовлена з

PETG-пластику, який має достатню механічну міцність, легкість обробки і низьку вартість, що ідеально підходить для прототипів і навчальних макетів.

Зубчаста рейка має профіль, сумісний із модулем шестерні 1.25, що забезпечує плавну і точну передачу руху. Її метод монтажу реалізований через пази, які забезпечують простоту встановлення і надійну фіксацію рейки на каркасі конструкції. Такий підхід полегшує заміну чи налаштування рейки, якщо це буде потрібно.

Застосування PETG-пластику як матеріалу для шестерні та рейки сприяє створенню економічно вигідної та екологічно безпечної системи, яка відповідає вимогам макетування і дозволяє досягти точного управління рухом осей.

На кожній осі передбачено місця для монтажу механічних кінцевих вимикачів. Вимикачі встановлюються таким чином, щоб їх було легко налаштувати на потрібну точку зупинки. Вони служать для визначення нульових позицій осей і зупинки руху при досягненні крайнього положення. Це дозволяє уникнути механічних пошкоджень і захищає систему від перевантаження. Конструкція передбачає легкий доступ до вимикачів для їх перевірки та заміни в разі потреби.

У правій частині конструкції передбачено спеціальну область для встановлення адаптера інструменту, який є важливим елементом системи. Адаптер виконує роль з'єднувального вузла між механічними і електронними частинами системи. Його конструкція розроблена так, щоб дозволити надійне кріплення лазерного інструмента, забезпечуючи його стійкість і точне позиціонування.

Розміщення адаптера передбачає легкий доступ для заміни або налаштування інструмента. Універсальність конструкції дозволяє використовувати різні типи інструментів, таких як лазерні модулі, маркери або інші пристрої для моделювання технологічного процесу. Крім того, конструкція адаптера мінімізує вібрації під час роботи, що важливо для збереження точності процесу.

Для стабільної роботи макету на робочій поверхні конструкція оснащена отворами для монтажних гвинтів у кутах. Ці кріплення забезпечують жорстке з'єднання з робочим столом, що знижує вібрації і дозволяє досягти високої точності роботи. Розташування кріплень забезпечує рівномірний розподіл навантаження, запобігаючи деформації конструкції. Крім того, така система кріплення полегшує демонтаж і транспортування макету в разі необхідності.

Для фіксації крокових двигунів 28BYJ-48 у посадочних місцях конструкції макету необхідно використовувати гвинти стандарту DIN 7985 M3. Ці гвинти мають циліндричну головку з хрестовим шліцом, що дозволяє зручно закручувати їх за допомогою стандартного викруткового інструменту.

Розмір різьби M3 є оптимальним для надійного кріплення двигуна, оскільки забезпечує достатню міцність і стійкість до вібрацій без зайвого ускладнення конструкції. Стандарт DIN 7985 гарантує, що гвинти мають точні розміри та якість обробки, що забезпечує належну сумісність із кріпильними отворами в корпусі двигуна та посадочних місцях.

Довжину гвинтів потрібно підбирати таким чином, щоб вони проходили крізь корпус двигуна та кріпильний елемент макету, але не перевищували необхідної довжини, щоб уникнути механічних перешкод або пошкодження інших частин конструкції. В цьому макеті було використано довжини 12 мм для кріплення основи осі Y до каретки осі X та 8 мм для кріплення моторів та кінцевих вимикачів.

2.4 Адаптація програмного забезпечення для макету

Для забезпечення коректної роботи макету системи лазерної пайки необхідно адаптувати готове програмне забезпечення до специфіки обраних апаратних компонентів.

Так як у пункті 2.2 у ролі керуючої програми для макету було вирішено використовувати прошивку GRBL, яка за замовчуванням створена для

драйверів типу A4988 або подібних, що для свого керування використовують 2 лінії - STEP і DIR. Сигнал STEP використовується для вказівки драйверу, що потрібно зробити один крок. Кожен фронт сигналу STEP викликає зміну положення двигуна на один мікрокрок або повний крок, залежно від режиму мікрокрокування, встановленого на драйвері. Частота цього сигналу визначає швидкість обертання двигуна: чим вища частота імпульсів, тим швидше рухається вал двигуна. Сигнал DIR визначає напрямок обертання двигуна. Це цифровий сигнал, який може бути або логічним "0" (низький рівень), або логічним "1" (високий рівень). Зміна стану DIR змінює напрямок обертання двигуна (наприклад, за годинниковою стрілкою чи проти).

Оскільки у макеті застосовуються крокові двигуни 28BYJ-48 з драйверами ULN2003, виникає необхідність у зміні певних параметрів прошивки для відповідності характеристикам обладнання. Для адаптації ULN2003 були змінені функції виводів, що використовуються у GRBL, так як мікросхема ULN2003 це драйвер з відкритим колектором, який містить 7 дарлінгтонівських транзисторних пар. Кожен канал може комутувати навантаження до 500 мА з напругою до 50 В, що ідеально підходить для керування обмотками крокового двигуна.

У процесі налаштування керування 28BYJ-48 через драйвери ULN2003, так як кожен драйвер займає 4 цифрові піни мікроконтролера, а не 2, як закладалося в GRBL спочатку. Це пов'язано з тим, що для активації кожної з чотирьох обмоток двигуна необхідно окремо подавати сигнали на відповідні канали ULN2003. Така конфігурація забезпечує точне управління фазами двигуна і дозволяє працювати в різних режимах (повнокроковому або напівкроковому).

Через збільшення кількості задіяних пінів виникла необхідність перемістити підключення кінцевих вимикачів осей X та Y. Їхні сигнали, що спочатку були підключені до PB1 (Arduino Uno D9) та PB2 (Arduino Uno D10), були перенесені на PB4 (Arduino Uno D12) та PB5 (Arduino Uno D13)

відповідно. Така зміна забезпечила сумісність усіх компонентів у системі та дозволила уникнути конфліктів у використанні пінів.

Параметр \$32 у GRBL визначає режим роботи системи при використанні лазера або фрезера. Зміна цього параметра зі значення 0 (режим фрезера) на 1 (режим лазера) адаптує систему для роботи з лазерними пристроями [21].

У режимі лазера ($\$32 = 1$) система змінює принцип управління сигналом ШІМ (PWM), який використовується для регулювання потужності лазера. Головна особливість цього режиму – відключення затримок у командах зупинки шпинделя. Це дозволяє лазеру миттєво реагувати на зміни команд, наприклад, вмикатись і вимикатись відповідно до руху по траєкторії. Таким чином, лазер автоматично відключається під час рухів між робочими зонами (G0) і відновлює роботу тільки в момент виконання робочих команд (G1, G2, G3).

Такий підхід дозволяє уникнути "перегорянь" або зайвого впливу лазера на матеріал у зонах, де обробка не передбачена. Він забезпечує високу точність і якість обробки, що є критично важливим для процесів лазерної пайки, оскільки потрібно точне дозування теплового впливу на кожную точку.

Перехід у цей режим також налаштовує GRBL на коректну взаємодію з лазерними драйверами, забезпечуючи плавну зміну потужності залежно від швидкості руху, що дозволяє досягати рівномірної обробки навіть на складних траєкторіях.

Через зміни, що викладені у тексті вище, виникла потреба розробити власну принципову схему під модифіковану прошивку. Ця схема сприятиме зменшенню ймовірності помилок під час монтажу, тестування та налагодження системи. Вона стане базою для перевірки коректності всіх з'єднань, зокрема захисту від зворотних струмів у драйверах та забезпечення стабільної роботи кінцевих вимикачів і лазера. Схема розроблена за допомогою EDA KiCAD зображена на рис. 2.7.

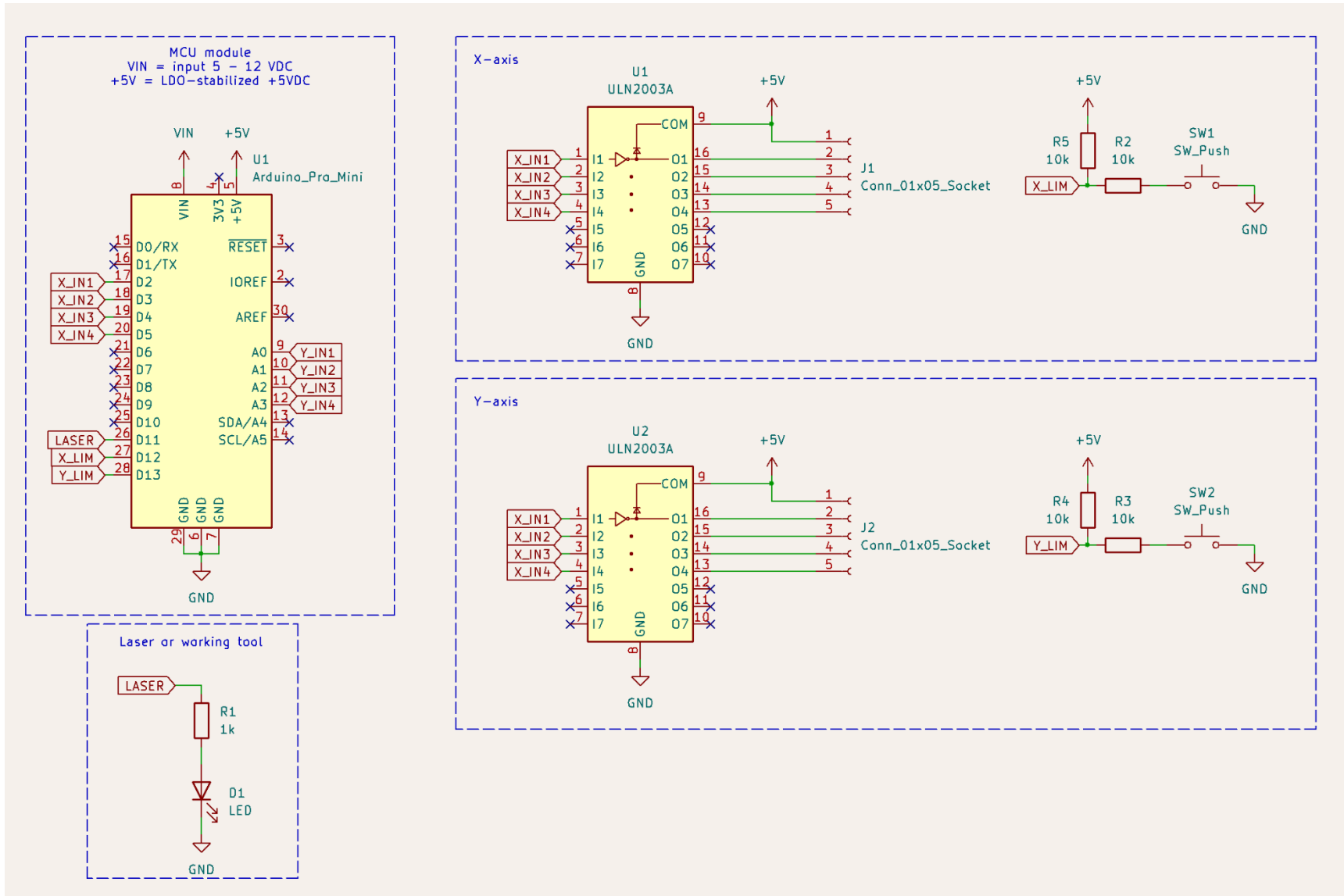


Рисунок 2.7 – Схема принципова з'єднання електронних компонентів макета

Одним із ключових етапів адаптації є налаштування параметра "X/Y-axis travel resolution" (кількість кроків на міліметр). Кроковий двигун 28BYJ-48 має незвичну конфігурацію: його стандартний редуктор забезпечує 2048 кроків на оберт. Враховуючи модуль зубчастої рейки (1.25) і діаметр шестерні (12 мм), розраховується точність переміщення у мм/крок. Цей параметр необхідно встановити у прошивці GRBL, використовуючи команду налаштування $\$$. Наприклад, для осі X команда може виглядати як $\$100=steps_per_mm$, де $steps_per_mm$ – це обчислене значення кроків на міліметр. Аналогічні дії виконуються і для осі Y. Емпіричним шляхом було визначено, що значення 60 кроків/мм дозволяє отримати потрібну точність переміщення.

У процесі налаштування системи було змінено параметр $\$3$ на значення 1. Цей параметр у прошивці GRBL відповідає за інверсію напрямків обертання двигунів по осях X, Y і Z. Значення 1 означає інверсію обертання по осі X. Таке налаштування було необхідне для коректної роботи механізму, оскільки, початковий напрямок руху двигуна по осі X не відповідає потрібному для правильного позиціонування лазера та здійснення технологічного процесу. Ця зміна гарантує, що всі осі рухаються відповідно до заданих координат у програмі, що важливо для точності паяння [21].

Для налаштування роботи кінцевих вимикачів і забезпечення коректного виконання процедури нульового калібрування осей (homing), були змінені відповідні параметри GRBL. Зокрема, параметр $\$22$ був встановлений у значення 1, що активувало процедуру нульового калібрування (homing cycle) [21]. Це необхідно для автоматичного визначення початкового положення осей X та Y, що важливо для точності роботи системи, особливо в умовах лазерної пайки, де необхідна висока повторюваність рухів .

Параметр $\$23$ отримав значення 3, яке інвертує напрямок руху під час процедури калібрування не лише для осі X, а й для осі Y [21]. Таке налаштування було обрано на основі фізичної конфігурації системи: кінцеві вимикачі осей X та Y розташовані у протилежному напрямку до початково

передбаченого GRBL. Ці зміни дозволяють системі коректно визначати початок координат (home position) без додаткових втручань у механіку чи електроніку.

Параметр \$26 був встановлений у значення 500, що визначає затримку "debounce" для кінцевих вимикачів у мілісекундах [21]. Це налаштування було обрано для мінімізації впливу механічних шумів і вібрацій, які можуть спричинити хибне спрацьовування кінцевих вимикачів. Значення 500 мс забезпечує достатньо часу для фільтрації контактного шуму, зберігаючи швидкість роботи системи на прийнятному рівні.

Параметр \$27 було встановлено у значення 3.000, яке визначає відстань у міліметрах, на яку двигуни відтягують вісь від кінцевих вимикачів після їх спрацьовування. Це налаштування важливе для запобігання повторному спрацьовуванню вимикачів через мінімальну механічну віддачу чи неточності в позиціонуванні. Вибір значення 3 мм був обґрунтований тим, що він забезпечує достатній відступ, не впливаючи на швидкість повернення до нульового положення (home position).

Також необхідно встановити параметри "X/Y-axis maximum travel" – максимального ходу для кожної осі [21]. У нашій конструкції довжина направляючої обмежена 150 мм для кожної осі, що потрібно врахувати у налаштуваннях прошивки. Встановлення цього параметра запобігає спробам системи виконати рухи поза фізичними межами направляючих. Для цього команда налаштування може виглядати як $\$130=150$ для осі X і $\$131=150$ для осі Y.

Графічний інтерфейс Universal G-Code Sender (UGS) надає зручну візуалізацію налаштувань GRBL, що зображено нижче, на рис. 2.8.

```

>>> $$
$0 = 10      (Step pulse time, microseconds)
$1 = 25      (Step idle delay, milliseconds)
$2 = 0       (Step pulse invert, mask)
$3 = 1       (Step direction invert, mask)
$4 = 0       (Invert step enable pin, boolean)
$5 = 0       (Invert limit pins, boolean)
$6 = 0       (Invert probe pin, boolean)
$10 = 1      (Status report options, mask)
$11 = 0.010  (Junction deviation, millimeters)
$12 = 0.002  (Arc tolerance, millimeters)
$13 = 0      (Report in inches, boolean)
$20 = 0      (Soft limits enable, boolean)
$21 = 0      (Hard limits enable, boolean)
$22 = 1      (Homing cycle enable, boolean)
$23 = 3      (Homing direction invert, mask)
$24 = 25.000 (Homing locate feed rate, mm/min)
$25 = 500.000 (Homing search seek rate, mm/min)
$26 = 500    (Homing switch debounce delay, milliseconds)
$27 = 3.000  (Homing switch pull-off distance, millimeters)
$30 = 1000   (Maximum spindle speed, RPM)
$31 = 0      (Minimum spindle speed, RPM)
$32 = 1      (Laser-mode enable, boolean)
$100 = 79.000 (X-axis travel resolution, step/mm)
$101 = 88.000 (Y-axis travel resolution, step/mm)
$102 = 60.000 (Z-axis travel resolution, step/mm)
$110 = 250.000 (X-axis maximum rate, mm/min)
$111 = 250.000 (Y-axis maximum rate, mm/min)
$112 = 250.000 (Z-axis maximum rate, mm/min)
$120 = 10.000 (X-axis acceleration, mm/sec^2)
$121 = 10.000 (Y-axis acceleration, mm/sec^2)
$122 = 10.000 (Z-axis acceleration, mm/sec^2)
$130 = 100.000 (X-axis maximum travel, millimeters)
$131 = 100.000 (Y-axis maximum travel, millimeters)
$132 = 200.000 (Z-axis maximum travel, millimeters)
ok

```

Рисунок 2.8 – Налаштування модифікованої прошивки

Процес адаптації також включає тестування змінених параметрів. За допомогою UGS виконуються тестові переміщення для перевірки відповідності реальних переміщень обчисленим значенням. Якщо спостерігаються відхилення, проводиться повторна калібровка.

Загалом, адаптація прошивки GRBL дозволяє інтегрувати її з нестандартними апаратними компонентами, забезпечуючи точне керування кроковими двигунами, обмеження ходу, а також сумісність з функціональними можливостями макету.

2.5 Комп'ютерне моделювання системи автоматичного управління

Розроблено динамічну макромодель крокового двигуна (КД), яка призначена для дослідження систем позиціонування та інших мехатронних робототехнічних комплексів у програмному середовищі автоматизованого проектування електроніки (ECAD). Модель забезпечує високу економічність і надійність у використанні.

Система позиціонування була представлена через елементи теорії автоматичного управління у вигляді структурної схеми з блоками, для яких передаточні функції описуються як залежності від часу [22]. Для оптимізації процесу симуляції подібних систем автоматичного управління (САУ) було використано математичний апарат MicroCap, який за своєю суттю є акаузальним. Для надання моделям каузальних властивостей застосовано залежні джерела, що управляються напругою.

У системах позиціонування кроковий двигун (КД) працює в сталому режимі, коли частота керуючих імпульсів оптимальна і постійна. У цьому випадку можна спростити модель, прийнявши припущення про лінійне перетворення вхідної напруги в кут повороту ротора. Такий підхід дозволяє зосередитися на розмірі кроку КД і параметрах сигналу управління драйвера. Перехід ротора в нове положення й накопичення кута реалізується через інтегрування, яке в ECAD виконується на основі рівняння для ємності. Макромодель КД у MicroCap 12 представлена на рис. 2.9.

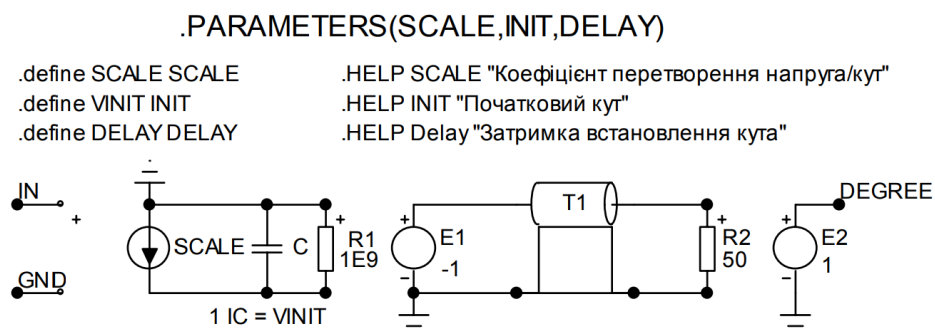


Рисунок 2.9 – Макромодель КД у MicroCap 12

Макромодель КД працює так: вхідна напруга надходить у центральну секцію, де перетворюється на струм за допомогою джерела струму, керованого напругою. Коефіцієнт перетворення задається параметром SCALE. Паралельний опір високого номіналу використовується для уникнення сингулярностей.

Напруга на ємності, яка є інтегралом струму, згідно формули:

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_c dt$$

Напруга передається в наступну секцію з одиничним коефіцієнтом через джерело напруги E1, керованим напругою. Затримка формується макросом T1, який містить макромодель «довгої лінії» [23]. Отримана функція передається у вихідну секцію джерелом напруги, керованим напругою E2 з одиничним коефіцієнтом передачі. Отже, напруга на вузлі DEGREE є масштабованою інтегралом вхідної напруги із визначеною затримкою.

Макромодель має три основні вхідні параметри:

– SCALE – коефіцієнт перетворення, що розраховується за формулою:

$$SCALE = \frac{\alpha}{V(one) \cdot \tau},$$

де α – кут в градусах, на який ротор КД обертається при одному вхідному імпульсу керування;

$V(one)$ – амплітуда імпульсу керування (рівень логічної одиниці);

τ – тривалість імпульсу керування, яка дорівнює половинному значенню амплітуди при коефіцієнті заповнення 50%;

– INIT – початкові умови;

– DELAY – затримка.

Значення цих параметрів задаються через команди define, а їхній опис доступний через оператор HELP.

За цього підходу КД діє як інерційний перетворювач імпульсів керування у кут повороту з урахуванням затримок. Часова затримка підвищує точність моделювання та запобігає алгоритмічним збоєм завдяки реактивним елементам у схемі.

Для моделювання було обрано КД 28BYJ-48-5V, що був обраний для макету системи. Один імпульс драйвера (VINSM) обертає ротор на $1,8^\circ$, тобто для повного оберту потрібно 200 імпульсів. Параметри сигналу: амплітуда 5 В, період 5 мс (частота 200 Гц), коефіцієнт заповнення – 50%. Початкові умови INIT прийняті нульовими, затримка DELAY становить 0,5 мс, SCALE дорівнює 144.

Модель забезпечує стабільну роботу без пропуску кроків, із високою точністю й швидкістю розрахунків. На рис. 2.10 показано графіки: керуючі імпульси (верхній) та реакцію ротора (нижній). Всі результати подані у вольтах. Відносна похибка моделювання повного оберту становить лише 0,2%.

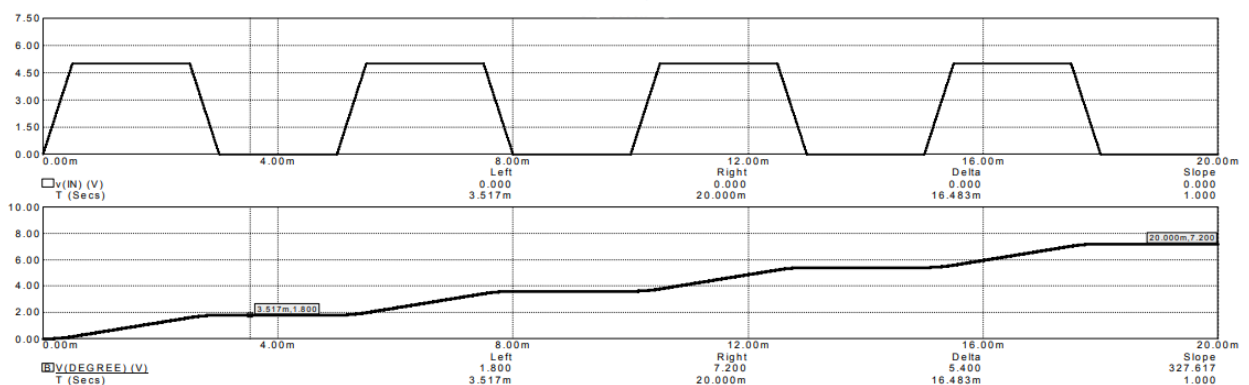


Рисунок 2.10 – Динамічні характеристики, отримані моделюванням КД

2.6 Збірка макету системи

Збірка макету системи лазерної пайки є ключовим етапом, який об'єднує всі раніше підготовлені компоненти в єдину функціональну структуру. Результатом цього етапу є повністю зібраний і функціональний макет системи лазерної пайки, що зображений на рис. 2.11, готовий до подальших експериментів і тестування.

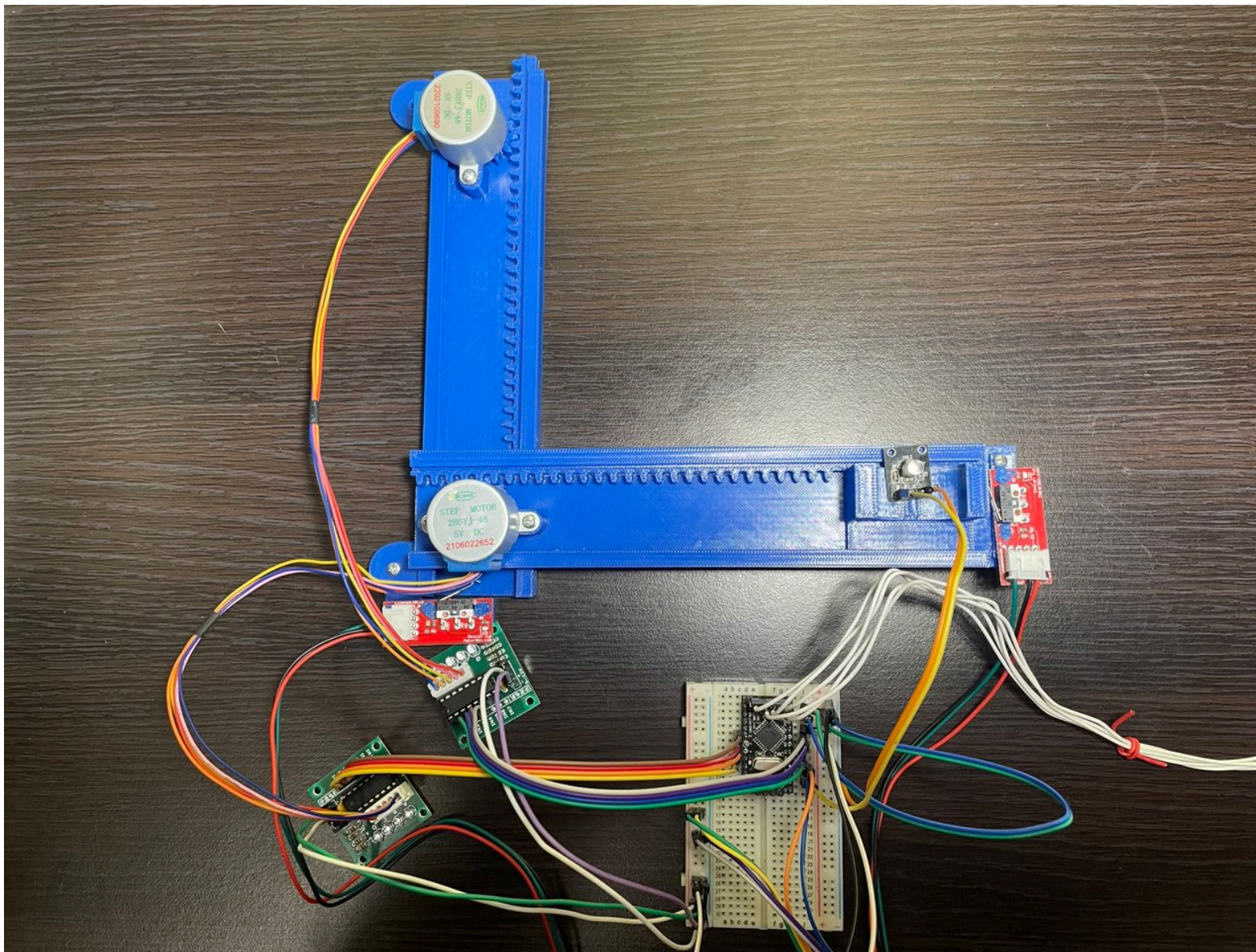


Рисунок 2.11 – Зібраний макет системи лазерної пайки

Першим етапом збірки є встановлення лінійної направляючої з зубчастою рейкою на основу конструкції. Для цього направляюча монтується в спеціально передбачені пази, що забезпечують точне вирівнювання і фіксацію. Лінійна направляюча повинна бути встановлена без люфтів, щоб уникнути похибок у позиціонуванні.

Далі монтуються крокові двигуни 28BYJ-48 у посадочні місця. Двигуни закріплюються за допомогою гвинтів DIN 7985 M3, забезпечуючи їхню надійну фіксацію. Перед затягуванням гвинтів необхідно переконатися, що зубчасті шестерні двигунів правильно з'єднані із зубчастою рейкою, щоб уникнути механічних збоїв при передачі руху.

Наступним етапом є монтаж кінцевих вимикачів на обох осях. Механічні мікроперемикачі встановлюються у спеціальні кріплення таким чином, щоб вони чітко сигналізували про досягнення кареткою крайнього положення. Положення вимикачів коригується так, щоб забезпечити надійний контакт без пошкодження конструкції при досягненні крайньої точки.

Після встановлення механічних компонентів виконується монтаж електронної частини. Arduino Pro Mini розміщується в "адаптері" для інструмента, забезпечуючи компактне розташування на макеті. Драйвери ULN2003 для кожного двигуна підключаються до Arduino, а також здійснюється підключення кінцевих вимикачів. Всі з'єднання проводяться відповідно до схеми електричних підключень, щоб уникнути помилок при запуску.

Завершальним етапом є налаштування та калібрування системи. Зібраний макет перевіряється на наявність механічних люфтів та коректність руху по осях. Кінцеві вимикачі тестуються на спрацьовування, а двигуни калібруються для забезпечення точності переміщень. Водночас виконується налаштування прошивки GRBL, завантаження тестових G-code команд через Universal G-Code Sender (UGS) для перевірки системи та виявлення можливих недоліків.

2.7 Висновки до другого розділу

Другий розділ почався із розробки структурної схеми макету системи лазерної пайки з використанням ЧПК. Система була поділена на 3 підсистеми: 2 осі та виконавчий інструмент. Осі включають драйвер з мотором на кінцевий вимикач. Лазер було вирішено замінити світлодіодом з міркувань безпеки та швидкості прототипування.

Наступним кроком став підбір апаратних та програмних засобів для макету системи. У якості мікроконтролера було обрано Atmega328P на базі Arduino Pro Mini. Уніполярний КД 28BYJ-48 із драйверами ULN2003. Механічний вимикач із супутніми компонентами – резистори, конденсатори та світлодіод.

Наступним кроком було створено 3D модель макету, деталі надруковані за допомогою адитивних технологій, а саме на 3D принтері використовуючи PETG-пластик.

У якості основи програмного забезпечення для макету було обрано GRBL, котре довелося модифікувати за-для сумісності із обраними драйверами мотору. Також були відкориговані налаштування прошивки (наприклад кількість кроків драйвера на переміщення у мм, інвертування осей, параметри знаходження нульової точки та інші).

Було проведене комп'ютерне моделювання системи автоматичного управління під час котрого розроблено динамічну макромодель КД. Було створено макромодель КД у ECAD MicroCap 12 та проаналізовано динамічні характеристики.

В кінці, використовуючи здобутки минулих пунктів, було зібрано макет системи.

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЛАЗЕРНОЮ ПАЙКОЮ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЧПК

3.1 Проектування програмного забезпечення

Перед розробкою програмного забезпечення для керування лазерною пайкою важливо було провести комплексне проектування, яке включало вибір підходу до обробки вхідних даних, а також до генерації керуючих команд для механізмів. Зокрема, проектування охоплює кілька етапів, зокрема збирання та обробка вихідних даних у вигляді зображень, генерування шляху для лазерного оброблення, а також створення відповідного G-коду для керування рухомим механізмом і лазером. Вся система орієнтована на автоматизацію та точність виконання обробки, тому кожен етап був продуманий з точки зору забезпечення надійності і безпеки.

Перший етап проектування програмного забезпечення для системи лазерної пайки полягає в обробці вхідних зображень, що включають компоненти плати, для подальшого визначення їх контурів, координат і геометрії. Це критично важливий крок, оскільки від точності визначення контурів і координат залежить якість і точність процесу пайки.

Зображення отримуються у вигляді файлів з розширенням, яке містить растрові зображення (наприклад формату PNG), або векторні зображення (наприклад, формати SVG чи DXF). Ці зображення можуть бути результатом розробки тестових плат за допомогою програм, таких як KiCAD, що дозволяє автоматично генерувати компоненти, такі як резистори, конденсатори чи мікросхеми, для подальшої обробки.

Для аналізу зображень використовується спеціалізоване програмне забезпечення та бібліотеки для обробки зображень, такі як NumPy, SciPy та інші. Першим кроком є конвертація зображення в формат, який дозволяє працювати з даними за допомогою математичних операцій. Наприклад, зображення перетворюється в двовимірний масив (матрицю пікселів), де

кожен піксель має певне значення (наприклад, рівень прозорості або кольору).

Після того, як зображення перетворене на масив, проводиться обробка для виявлення контурів кожного компонента, що включає в себе фільтрацію даних, виявлення контурів і виділення різних компонентів на платі. Для цього використовуються методи, такі як виявлення контурів за допомогою бібліотеки `skimage.measure.find_contours`, яка дозволяє визначити точні координати пікселів, що утворюють контур компонента. Важливо також враховувати розмір компонентів, тому для кожного елемента обчислюються його координати, центроїди та розміри, що необхідно для подальших кроків генерації шляху лазера.

Одним із важливих аспектів цього етапу є обробка країв зображення. На платі можуть бути присутні елементи, розташовані занадто близько до країв, що може ускладнити точне визначення їх контурів або навіть призвести до помилок при пайці. Тому необхідно виключити краєві області за допомогою маски, яка дозволяє зосередитися лише на внутрішніх компонентах. Це робиться шляхом накладення маски на зображення, де певні області будуть ігноруватися, що значно покращує точність подальшої обробки.

Завершенням цього етапу є отримання координат для кожного компонента, що дозволяє точно визначити його місцезнаходження на платі та отримати точні дані для подальшого створення шляху для лазера. Важливим аспектом є також виявлення зовнішніх контурів компонента (для кожного окремого елемента, такого як резистор або мікросхема), що дозволяє створити точний шлях для лазерного випромінювання, не зачіпаючи інші компоненти.

Другий етап проектування програмного забезпечення для системи лазерної пайки полягає у створенні лазерного шляху, що базується на координатах компонентів, отриманих на першому етапі. На цьому етапі

ключовою задачею є побудова шляху лазера, що забезпечує ефективну та точну пайку без пошкодження елементів або самої плати.

Першим кроком на цьому етапі є визначення меж області, в якій лазер повинен працювати. Для кожного компонента, що був визначений на попередньому етапі, визначаються координати його контурів, а також мінімальна відстань (маржа) від країв компонентів. Маржа необхідна для того, щоб уникнути можливих помилок через надмірну близькість лазера до краю компонента або країв плати. Це також допомагає уникнути зіткнення лазера з іншими компонентами. Параметр маржі додається до координат, щоб сформувати коректний прямокутник (bounding box) навколо кожного компонента.

Наступним кроком є генерація самого шляху лазера. Основною метою є створення таких рухів лазера, які мінімізують кількість рухів без роботи (наприклад, без лазерного випромінювання), і при цьому забезпечують достатню точність для виконання пайки. Шлях лазера будується шляхом покрокового сканування області, що оточує компоненти, із використанням заданого кроку (наприклад, ширини лазерного променя).

Оптимізація шляху лазера є важливим етапом, оскільки ефективність пайки залежить від часу, необхідного для виконання всього процесу. Для цього використовуються різні стратегії оптимізації, такі як скорочення кількості зайвих рухів або мінімізація кількості змін напрямку лазера. Наприклад, лазер може рухатися по прямій лінії від одного компонента до іншого, замість того щоб переміщатися по вузьким траєкторіям або зупинятися на кожній точці шляху.

Крім побудови шляху, важливим аспектом цього етапу є визначення параметрів лазера, таких як потужність і швидкість руху. Потужність лазера безпосередньо впливає на якість пайки, тому важливо забезпечити точну відповідність потужності лазера до розміру та типу компонента. Швидкість руху також є важливим параметром, оскільки занадто швидкий рух може

призвести до недостатньої якості пайки, а занадто повільний – до перегріву плати чи компонентів.

Третій етап проектування програмного забезпечення для системи лазерної пайки полягає в генерації G-коду, що є основою для управління лазером і рухами механізму. G-код визначає інструкції для CNC-обладнання, в даному випадку для лазерної системи, зокрема для контролю точності руху і включення/вимикання лазерного випромінювання під час пайки.

Першим кроком на цьому етапі є перетворення координат, отриманих на попередньому етапі, у відповідні одиниці виміру, зокрема в міліметри. Оскільки зазвичай шляхи лазера будуються в пікселях, важливо правильно здійснити масштабування координат, враховуючи коефіцієнт перерахунку пікселів в міліметри (`dots_per_mm`). Це забезпечує точність шляху лазера відповідно до розмірів компонента на реальній платі.

Після того, як координати були перераховані в міліметри, наступним кроком є формування відповідних команд G-коду. Зазвичай, для лазерної пайки використовуються наступні команди [24]:

- G21 – встановлення одиниць виміру в міліметри;
- G90 – абсолютне позиціонування;
- G17 – робота в площині XY;
- G94 – одиниці на хвилину для швидкості руху;
- M3 S1000 – вмикання лазера на потужність 1000;
- M5 – вимикання лазера по завершенню роботи.

Ці команди є стандартними для більшості GRBL-сумісних CNC-обладнань і потрібні для того, щоб забезпечити правильну інтерпретацію шляху лазера та керування потужністю лазера під час роботи. Кожен шлях, що генерується для лазера, буде супроводжуватися інструкціями G1 (переміщення з роботою лазера) та G0 (переміщення без роботи лазера), що дозволяє точніше керувати часом та ресурсами системи.

Основним аспектом при генерації G-коду є точність побудови шляху лазера. Для цього програма ітерує по всіх точках шляху і генерує відповідні

інструкції для кожної точки, враховуючи параметри руху (швидкість, потужність лазера) і тип руху (з включенням або без лазера). Зазвичай лазер рухається від початкової точки (наприклад, центру компонента) до наступної з поступовим вмиканням і вимиканням лазера на кожному кроці.

Генерація G-коду для кожного шляху починається з переміщення до стартової точки, що здійснюється без роботи лазера (команда G0). Після того як лазер досягне початкової точки, далі використовується команда G1 для руху по шляху з активним лазерним випромінюванням. Кожен сегмент шляху передбачає точні координати для переміщення лазера, а також швидкість руху, що регулюється параметром feed rate.

Після того як лазер обробить всі визначені шляхи, генерується фінальна команда M5, яка вимикає лазер. Це дозволяє завершити процес пайки і зупинити подачу лазерного променя, запобігаючи його випадковому вмиканню в кінці циклу.

Таким чином, проектування програмного забезпечення включає в себе ретельне опрацювання всіх етапів від обробки зображень до генерації G-коду, що дозволяє автоматизувати процес лазерної пайки та гарантує точність і безпеку роботи обладнання. В результаті проектування можна скласти загальний алгоритм системи керування лазерною пайкою із застосуванням ЧПК, що зображений на рис. 3.1.

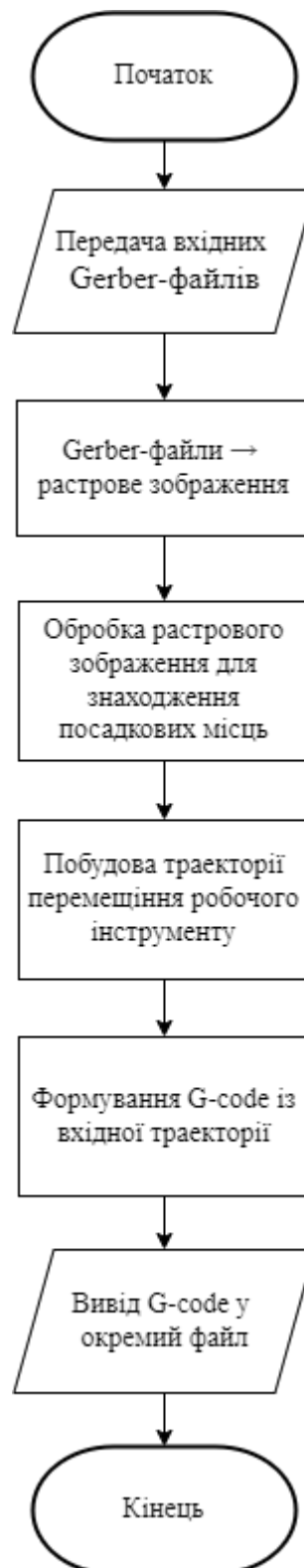


Рисунок 3.1 – Загальний алгоритм управління процесом лазерної пайки

3.2 Опис алгоритму управління процесом лазерної пайки

Алгоритм починається з вибору вхідних файлів, що містять необхідну інформацію для подальшої обробки – Gerber-файлів, які відповідають фізичним розмірам друкованої плати та шару паяльної пасти. Ці файли є стандартним форматом для передачі даних про друковані плати, зокрема їхні геометричні параметри та координати посадкових місць компонентів. Gerber-файли служать основою для створення растрового зображення, яке буде оброблятися на наступних етапах.

На другому етапі відбувається обробка растрового зображення з метою виділення ключових об'єктів. Використовується методи бінаризації, що дозволяють перетворити зображення в чорно-білу форму для полегшення подальшого аналізу. Після цього застосовується математичне морфологічне замикання (morphological closing), що дозволяє усунути дрібні прогалини чи шуми у зображенні та об'єднати розділені контури об'єктів. Завдяки цьому можна отримати цілісні та чіткі межі форм. Далі програмою визначаються контури об'єктів і розраховуються центроїди елементів – це дозволяє ідентифікувати ключові точки, необхідні для побудови траєкторій робочого інструменту. У разі потреби на цьому етапі додаються анотації, що візуалізують або маркують особливі ділянки, наприклад, розміщення компонентів або специфічні зони для подальшого аналізу.

Після обробки та виділення геометричних даних програма переходить до визначення параметрів для лазерної обробки. Одним із ключових параметрів є розмір лазерної точки, який визначається на основі заданої точності обробки. Для цього використовується коефіцієнт співвідношення точок на міліметр (dots per mm), що дозволяє коректно масштабувати координати точок зображення в реальні фізичні координати. Це забезпечує відповідність між цифровими даними та фактичною траєкторією інструменту при нанесенні або обробці ділянок лазером.

Загальна логіка алгоритму реалізується за допомогою функції `process`, яка є основною у модулі обробки зображення. Вона виконує послідовність описаних етапів: зчитування вхідних даних, обробку растрового зображення, побудову контурів та центроїдів, а також визначення необхідних параметрів для лазерної обробки. На виході програма формує геометричні дані, які використовуються для побудови точних траєкторій лазерного інструменту у подальших етапах роботи системи.

Алгоритм пошуку місць пайки із зображення наведений на рис. 3.2.

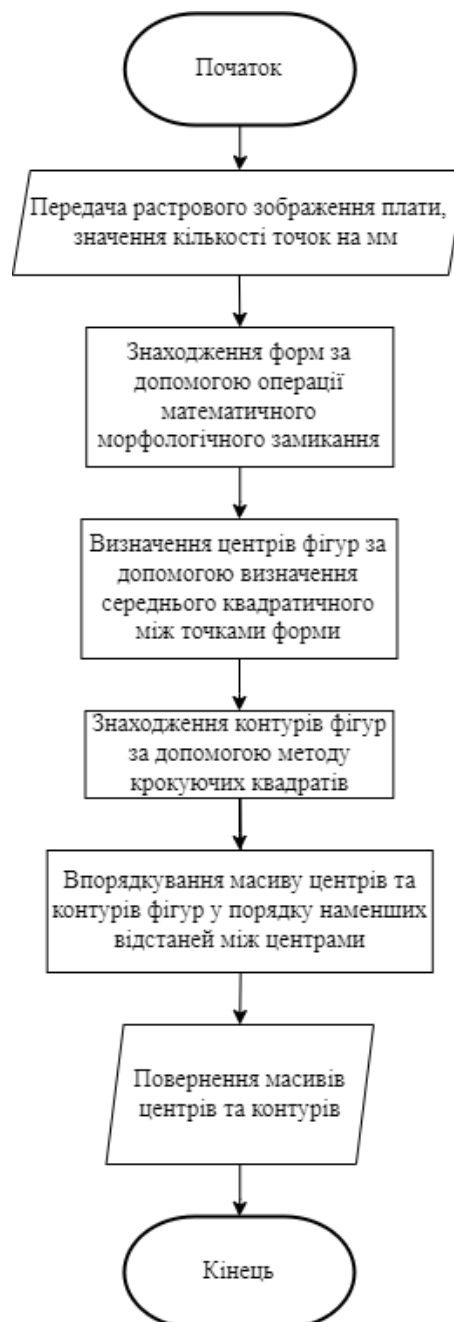


Рисунок 3.2 – Алгоритм пошуку місць пайки

Цей алгоритм відповідає за обробку зображення та пошук фігур. Спочатку зображення завантажується та конвертується в формат RGBA для забезпечення прозорості. Потім, за допомогою функції `detect_shapes`, виявляються всі форми на зображенні. Ця функція приймає зображення та додатковий параметр `edge_offset`, який визначає відступи від країв зображення, щоб уникнути обробки пікселів, які знаходяться занадто близько до краю. Вона створює маску, що ігнорує краї зображення, а потім визначає прозорі та непрозорі пікселі, об'єднуючи їх в бінарну маску. Ця маска дозволяє виявити форми, що є на зображенні, за допомогою операцій з морфології, таких як закриття (для видалення дрібних отворів та шуму). Потім функція використовує `label` для маркування з'єднаних компонентів і визначення кількості знайдених фігур.

Після того як форми виявлені, наступним етапом є виклик функції `get_centroids`, яка обчислює центроїди для кожної позначеної форми. Для цього функція використовує результат з `detect_shapes`, де кожній формі присвоєно свій унікальний мітку. Вона збирає координати всіх пікселів кожної форми та обчислює їх середнє значення для визначення центроїду. Отримані центроїди повертаються у вигляді списку.

Згодом, викликається функція `get_shape_outlines`, яка відповідає за визначення контурів кожної форми. Вона отримує мітки форм і використовує метод `find_contours` для знаходження зовнішніх контурів. Кожен контур перетворюється в полігон за допомогою бібліотеки `shapely`, яка дозволяє обробляти геометричні об'єкти. Потім функція перевіряє, чи є контур зовнішнім, чи внутрішнім (який повністю оточений іншими контурами), і залишає тільки зовнішні контури для подальшої обробки.

Після знаходження контурів і центрів фігур, викликається функція `find_shortest_path`, яка використовує жадібний алгоритм пошуку найкоротшого шляху. Вона перебирає всі центроїди та намагається знайти найближчий до поточної точки, щоб відвідати всі центроїди мінімальною

відстанню. Це дозволяє організувати порядок відвідування точок, що важливо для подальшого коректного руху лазера або обробки.

Останнім етапом є функція `reorder_centroids_and_outlines`, яка використовує отриманий порядок відвідування для перерозподілу центроїдів та контурів за відповідним порядком. Це забезпечує, що центроїди та їх контури обробляються у правильній послідовності, що дозволяє лазеру слідувати заданій траєкторії.

Кінцевим результатом функції є відсортовані центроїди та контури, які можна використовувати для подальших операцій, таких як генерування лазерних траєкторій або виведення інформації про зображення.

Таким чином, весь процес обробки зображень включає в себе виявлення форм, обчислення їх центрів, визначення контурів, пошук найкоротшого шляху між точками, а також можливість візуалізації та анотацій для подальшого аналізу.

Далі генеруються шляхи для лазера, враховуючи отримані центроїди та контури. Ці шляхи визначають, яким чином лазер повинен рухатися по оброблюваній поверхні, щоб досягти максимального ефекту при точній обробці кожної деталі. Крім того, враховується маржа між шляхами, що дає змогу забезпечити правильну відстань між оброблюваними точками, мінімізуючи можливі помилки чи перехрестя шляхів. Алгоритм модуля розрахунку шляху лазера зображений на рис 3.3.

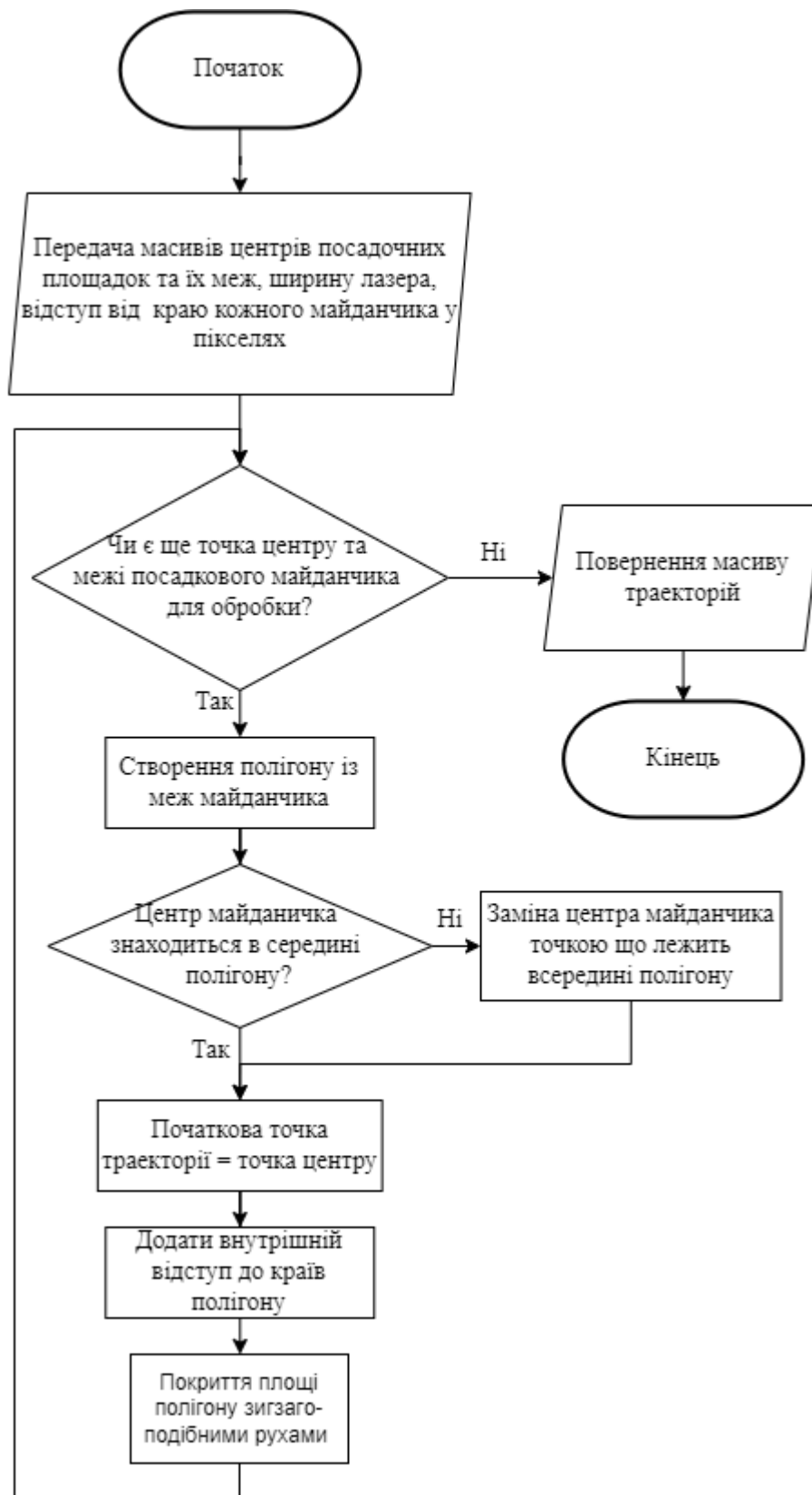


Рисунок 3.3 – Алгоритм розрахунку траєкторії робочої голівки

Перша функція, `visualize_path_and_outline`, відповідає за візуалізацію фігури на графіку. Вона приймає координати центроїду, контур фігури, траєкторію лазера, полігон, що представляє фігуру, та індекс фігури. Спочатку створюється новий графік за допомогою `matplotlib`. Потім, контур фігури додається на графік як полігон синього кольору без заповнення, що дає змогу побачити форму. Центроїд фігури позначається червоним маркером на графіку, а траєкторія лазера (шлях) малюється зеленим кольором. Для наочності, також додається прямокутник, що обмежує фігуру, використовуючи мінімальні та максимальні координати фігури (її межі). Задаються також межі графіка та заголовок.

Функція `generate_path` відповідає за генерування лазерної траєкторії для кожної фігури, починаючи з центроїду та просуваючись по контурі фігури. Вона приймає список центроїдів, контурів фігур, ширину лазерного променя (крок руху лазера), маржу для уникнення проходів дуже близько до країв фігури, а також прапор `annotate`, який визначає, чи слід візуалізувати результати. Для кожної фігури створюється полігон за допомогою бібліотеки `shapely`. Якщо полігон не є валідним, він коригується за допомогою методу `buffer(0)`. Далі перевіряється, чи знаходиться центроїд усередині фігури. Якщо він знаходиться поза фігурою, то вибирається точка всередині полігону, яка буде використовуватися як початкова.

Наступним кроком обчислюються межі фігури (`bounding box`) та до них застосовується маржа, щоб уникнути розташування лазерної траєкторії занадто близько до країв фігури. Якщо через маржу обмеження стають некоректними (наприклад, мінімальні координати стають більшими за максимальні), ця фігура пропускається. Потім на основі заданої ширини лазерного променя (кроку) обчислюється траєкторія руху лазера. Траєкторія формуються шляхом поетапного руху лазера по горизонталі та вертикалі, і додаються лише ті точки, що знаходяться всередині фігури. Усі ці точки додаються до списку траєкторії для поточної фігури.

В результаті, для кожної фігури створюється список точок, які формують лазерну траєкторію, що забезпечує правильний рух лазера по контурі. Функція повертає список усіх траєкторій для кожної фігури.

Таким чином, цей код не лише генерує траєкторії руху лазера, а й здійснює візуалізацію цього процесу для кожної окремої фігури. Завдяки цьому користувач має можливість перевірити правильність обчислених траєкторій, побачити їх на екрані перед тим, як застосовувати їх у реальному середовищі. Візуалізація дозволяє оцінити точність і ефективність обраних траєкторій, що є важливим для виявлення можливих помилок і оптимізації процесу до фактичного використання лазера. Це забезпечує додатковий рівень перевірки та підвищує безпеку і якість роботи лазерної системи.

Останнім етапом є генерація G-коду, який перетворює ці траєкторії у конкретні команди для системи ЧПК. Мета алгоритму полягає в тому, щоб перетворити шляхи руху лазера, які задані у вигляді послідовності координат, в стандартний формат G-коду. G-код є мовою програмування, що широко використовується для управління числовими координатами та механізмами, зокрема в обробці матеріалів за допомогою CNC верстатів або лазерних систем. Алгоритм відповідає за визначення та форматування цих координат так, щоб вони могли бути використані для управління точними рухами механізмів. Окрім цього, він також передбачає інтеграцію команд для вмикання та вимикання лазера на основі заданих параметрів і етапів виконання завдання, що дозволяє забезпечити необхідну точність і ефективність роботи лазерної системи. G-код визначає, як саме лазер повинен рухатися, змінювати потужність або зупинятися в залежності від конфігурації траєкторій і параметрів обробки. Це дозволяє автоматизувати весь процес, зробивши його достатньо точним і надійним. Графічне зображення алгоритму наведено на рис. 3.4.

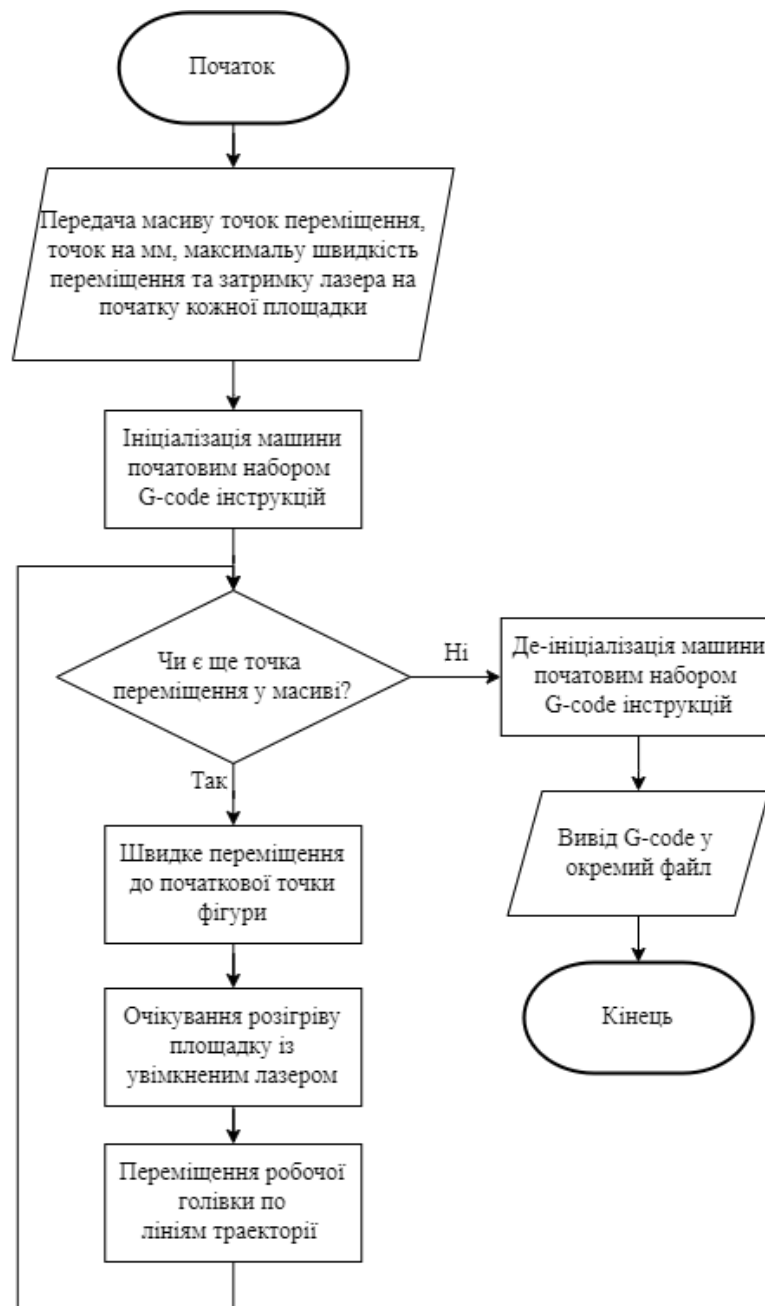


Рисунок 3.4 – Алгоритм перекладу масива точок у G-код

Основна мета цього алгоритму – конвертувати шляхи руху лазера, представлені як послідовність координат, у стандартний формат G-коду, який керує рухом механізмів і ввімкненням або вимкненням лазера під час виконання завдання.

Алгоритм починається з ініціалізації загальних налаштувань для G-коду, включаючи вибір одиниць вимірювання (міліметри), використання абсолютної системи координат, встановлення робочої площини XY, а також

увімкнення лазера з певним рівнем потужності. Ці команди є обов'язковими для коректної роботи станка і задають базові умови для виконання операцій.

Основна частина функції проходить через всі задані шляхи руху лазера, що зберігаються у вигляді списків координат. Кожен шлях масштабується в міліметри, використовуючи заданий коефіцієнт перетворення `dots_per_mm`, який відповідає щільності точок на міліметр. Для кожного шляху перша точка використовується як стартова позиція, до якої механізм переміщається без увімкнення лазера (команда `G0`). Після цього наступні точки відпрацьовуються з лазером, який переміщується на заданій швидкості подачі (команда `G1`). `GRBL` вимикає лазер під час швидких переміщень (команди `G0`) і вмикає його під час робочих рухів (команди `G1`), тому вручну керувати лазером під час цих операцій немає потреби.

Після переміщення до першої точки за допомогою `G0`, було додано вмикання лазера через пuste робоче переміщення за допомогою команди `G1`, що забезпечує активацію лазера без фактичного руху. Потім програма чекає 1 секунду за допомогою команди `G4` (паузи), що дозволяє розігріти площину, перш ніж почати фактичне виконання обробки лазером. Це допомагає забезпечити стабільність температури і точність роботи лазера, особливо важливо для досягнення високої якості пайки.

Наприкінці алгоритм додає команду `M5` для вимкнення лазера після завершення роботи, що є критично важливим для безпеки та запобігання зайвому нагріванню. Усі команди об'єднуються в один рядок, який повертається у вигляді тексту, готового для використання в середовищі `GRBL` або завантаження в ЧПУ-станок. Таким чином, цей алгоритм автоматизує процес створення G-коду, забезпечуючи точність і сумісність із сучасними системами лазерного паяння чи різання.

Таким чином, програма обробляє вхідні дані, генерує траєкторії для лазерної обробки і перетворює їх у G-код для подальшого виконання через систему ЧПК, враховуючи точність, маржі та можливість візуалізації для перевірки результатів.

3.3 Моделювання та симуляція технологічного процесу

Для моделювання розробленої системи було створено тестову плату, використовуючи програмне забезпечення KiCAD [25]. Плата містить кілька типів резисторів різних розмірів, що дозволяє перевірити точність і ефективність пайки на різних компонентах. Всього на платі розміщено 8 резисторів двох типорозмірів: 0805 та 1206, що забезпечує можливість перевірки процесу пайки для більш великих і стандартних компонентів. Крім того, на платі є по 4 резистори з типорозмірами 0402 та 0603, що дозволяє оцінити якість роботи лазерного паяльного процесу для менших компонентів, які вимагають більш точної і акуратної роботи. Плата зображена на рис. 3.5.

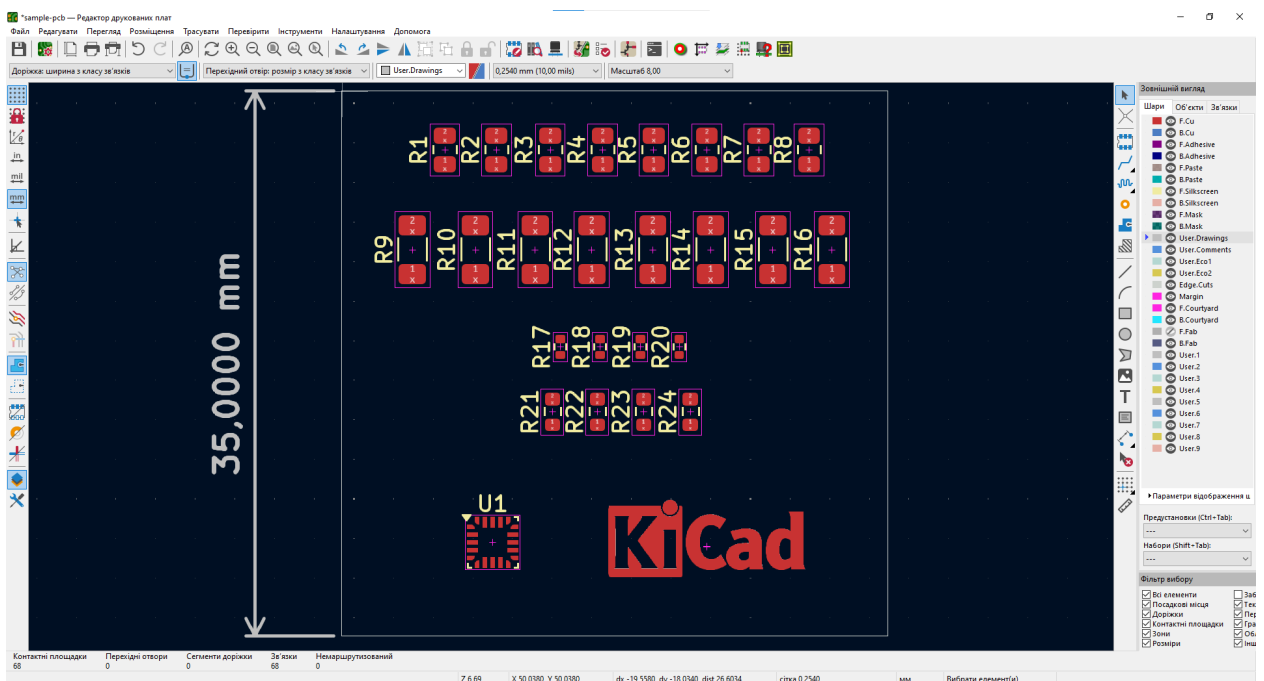


Рисунок 3.5 – Тестова плата у редакторі плат KiCAD

Крім резисторів, для тестування була використана посадкова площадка для мікросхеми UFQFPN-20, з розмірами 3x3 мм та кроком 0,5 мм, що дає змогу перевірити процес пайки для компонентів з малим кроком виведення. Цей компонент дозволяє дослідити складність пайки мікросхем з

мікроскопічними виводами, що є важливим для оцінки точності та стабільності роботи лазерного паяльного обладнання.

Також на тестовій платі розміщено графічне зображення у вигляді логотипу KiCAD, що додає візуальну складову до тесту. Це дозволяє перевірити якість та точність друкованого зображення на платі, а також забезпечує додаткову можливість для тестування функціональності лазерної паяльної системи на платах з графічними елементами.

Задля перевірки коректності вихідної керуючої програми (G-коду), було використано онлайн-сервіс NC Viewer [26]. Цей сервіс дозволяє зручно візуалізувати G-код та оцінити, чи відповідає він очікуваному шляху лазерного паяння на тестовій платі. Візуалізація допомагає наочно побачити рухи інструменту, перевірити їх правильність і уникнути можливих помилок у програмі, таких як неправильне розташування лазерного променя або невірна послідовність операцій.

NC Viewer підтримує різноманітні формати G-коду, що робить його універсальним інструментом для перевірки програм, згенерованих для різних версій і типів машин. Важливою перевагою цього сервісу є можливість перевірки G-коду без необхідності наявності фізичного обладнання, що значно прискорює процес тестування та налагодження програм. Завдяки інтерактивному інтерфейсу можна детально налаштувати перегляд траєкторій, що дає змогу виявити неточності або некоректні рухи до запуску програми на реальному обладнанні.

3.4 Тестування і валідація системи управління

Після завершення етапу розробки програмного забезпечення для системи управління лазерною пайкою важливим етапом є тестування та валідація її працездатності. Цей процес передбачає перевірку як логіки роботи програми, так і коректності згенерованого керуючого G-коду. Завдяки ретельному тестуванню можна виявити потенційні недоліки, уникнути

помилки у роботі системи та забезпечити її відповідність до заданих технічних вимог.

Після виконання програми із вхідними даними розробленої тестової плати, для оцінки коректності покриття посадкових майданчиків виводиться графічне зображення майданчиків та траєкторій, їх розмірів і меж, прокладений маршрут робочого інструмента. Це зображення наведено на рис. 3.6.

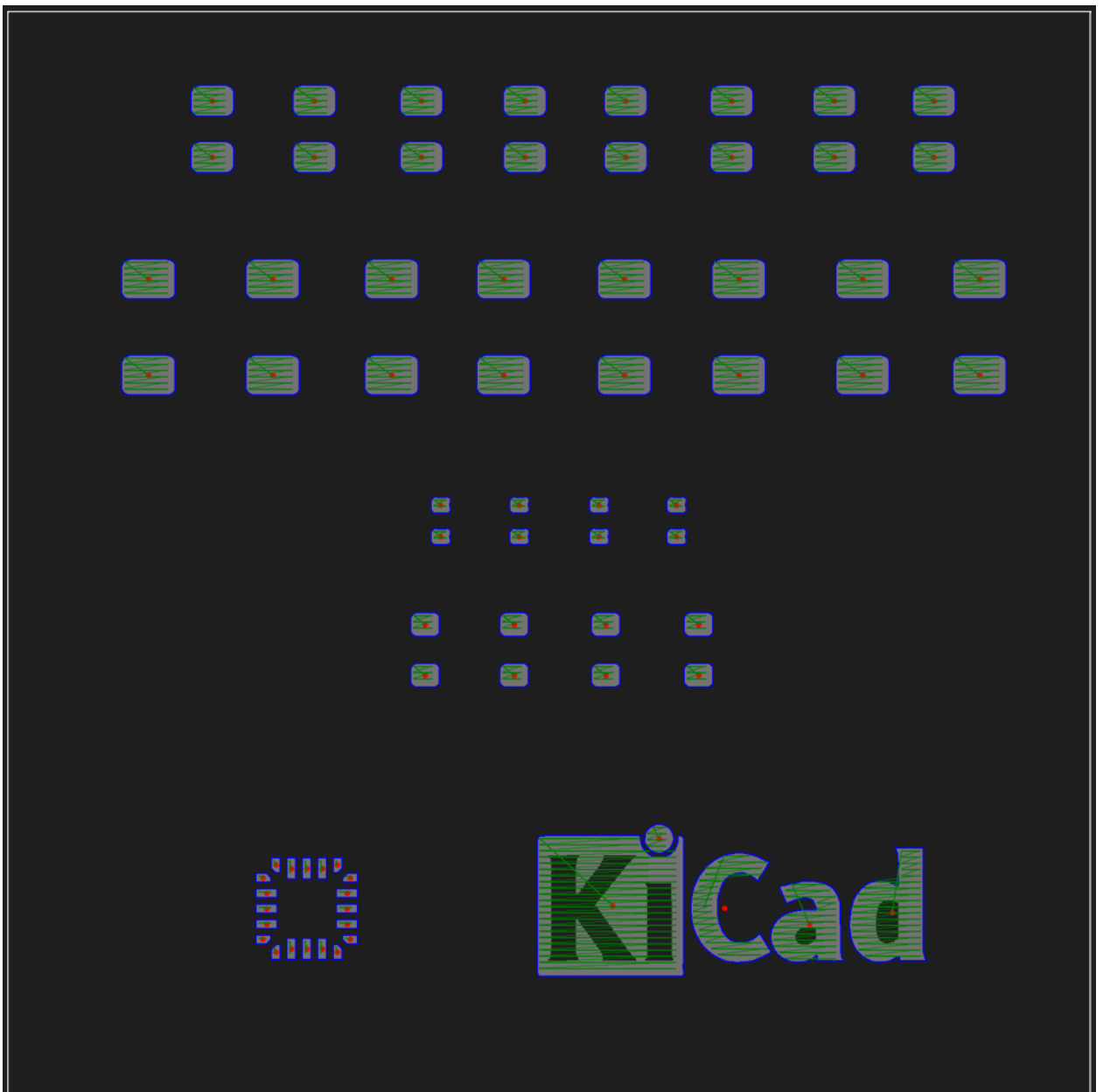


Рисунок 3.6 – Графічний вивід посадкових майданчиків, їх меж та маршрут робочого інструмента для тестової плати

Після того, як вихідна керуюча програма у вигляді G-code була згенерована, наступним етапом стало її візуалізація за допомогою онлайн-сервісу NC Viewer [26]. NC Viewer надав можливість точно визначити будь-які непередбачені ситуації, які можуть виникнути при реальному виконанні програми на обладнанні. Завдяки візуалізації стало можливим спостерігати, як лазер проходить по заданих траєкторіях на 2D-схемі, а також перевірити, чи не виникають помилки, такі як зайві або некоректні рухи, неправильне вмикання лазера чи помилки в координатах. Результат візуалізації зображений на рис. 3.7.

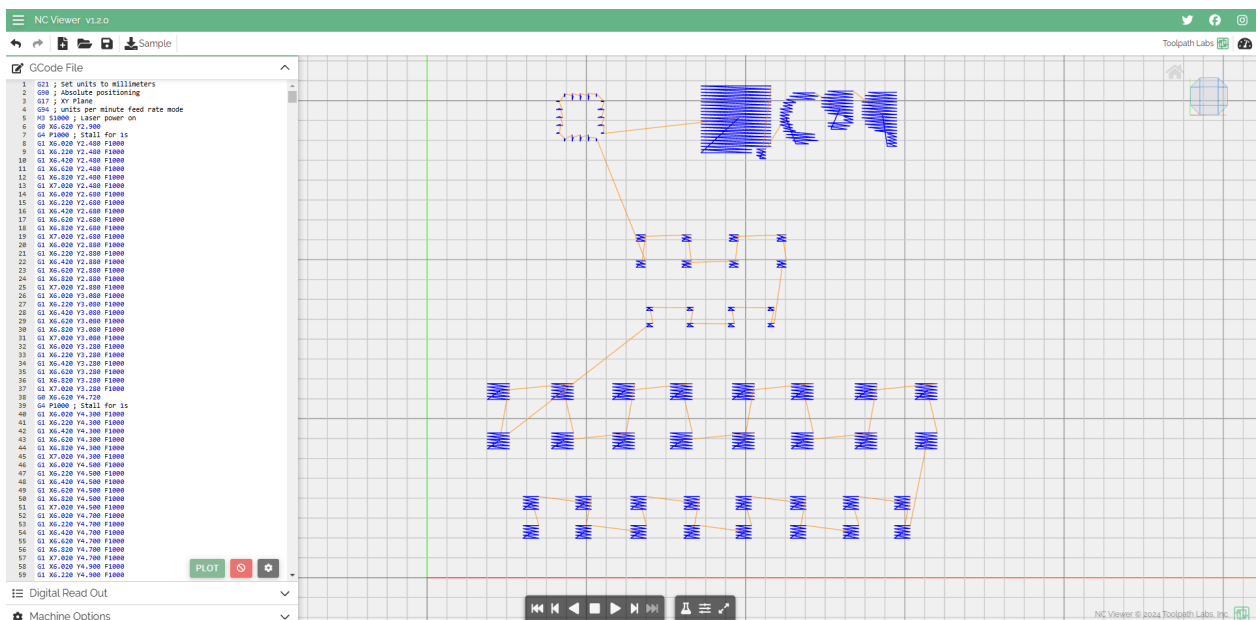


Рисунок 3.7 – Перевірка результуючого G-code у NC Viewer

Після перевірки G-коду в симуляційному середовищі буде здійснено практичне тестування на розробленому макеті лазерної системи пайки. Це дозволить оцінити взаємодію програмного забезпечення із апаратними компонентами системи, а також перевірити точність переміщення лазера, ефективність його розігріву та відповідність кінцевих результатів очікуваням. Такий підхід забезпечує комплексну перевірку роботи системи, від симуляцій до реального виконання.

3.5 Розрахунок освітлення та міри безпеки роботи з лазером

У зв'язку з тим, що передбачається робота оператора з запропонованим макетом, необхідно забезпечити відповідність його робочого місця здоровим умовам праці, встановленим певними правилами. Мікроклімат на робочому місці має відповідати таким параметрам:

– температура повітря у робочій зоні: допустимі значення – від 21 °С до 25 °С у холодний період року та від 22 °С до 28 °С у теплий період року; оптимальні значення – від 22 °С до 24 °С у холодний період року та від 23 °С до 25 °С у теплий період року;

– відносна вологість повітря: допустиме значення – не більше 75 % у холодний період року та не більше 55 % (при 28 °С) у теплий період року; оптимальне значення – від 40 % до 60 % незалежно від пори року;

– швидкість руху повітря: допустиме значення – не більше 0,1 м/с у холодний період року та від 0,1 м/с до 0,2 м/с у теплий період року; оптимальне значення – 0,1 м/с незалежно від пори року;

– освітлення приміщення або робочої зони, яке має бути спроектоване згідно з Державною будівельною нормою України ДБН В.2.5-28:2018.

Відповідно до норм освітлення [27], освітленість робочого приміщення від штучного освітлення має бути не менше 300 лк. Для забезпечення необхідних умов освітлення проведемо розрахунок світлового потоку, що падає на робочу поверхню, за формулою (3.1).

$$F = \frac{EKSZ}{\eta}, \quad (3.1)$$

де F – шуканий світловий потік, Лм;

E – нормована мінімальна освітленість, Лк; $E = 300$ Лк;

K – коефіцієнт запасу, що враховує зменшення світлового потоку лампи через забруднення освітлювальних приладів у процесі безпосередньої експлуатації (в нашому випадку $K = 1,5$);

S – площа, що освітлюється, м^2 ;

Z – відношення середньої освітленості до мінімальної (зазвичай приймається рівним від 1,1 до 1,2, в нашому випадку $Z = 1,1$);

η – коефіцієнт використання світлового потоку (табличне значення в залежності від індексу приміщення I , що обчислюється за наступною формулою:

$$I = \frac{S}{h(A+B)}, \quad (3.2)$$

де S – площа, що освітлюється, м^2 ;

h – висота встановлення освітлювальних приладів, м;

A та B – ширина та довжина зони відповідно, м.

Припустимо, що виробниче місце площею 4 м^2 , вимірами $2,5 \text{ м}$ та $1,6 \text{ м}$, висота встановлення освітлення дорівнює $2,9 \text{ м}$. Підставимо значення до формули (3.2) та отримуємо:

$$I = \frac{4}{2,9(2,5+1,6)} = 0,33.$$

Знаючи значення I знаходимо значення η згідно довідкової таблиці у ДБН В.2.5-28:2018 [27]. Значення η дорівнює $0,62$.

Підставимо всі значення у формулу (3.1) і отримаємо:

$$F = \frac{300 \cdot 1,5 \cdot 4 \cdot 1,1}{0,31} = 3194 \text{ Лм.}$$

Отже, нам потрібно отримати сумарний світловий потік у 3194 Лм, при світловому потоку однієї світлодіодної лампи типу T8 у 1620 Лм нам потрібно буде:

$$n = F/F_{\text{л}} = 3194/1620 = 1,94 = 2 \text{ шт.}$$

Отже, для освітлення робочого місця знадобиться 2 лампи типу T8, що дорівнює потужності освітлення у 15 Вт/м² згідно стандарту [27].

Основні положення безпеки регламентуються ДСТУ EN 60825-1:2017. Робота з лазером, що використовується для пайки радіоелементів, належить до обладнання класу 4 за рівнем небезпеки. Цей клас характеризується високою потужністю випромінювання, яке може становити серйозну загрозу для очей, шкіри, а також створювати ризик займання матеріалів.

Для забезпечення безпеки під час експлуатації лазерного обладнання необхідно дотримуватися таких заходів. Робоче місце має бути організоване в окремому приміщенні з обмеженим доступом, обладнане захисними екранами або кожухами, що мінімізують розсіювання лазерного випромінювання. Обов'язковим є використання засобів індивідуального захисту, таких як спеціальні лазерні окуляри, які відповідають довжині хвилі та потужності лазера.

Всі роботи повинні виконуватися відповідно до інструкцій із техніки безпеки, затверджених для цього виду обладнання. Перед початком робіт персонал має бути ознайомлений з потенційними ризиками, пройти інструктаж та навчання. Особливу увагу слід приділити пожежній безпеці, оскільки лазери класу 4 можуть викликати займання легкозаймистих матеріалів. Регулярний контроль параметрів лазера та перевірка захисного обладнання є обов'язковими для запобігання небезпечним ситуаціям.

3.6 Висновки до третього розділу

На початку цього розділу було проведено проектування програмного забезпечення. Систему від початку було розділено на ланки, кожна з котрих відповідала за свою функцію у загальному алгоритмі програмного забезпечення.

Були описані та наведено графічне зображення алгоритму пошуку місць пайки, алгоритму розрахунку траєкторії робочого інструменту, алгоритм перекладу масиву точок (траєкторії) у G-code, котрий вже можна відправляти до макету.

Була спроектована тестова плата у редакторі плат KiCAD, що включала резистори розповсюджених типорозмірів: 1206, 0805, 0603 та 0402. Також на платі було розміщено посадковий майданчик мікросхеми у корпусі UFQFPN-20 і графіку у вигляді логотипу KiCAD. Ця плата використовувалась як вхідні дані для розробленого програмного забезпечення.

Тестування та валідація вихідного G-code було спочатку проведено за допомогою графічного виводу розробленого програмного модуля та за допомогою онлайн візуалізатор NC-Viewer. Після успішного проходження перевірок на валідність було проведено тестування переміщення робочого інструменту на розробленому макеті, що дозволило оцінити успішну взаємодію програмного та апаратного забезпечення із апаратними компонентами. Цим сами було повністю підтверджено вірність налаштувань, що були зроблені у другому розділі.

Також було проведено розрахунок освітлення робочого місця згідно діючих норм освітлення та наведені положення безпеки роботи із лазерним інструментом та лазерним випромінюванням.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено детальний аналіз технологічного процесу лазерної пайки, включно з дослідженням обладнання, що використовується для цієї технології. Розглянуто переваги та недоліки лазерної пайки, а також сучасні тенденції її розвитку.

У практичній частині роботи здійснено підвищення ефективності та точності управління технологічним процесом лазерної пайки шляхом розробки системи на основі ЧПК. Створено структурну схему макету, обрано апаратні та програмні засоби для його реалізації. Розроблено 3D-модель макету, а деталі, оптимізовані для 3D-друку, виготовлено на 3D-принтері. Системне програмне забезпечення GRBL було адаптовано під розроблений макет, що дозволило отримати повністю зібрану та функціональну систему.

Для розробленого макету було спроектовано та реалізовано програмне забезпечення, яке генерує керуючу програму у вигляді G-code на основі вхідних даних – Gerber-файлів, що отримуються на етапі підготовки друкованих плат до виробництва. Сформульовано алгоритми управління процесом лазерної пайки, а також виконано моделювання та симуляцію технологічного процесу. На завершальному етапі було здійснено розрахунок параметрів освітлення та визначено основні заходи безпеки при роботі з лазером.

В результаті було отримано макет системи лазерної пайки з використанням ЧПК та програмну систему створення програми керування для технологічного процесу лазерної пайки компонентів друкованих плат у вигляді G-коду. В результаті вдалося досягти наступних параметрів: точність позиціонування лазерного променя зросла, середнє відхилення склало до 0,2 мм, ітераційний підхід до реалізації програмного ефективного переміщень зменшив кількість не робочих переміщень (команда G0) на 10% порівнюючи із початковою реалізацією. Також за допомогою автоматизації процесу лазерної пайки було зменшено вплив людського фактору, що дозволяє

уникнути помилок, пов'язаних із ручним налаштуванням, підвищено ефективність роботи із різними матеріалами за допомогою програмних налаштувань. Автоматизація забезпечила стабільну роботу обладнання протягом тривалого часу та повторюваність операцій.

Також, отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 8 "Гідна праця та економічне зростання", а саме п.8.2 "Підвищувати ефективність виробництва на засадах сталого розвитку та розвитку високотехнологічних конкурентних виробництв". Впровадження автоматизованої системи управління процесом лазерної пайки сприяє підвищенню ефективності виробництва завдяки застосуванню ЧПК та сучасних технологій. Розробка дозволяє: оптимізувати процеси пайки, сприяти розвитку високотехнологічного виробництва, забезпечувати сталість розвитку.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Текст]. – Введ. 2015-06-22. – К.: Держстандарт України, 2017. – 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. 49 с.
3. Development of CNC-Based Automated Soldering Machine. MDPI, 2023. URL: <https://www.mdpi.com>(дата звернення 23.12.2024).
4. Armendariz, E. Development of a Laser Solder Process for use with Material Extrusion Additive Manufacturing and Rapid Electronics Prototyping in Embedded Sensing Applications // Open Access Theses & Dissertations. – University of Texas at El Paso, 2021. – 157 с. URL: https://scholarworks.utep.edu/open_etd/3216(дата звернення 23.12.2024).
5. Tatsumi, H., Kaneshita, S., Kida, Y., Sato, Y., Tsukamoto, M., & Nishikawa, H.. Highly efficient soldering of Sn-Ag-Cu solder joints using blue laser. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, 82: 700-707.
6. Невлюдов І.Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 1: підручник. Харків: ФОП Панов А.М., 2021. – 604 с.
7. Nazarudin, M. Z. H., Abas, M. A., Wan Ahmad Kamil, W. M., Ahmad Nadzri, F. F., A. Zahiri, S., Mohd Sharif, M. F., ... & Zawawi, M. H.. Effect of different beam distances in laser soldering process: a numerical and experimental study. *Soldering & Surface Mount Technology*, 2024, Vol. 36, Part 5, P. 296-308.

8. Chen, X., Zhang, T., & Liu, Y. Інтелектуальне планування шляху в системах лазерної пайки з використанням сканування гальванометром і оптимізаційних алгоритмів для точності пайки // *International Journal of Intelligent Systems*. – 2022. – Т. 37, №2. – С. 451–462.
9. Bosse, L., Schildecker, A., Gillner, A., & Poprawe, R. High quality laser beam soldering. *Microsystem Technologies*, Vol. 7, No. 5, P. 215-219.
10. Дані, що базуються на термодинамічній моделі та методі управління зворотним зв'язком для процесу лазерної пайки // *Journal of Thermal Engineering*. – 2021. – Т. 5, №1. – С. 112–118.
11. Illyefalvi-Vitez, Z., Balogh, B., Baranyay, Z., Farmer, G., Harvey, T., Kirkpatrick, D., ... & Ruzsics, N. Laser soldering for lead-free assembly. 2007 30th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). 2007. p. 471-476.
12. Системи управління процесами лазерної обробки матеріалів // *Вісник сучасних технологій*. – 2020. – Т. 3, №4. – С. 25–30.
13. Огляд сучасних контролерів ЧПК для виробництва в умовах Індустрії 4.0 // *Автоматизація виробництва*. – 2022. – Т. 6, №3. – С. 43–50.
14. Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Максимова С.С. ВЕАМ робототехніка: Навчальний посібник. – Oktan Print – Prague.: 2024.- 276 с. з мал..
15. In depth: Control 28BYJ-48 Stepper Motor with ULN2003 Driver & Arduino. LastMinuteEngineers, 2024. URL: <https://lastminuteengineers.com/28byj48-stepper-motor-arduino-tutorial/> (дата звернення 23.12.2024).
16. Драйвер крокового двигуна ULN2003. Arduino.ua, 2024. URL: https://arduino.ua/ru/prod280-draiver-shagovogo-dvigatelya-uln2003?srsltid=AfmBOop8MlqJUPcOgjIs_IUosdHMFCDfsTG-AEZHUFstc6YAdsv6sDz6 (дата звернення 23.12.2024).
17. DRV8825 vs. A4988: How to Choose the Right Stepper Driver Boards. Xecor, 2024. URL: <https://www.xecor.com/blog/drv8825-vs-a4988> (дата звернення 23.12.2024).

18. End Stop Switch – PCB Mounted with Connectors and Wire. MechBlock, 2024. URL: <https://mechblock.in/p/end-stop-switch-pcb-mounted-with-connectors-and-wire/> (дата звернення 23.12.2024).

19. An open source, embedded, high performance g-code-parser and CNC milling controller written in optimized C that will run on a straight Arduino. GitHub, 2024. URL: <https://github.com/gnea/grbl> (дата звернення 1237.12.2024).

20. Universal G-code Sender. GitHub, 2024. URL: https://winder.github.io/ugs_website/ (дата звернення 23.12.2024).

21. GRBL Settings Pocket Guide. DIYMachining, 2024. URL: https://www.diy machining.com/downloads/GRBL_Settings_Pocket_Guide_Rev_B.pdf (дата звернення 23.12.2024).

22. Теорія автоматичного управління (збірник задач) [Текст]: навч. посіб. для студентів спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. - Харків: Панов А.М., 2020. – 240 с.

23. Micro-Cap 12 Electronic Circuit Analysis Program Reference Manual. Spectrum Software, 2018. URL: <https://www.iee.et.tu-dresden.de/~jmueller/simulation/soft/microcap/MC12.RefManual.pdf> (дата звернення 23.12.2024).

24. G-code Index. Marlin firmware, 2024. URL: <https://marlinfw.org/meta/gcode> (дата звернення 23.12.2024).

25. KiCad EDA - Schematic Capture & PCB Design Software // KiCad, 2024. URL: <https://www.kicad.org/> (дата звернення 23.12.2024).

26. NC Viewer // GCode Viewer and Machine Simulator. Toolpath Labs, Inc., 2024. URL: <https://ncviewer.com/> (дата звернення 23.12.2024)..

27. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. [Чинний від 2019-03-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с.