

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Юрій КИРИЧУК
«__» _____ 2026р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»**

**спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»**

на тему: «Автоматизація процесу виробництва ідентифікатор -табличок»

Виконала:
студентка III курсу, групи ПМ-зп31
Горелкова Ірина Володимирівна

Керівник:
ст.викладач, к.т.н.
Назаренко Наталія Миколаївна

Рецензент:
доц., к.т.н.
Маркін Максим Олександрович

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДПБ.ПМ-зп31.02.1760.00.000.ПЗ	Пояснювальна записка	68	
3	A1	ДПБ.ПМ-зп31.02.1760.00.001.СхС	Структурна схема системи автоматизованого виробництва ID-табличок	1	
4	A1	ДПБ.ПМ-зп31.02.1760.00.002.СхФ	Функціональна схема роботи автоматизованого комплексу	1	
5	A1	ДПБ.ПМ-зп31.02.1760.00.003.СхЕ	Схема системи керування CNC-комплексом	1	
6	A1	ДПБ.ПМ-зп31.02.1760.00.004.СхА	Автоматизоване формування CNC-програми та передавання G-коду до CNC-верстата	1	
7	A1	ДПБ.ПМ-зп31.02.1760.00.005.СхІ	Макет графічного інтерфейсу оператора	1	

				ДПБ.ПМ-зп31.02.1760.00.000.ПЗ		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Горелкова			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Назаренко					
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПМ-зп31	
Н/контр.						
Зав.каф.	Киричук					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизація процесу виробництва
металевих ідентифікатор-табличок»**

Київ – 2026року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

« ____ » _____ 2026р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Горєлковій Ірині Володимирівні**

1. Тема проєкту «Автоматизація процесу виробництва металевих ідентифікатор-табличок», керівник проєкту Назаренко Н.М., ст. викладач, к.т.н., затверджені наказом по університету від «25» травня 2025 р. №1887-с.
2. Термін подання студентом проєкту «05» червня 2026
3. Вихідні дані до проєкту: технічні характеристики CNC-обладнання, параметри систем керування та приводів, вимоги до процесу маркування металевих ID-табличок, програмно-апаратні засоби автоматизації.
4. Зміст пояснювальної записки включає: вступ; аналітичний огляд сучасного стану проблеми маркування та виготовлення металевих ID-табличок у промисловому виробництві; аналіз існуючих технологій механічного та CNC-маркування; формування вимог до автоматизованої системи виробництва ID-табличок; розробку структурної та функціональної схем автоматизованого CNC-комплексу маркування; опис взаємодії програмних та апаратних підсистем комплексу; розробку електричної принципової схеми та вибір елементної бази системи керування; розробку алгоритмічно-програмного забезпечення автоматизованого комплексу, включаючи алгоритм роботи, формування керуючих програм (G-коду) та програмне забезпечення CNC-контролера; розробку макету графічного інтерфейсу користувача; апробацію та тестування розроблених алгоритмічно-програмних рішень; економічне обґрунтування доцільності впровадження автоматизованої системи виробництва металевих ID-табличок; загальні висновки та перелік використаних джерел.
5. Перелік графічного матеріалу включає: структурну схему автоматизованої системи виробництва ID-табличок; функціональну схему роботи CNC-комплексу маркування; схему автоматизованого формування та передавання керуючих програм

(G-коду); структурну схему взаємодії програмного забезпечення CNC-контролера GRBL з апаратною частиною комплексу; схему відкритого позиційного керування осями CNC-комплексу; електричну принципову схему автоматизованої системи.

6. Дата видачі завдання «__» _____ 2026р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд сучасного стану проблеми маркування та виготовлення металевих ID-табличок у промисловому виробництві.	19.03.2025	
2	Аналіз існуючих технологій механічного та CNC-маркування і формування вимог до автоматизованої системи виробництва ID-табличок.	11.04.2025	
3	Розробка структурної та функціональної схем автоматизованого CNC-комплексу маркування ID-табличок.	21.04.2025	
4	Розробка електричної принципової схеми та вибір елементної бази системи автоматизованого керування CNC-комплексом.	19.05.2026	
5	Розробка алгоритмічно-програмного забезпечення автоматизованого комплексу, включаючи алгоритм роботи та автоматичне формування керуючих програм (G-коду).	28.05.2026	
6	Розробка макету графічного інтерфейсу користувача програмного забезпечення автоматизованої системи.	05.05.2026	
7	Проведення апробації та тестування алгоритмічно-програмного забезпечення автоматизованого CNC-комплексу.	18.05.2026	
8	Оцінка економічної ефективності впровадження автоматизованої системи виробництва металевих ID-табличок.	22.05.2026	
9	Оформлення вступу та загальних висновків дипломного проєкту.	25.05.2026	
10	Оформлення пояснювальної записки, списку використаних джерел, додатків та підготовка матеріалів до захисту.	01.06.2026	

Студентка

Ірина ГОРЕЛКОВА

Керівник

Наталія НАЗАРЕНКО

Анотація

У дипломному проєкті розглянуто питання автоматизації системи виробництва металевих ID-табличок на основі CNC-технологій. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення точності, продуктивності та стабільності процесів маркування в умовах сучасного промислового виробництва, а також зменшення впливу людського фактору.

У роботі виконано аналітичний огляд існуючих технологій механічного та CNC-маркування, проаналізовано недоліки ручного й напівавтоматичного виготовлення табличок та обґрунтовано доцільність застосування автоматизованих рішень. Розроблено структурну та функціональну схеми автоматизованого CNC-комплексу маркування ID-табличок, а також електричну принципову схему системи керування.

Виконано вибір елементної бази системи автоматизації, зокрема CNC-контролера на базі мікроконтролерної платформи Arduino з прошивкою GRBL, приводів осей, датчиків та шпинделя. Розроблено алгоритмічно-програмне забезпечення автоматизованого комплексу, описано процес автоматичного формування керуючих програм (G-коду) та взаємодію програмної й апаратної частин системи. Запропоновано макет графічного інтерфейсу користувача.

Проведено апробацію алгоритмічно-програмного забезпечення шляхом функціонального та логічного тестування без використання фізичного CNC-обладнання. Виконано економічне обґрунтування доцільності впровадження автоматизованої системи виробництва ID-табличок.

Ключові слова: автоматизація, CNC-технології, ID-таблички, маркування, G-код, GRBL, автоматизований комплекс.

Annotation

The diploma project is devoted to the automation of a metal ID plate production system based on CNC technologies. The relevance of the topic is determined by the need to increase accuracy, productivity, and process stability in industrial marking operations, as well as to reduce the influence of the human factor.

The project presents an analytical review of existing mechanical and CNC marking technologies and analyzes the disadvantages of manual and semi-automated plate manufacturing. The feasibility of implementing an automated solution is substantiated. Structural and functional diagrams of an automated CNC marking complex are developed, along with the electrical schematic of the control system.

The selection of the system's hardware components is carried out, including a CNC controller based on an Arduino microcontroller platform with GRBL firmware, axis drives, sensors, and a spindle. Algorithmic and software solutions for the automated complex are developed, including automatic G-code generation and the interaction between software and hardware components. A conceptual graphical user interface layout is proposed.

The developed algorithmic and software solutions were tested using functional and logical testing methods without physical CNC equipment. An economic justification of the automated ID plate production system implementation is also provided.

Keywords: automation, CNC technologies, ID plates, marking, G-code, GRBL, automated system.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП.....	10
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА	
ID-ТАБЛИЧОК	12
1.1 Актуальність теми та сфера застосування ідентифікаційних табличок.....	12
1.2 Огляд технологій виготовлення та маркування металевих ID-табличок.....	13
1.3 Аналіз недоліків ручного та напівавтоматичного виробництва табличок.....	19
1.4 Мета та завдання дипломного проєкту	21
Висновки до розділу 1.....	22
2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА ID-ТАБЛИЧОК.....	24
2.1 Вимоги до автоматизованої системи виробництва.....	24
2.2 Структурна схема системи автоматизованого виробництва ID-табличок.....	26
2.3 Функціональна схема роботи автоматизованого комплексу	28
2.4 Опис підсистем та їх взаємодії.....	31
Висновки до розділу 2.....	33
3. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ СИСТЕМИ.....	34
3.1. Розробка електричної принципової схеми.....	34
3.2. Розрахунок та вибір елементної бази:	37
3.2.1. Вибір контролера системи управління (GRBL / Arduino / STM32 / PLC).....	37
3.2.2 Вибір приводів та двигунів осей CNC	40
3.2.3 Вибір датчиків (кінцевих перемикачів, індикаторів)	42
3.2.4 Вибір інструменту та шпинделя	44
3.3 Розробка переліку елементів структурної та електричної схеми.....	45
Висновки до розділу 3.....	46
4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІЧНО-ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ	48

4.1 Формування алгоритму роботи автоматизованого комплексу.....	48
4.2 Автоматизоване формування та передавання G-коду.....	49
4.3 Програмне забезпечення CNC-контролера (GRBL)	51
4.4 Розробка макету графічного інтерфейсу програмного забезпечення системи.....	55
4.5 Апробація та тестування роботи системи.....	57
Висновки до розділу 4.....	60
5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОНАНИХ РОЗРОБОК	62
5.1 Аналіз вартості впровадження автоматизованої системи.....	62
5.2 Порівняння витрат ручного та автоматизованого виробництва табличок.....	63
5.3 Економічний ефект від автоматизації	63
Висновки до розділу 5.....	64
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	67

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

CNC - числове програмне керування.

G-код- мова програмування CNC-верстатів для задання траєкторій руху інструмента та режимів обробки.

GRBL- відкрита прошивка CNC-контролера для мікроконтролерів, що забезпечує інтерпретацію G-коду та керування приводами осей.

STEP/DIR- сигнали керування кроковими двигунами: імпульси кроку (STEP) та напрямку обертання (DIR).

PLC - програмований логічний контролер.

CAD -(Computer-Aided Design) комп'ютерне проектування.

CAM - (Computer-Aided Manufacturing) комп'ютерна підготовка виробництва.

PWM - (Pulse Width Modulation) широтно-імпульсна модуляція.

DC - постійний струм.

UGS - (Universal Gcode Sender) програмне забезпечення для передавання G-коду до CNC-контролера.

E-STOP - аварійна зупинка.

NO / NC - нормально розімкнений / нормально замкнений контакт.

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку промисловості та інструментального виробництва особливої уваги набуває автоматизація технологічних процесів, що потребують високої точності, повторюваності та продуктивності. Одним із таких процесів є виготовлення ідентифікаційних табличок (ID-табличок), які використовуються для маркування промислового обладнання, деталей, вузлів та виробів. Такі таблички містять технічні параметри, серійні номери, інформацію про виробника, попереджувальні позначення та інші дані, необхідні для ідентифікації та експлуатації продукції.

Процес виготовлення табличок традиційними методами часто є трудомістким, вимагає застосування ручних операцій і суттєво залежить від кваліфікації працівників. Це призводить до збільшення ймовірності помилок, нестабільної якості гравіювання, низької продуктивності та високої собівартості виробництва. Із поширенням індивідуальних маркувальних рішень та зростанням вимог до простежуваності продукції ці недоліки стають критичними.

Сучасні CNC-технології (Computer Numerical Control), системи автоматизованого керування, цифрове програмування траєкторій інструмента та доступність мікропроцесорних засобів дають змогу підвищити ефективність виробництва ID-табличок. Впровадження автоматизованої системи виготовлення табличок дозволяє забезпечити стабільну якість маркування, зменшити кількість ручних операцій, уніфікувати процес обробки інформації та скоротити виробничі витрати.

Актуальність теми зумовлена зростаючою потребою у впровадженні комп'ютерно-інтегрованих систем у приладо- та машинобудуванні, де швидкий доступ до ідентифікаційних даних є необхідною умовою для технічного обліку, сервісного обслуговування, ремонту та модернізації обладнання. Застосування автоматизованих CNC-систем у виробництві ID-табличок відкриває можливість

гнучкої зміни формату табличок, оперативного внесення текстової інформації та масштабування виробничого процесу без залучення додаткового персоналу.

Метою дипломного проєкту є автоматизація системи виробництва металевих ID-табличок на основі CNC-технологій з метою підвищення точності, продуктивності та стабільності процесу маркування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналітичний огляд сучасних технологій механічного маркування та засобів автоматизації процесу виготовлення ID-табличок.
2. Проаналізувати існуючий виробничий процес та визначити його вузькі місця, зумовлені участю оператора.
3. Розробити структурну схему автоматизованої системи виробництва табличок, визначити її функціональні модулі.
4. Виконати вибір CNC-обладнання та елементної бази для системи автоматизації.
5. Розробити алгоритмічно-програмне забезпечення для автоматизованого маркування табличок.
6. Оцінити ефективність упровадження автоматизованої системи.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ID-ТАБЛИЧОК

1.1 Актуальність теми та сфера застосування ідентифікаційних табличок

Ідентифікаційні таблички відіграють важливу роль у промисловому виробництві, оскільки забезпечують маркування обладнання, елементів інфраструктури, кабельних та трубопровідних систем, що мають експлуатуватися тривалий час та зберігати читабельність у складних умовах [1]. Металеві таблички використовуються тоді, коли необхідна висока стійкість маркування та захист інформації від механічного та хімічного впливу [1].

На більшості підприємств процес маркування виконується оператором вручну: він вибирає заготовку, вводить дані до програми та контролює результат обробки. Ручне введення даних суттєво збільшує ймовірність помилок, знижує швидкість виробництва та підвищує витрати підприємства [2]. Крім того, зростання вартості робочої сили та збільшення обсягів продукції змушують підприємства переходити до автоматизованих рішень [2].

Автоматизація виробничих процесів дозволяє значно зменшити участь людини в рутинних операціях, підвищити якість обробки та забезпечити стабільні параметри маркування [3]. Застосування CNC-технологій (Computer Numerical Control) під час виробництва ID-табличок забезпечує високу точність нанесення символів, повторюваність геометричних параметрів та можливість інтеграції з виробничими базами даних [3].

Таким чином, актуальність автоматизації системи виробництва ID-табличок визначається необхідністю:

- підвищення точності та єдиного формату маркування;
- усунення людських помилок під час введення даних;
- скорочення часу виготовлення табличок;
- зниження виробничих витрат при збереженні якості.

Ці фактори роблять автоматизацію процесу виготовлення ID-табличок логічним етапом розвитку підприємств, що впроваджують сучасні комп'ютерно-інтегровані технології у виробництво [4].

1.2 Огляд технологій виготовлення та маркування металевих ID-табличок

Для нанесення постійного маркування на металеві таблички у промисловості застосовуються різні технології, вибір яких визначається вимогами до точності, довговічності, собівартості та типу матеріалу. Найпоширенішими є: лазерне маркування, CNC-фрезерування, мікроударне маркування, гравіювання (риття) та штампування [1].

Лазерне маркування є однією з найсучасніших технологій нанесення інформації на металеві поверхні. Принцип роботи полягає у локальній зміні структури поверхневого шару матеріалу під впливом сфокусованого лазерного променя. Лазер випромінює когерентне світло з точно визначеною довжиною хвилі, яка поглинається матеріалом заготовки, перетворюється на теплову енергію та викликає його оплавлення або зміну кольору поверхні [1]. У результаті формується висококонтрастний, немазкий і стійкий до зовнішніх впливів знак, що не може бути стертий без видимого порушення поверхні.

На відміну від механічних методів, лазерне маркування здійснюється безконтактно. Це означає відсутність фізичного інструменту, який контактує з матеріалом, а отже — немає зносу ріжучих елементів, необхідності їх заміни або корекції геометрії. Довговічність обладнання та мінімальні витрати на сервіс роблять цю технологію привабливою для підприємств з великими серіями продукції [1].

Лазерні установки промислового призначення (наприклад, eMark DLA, представлений на рис. 1.1) використовують програмне керування, яке дає можливість формувати шрифти будь-якої складності, наносити QR- та DataMatrix-коди, логотипи, серійні номери та службові маркувальні позначення без зміни

робочого інструменту [2]. Це робить технологію придатною для автоматизованих виробничих ліній, де висока швидкість переналаштування є критичною вимогою.

Лазерне маркування також дозволяє працювати з матеріалами різної відбивної здатності. Зазначено, що зміна довжини хвилі лазерного випромінювання забезпечує підвищення коефіцієнта поглинання матеріалу таблички, що на пряму впливає на якість і контрастність маркування [1]. Таким чином, технологія легко адаптується до сталі, алюмінію, латуні та інших сплавів.



Рис. 1.1. Приклад лазерного маркувального пристрою eMark DLA [2].

Однак, разом із численними перевагами, лазерне маркування має і технологічні обмеження. По-перше, лазерні установки мають значну ціну придбання та вимагають кваліфікованого налаштування. До вартості додається потреба у витяжних системах, оскільки під час оплавлення поверхні утворюються мікрочастинки металу та продукти термічного розкладу, які не можна випускати у приміщення. По-друге, для деяких високорефлексивних металів (наприклад, полірованої сталі) потрібні дорогі імпульсні лазери з короткою довжиною хвилі.

Попри це, у сучасних умовах саме лазерне маркування розглядається як еталон промислового маркування для автоматизованих виробництв, оскільки поєднує довговічність, гнучкість та можливість повної інтеграції в цифрові виробничі платформи.

CNC-фрезерування (Computer Numerical Control Milling) є однією з найпоширеніших технологій механічного маркування металевих виробів, у тому числі ID-табличок. Суть процесу полягає у видаленні шару матеріалу заготовки за допомогою ріжучого інструмента — фрези, яка переміщується по координатних осях згідно із заздалегідь сформованою програмою [3]. На відміну від ручних операцій, де якість маркування залежить від кваліфікації працівника, у CNC-системах точність позиціонування визначається параметрами приводу та контролера, що забезпечує повторюваність усіх геометричних характеристик.

Фрезерування є особливо корисним у випадках, коли необхідно створити рельєфний напис чи глибоке гравіювання, яке не можна стерти або замалювати без пошкодження поверхні. Це робить технологію придатною для маркування табличок, які містять інформацію, важливу протягом усього терміну експлуатації обладнання: серійних номерів, заводських шифрів, інвентарних кодів, попереджувальних позначень тощо [3].

Сучасні CNC-маркерні системи використовують сервоприводи або крокові двигуни, що дозволяють переміщати інструмент у тривимірному просторі з точністю до кількох сотих часток міліметра. Для виготовлення табличок зазвичай застосовується твердосплавна або алмазна фреза, що забезпечує можливість обробки твердих металів, таких як нержавіюча сталь, латунь чи анодований алюміній.

На рис. 1.2 наведено приклад фрезерного комплексу Komras H-400 HF, який може працювати у цілком автоматизованому режимі, виконуючи як обробку контурів, так і нанесення шрифтової інформації [4]. Важливою перевагою таких станцій є можливість інтеграції з програмним забезпеченням CAD/CAM, що дозволяє автоматично генерувати траєкторії інструмента на основі креслення або текстових даних.

Попри всю універсальність технології, CNC-фрезерування має низку особливостей, які впливають на вибір обладнання. По-перше, процес супроводжується утворенням стружки, що потребує аспіраційної системи або регулярно очищуваного робочого простору. По-друге, фрези поступово

зношуються, що впливає на глибину та контур символів і вимагає їх періодичної заміни. По-третє, продуктивність методу залежить від матеріалу: тверді метали обробляються повільніше, що збільшує тривалість циклу.

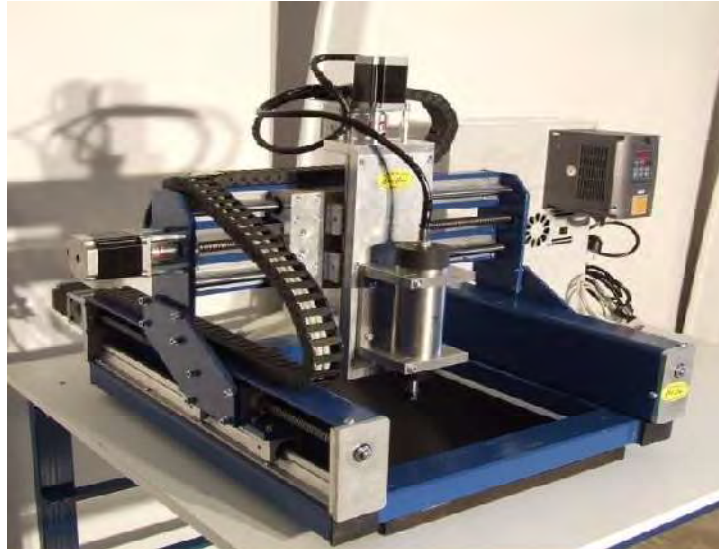


Рис. 1.2. CNC-фрезерний комплекс Komras H-400 HF [4].

Однак у порівнянні з лазерним маркуванням, CNC-фрезерування є менш капіталоемним та має нижчі вимоги до безпеки робочого середовища, що робить його доступним рішенням для малих і середніх виробництв.

Мікроударне маркування є технологією, що формує інформаційні символи шляхом серії високочастотних ударів маркирувального інструмента по поверхні матеріалу. Кожен удар утворює окрему точку, а набір точок формує літери, цифри або графічні елементи [5]. На відміну від фрезерування, інструмент не знімає матеріал, а деформує його поверхню, що забезпечує стійкість маркування навіть після фарбування або нанесення лакового покриття.

Головною перевагою мікроударної технології є її невибагливість до матеріалу. Вона застосовується для маркування сталевих, чавунних, латунних та алюмінієвих деталей без зміни інструмента. Такий підхід робить систему універсальною у виробництвах із широкою номенклатурою деталей.

У роботі [5] описано маркувальний модуль P1 (рис. 1.3), який використовує пневматичний або електромагнітний привід для формування ударів і забезпечує

швидкість нанесення кількох десятків символів за секунду. Система не потребує складної підготовки поверхні, легко інтегрується з автоматизованими лініями та є однією з найдешевших у впровадженні серед усіх розглянутих методів.

Основним недоліком мікроударного маркування є акустичний шум, спричинений частими ударами інструмента. У деяких випадках потрібне шумозахисне огороження. Окрім того, метод менш підходить для нанесення складної графіки та дрібних елементів, де потрібна висока роздільна здатність.



Рис. 1.3. Мікроударний маркувальний пристрій P1 [5].

Гравіювання (риття) є однією з найстаріших технологій нанесення маркування, але не втратило актуальності через свою простоту та високу читабельність. На відміну від мікроударного методу, гравіювання передбачає контрольований зріз матеріалу різальним інструментом, який рухається по траєкторії символів [6].

Сучасні гравірувальні головки, зокрема модель ASM40150 (рис. 1.4), оснащуються алмазними чи твердосплавними різцями та можуть працювати з високою точністю позиціонування. У порівнянні з фрезеруванням, гравіювання потребує менших сил різання та генерує мінімальну кількість стружки, що знижує вимоги до системи очищення.

Ця технологія широко використовується для нанесення VIN-кодів, шильдиків підприємств та інвентарних табличок, які повинні залишатися читабельними після десятків років експлуатації. Головним недоліком залишається обмежена продуктивність у випадку великих обсягів виробництва — тривалість циклу маркування зростає пропорційно довжині тексту та складності символів.



Рис. 1.4. Гравіювальна головка ASM40150 [6].

Штампування - це технологія, що базується на пластичній деформації металу під дією інструмента з профілем символу. Метод є одним із найдоступніших завдяки низькій вартості оснащення і простоті реалізації [7]. Штампувальні пристрої зазвичай не потребують складної системи керування, а символ наноситься за один удар, що робить технологію продуктивною у випадку повторюваних завдань.

На рисунку 1.5 продемонстровано пневматичний ударний пристрій, який дозволяє здійснювати маркування у напівавтоматичному режимі без прямої участі оператора в кожному циклі.



Рис. 1.5. Пневматичний ударний пристрій [7].

Основним недоліком методу є обмеженість шрифтів та неможливість нанесення складних графічних елементів.

Для узагальнення основних характеристик розглянутих технологій маркування у таблиці 1.1 наведено їх порівняльний аналіз за критеріями переваг, недоліків та вартості обладнання.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика технологій маркування металевих ID-табличок

Технологія	Переваги	Недоліки	Вартість
Laser eMark DLA	Відсутність зносу інструменту	Висока вартість обладнання	18500€
Kompas H-400 HF (фрезерування)	Можливість нанесення різноманітної графіки	Підвищений рівень шуму, утворення відходів	1930€
Mikrouder P1	Не потребує витратних матеріалів	Шум під час роботи	6000€
Rytie ASM40150 (гравіювання)	Низький рівень шуму	Необхідність жорсткого закріплення заготовки	7100€
Вирубубання (штампування)	Висока швидкість виконання	Обмежена форма символів	1400€

Як видно з таблиці 1.1, лазерні системи забезпечують найвищу якість маркування, однак характеризуються значною вартістю, тоді як механічні методи є більш доступними, проте мають технологічні обмеження, що підтверджує доцільність вибору CNC-рішень для автоматизованого виробництва ID-табличок.

1.3 Аналіз недоліків ручного та напівавтоматичного виробництва табличок

Традиційні технології виготовлення металевих ідентифікаційних табличок, що застосовуються на багатьох підприємствах, значною мірою ґрунтуються на ручних або напівавтоматичних операціях. Незважаючи на відносну простоту обладнання та відсутність значних інвестицій у технічні засоби, такі системи мають низку суттєвих недоліків, що стають критичними за умов сучасних виробничих вимог.

Перш за все, ручні операції характеризуються залежністю якості маркування від кваліфікації оператора. Навіть за наявності шаблонів та фіксаторів, точність

нанесення символів, рівність рядків та глибина гравіювання часто коливаються в широких межах. Це призводить до нерівномірності якості табличок одного зразка та порушення стандартів ідентифікації. У роботі [1] також зазначається, що ручні процеси створюють ризик перенесення людських помилок на кінцеву продукцію, що ускладнює її застосування в серійних виробництвах.

Другим суттєвим недоліком є низька продуктивність. Оператор виконує послідовність однотипних дій: підбір заготовки, закріплення її на робочій поверхні, введення даних, нанесення символів та візуальний контроль готової таблички. За таких умов час виробництва однієї одиниці маркування може становити від кількох хвилин до десятків хвилин, що є неприйнятним для великих обсягів випуску. На підприємствах, де кожна табличка містить унікальні дані (серійний номер, дата виготовлення, технічні параметри), цей процес повторюється для кожної позиції, що значно збільшує загальний виробничий цикл [2].

До недоліків ручного виробництва також належить обмежена можливість відтворення складних елементів. Наприклад, нанесення QR-кодів, DataMatrix-ідентифікаторів, детальних логотипів або дрібного технічного тексту потребує надто високої точності, якої неможливо досягти без цифрового контролю траєкторії інструмента. У таких випадках ручне або напівавтоматичне маркування стає джерелом відмови або потребує додаткових операцій, що збільшує собівартість виробництва [3].

Ще одним важливим фактором є висока ймовірність помилки під час введення даних. Якщо оператор вручну вводить текст або числові параметри, особливо в умовах багатозмінного режиму роботи, виникає ризик помилкового друку, пропуску символів, неправильного шрифту чи формату. Усунення таких помилок потребує переробки таблички або виготовлення нової, що веде до збільшення витрат на матеріали та час простою обладнання.

Напівавтоматичні системи частково знижують навантаження на оператора, проте все одно вимагають його участі на ключових етапах — від підготовки заготовки до контролю результату маркування. У роботі [4] зазначено, що саме

людський фактор залишається головним джерелом нестабільності параметрів маркування, навіть якщо частина операцій автоматизована.

Крім того, ручні і напіваавтоматичні способи погано інтегруються з сучасними інформаційними системами виробництва. Оскільки маркування не генерується автоматично з бази даних, неможливим стає впровадження єдиного цифрового ланцюга «виріб — ідентифікатор — виробнича система», що є вимогою стандартів Industry 4.0. Таким чином, підприємство не може забезпечити повну простежуваність виробу протягом усього життєвого циклу.

Проблеми, що виникають під час традиційного виробництва табличок, можна узагальнити таким чином:

- залежність якості від оператора;
- низька швидкість та неможливість серійного виготовлення;
- обмеження на складність символів та графіки;
- ймовірність помилок при введенні даних;
- відсутність інтеграції з цифровими системами управління виробництвом;
- збільшення собівартості через переробки та контроль якості.

З огляду на ці недоліки, подальший розвиток систем маркування вимагає переходу до повної автоматизації, що дозволяє усунути участь людини на найкритичніших етапах та інтегрувати систему виробництва табличок у цифрову інфраструктуру підприємства.

1.4 Мета та завдання дипломного проєкту

Мета дипломного проєкту визначає кінцевий результат, якого необхідно досягти під час виконання роботи, а завдання — це конкретні етапи, що забезпечують її досягнення.

Метою даного дипломного проєкту є автоматизація системи виробництва металевих ID-табличок на основі CNC-технологій з метою підвищення точності, продуктивності та стабільності процесу маркування.

Це формулювання є узагальненим і відповідає вимогам до побудови мети для інженерних кваліфікаційних робіт, адже охоплює як технологічний аспект (CNC-керування), так і функціональний результат (стабільна якість маркування та зменшення впливу людського чинника).

Для реалізації поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Провести аналітичний огляд сучасних технологій механічного маркування та засобів автоматизації процесу виготовлення ID-табличок.
2. Проаналізувати існуючий виробничий процес та визначити його вузькі місця, зумовлені участю оператора.
3. Розробити структурну схему автоматизованої системи виробництва табличок, визначити її функціональні модулі.
4. Виконати вибір CNC-обладнання та елементної бази для системи автоматизації.
5. Розробити алгоритмічно-програмне забезпечення для автоматизованого маркування табличок.
6. Оцінити ефективність упровадження автоматизованої системи.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було проведено комплексний аналіз сучасного стану технологій виготовлення та маркування металевих ID-табличок. Результати дослідження показали, що ідентифікаційні таблички є невід'ємним елементом промислових виробів, забезпечують зберігання інформації про об'єкт та його технічні характеристики і використовуються протягом усього життєвого циклу обладнання. Саме тому вимоги до їх довговічності, точності та читабельності постійно зростають.

Проведений огляд існуючих технологій маркування — лазерного, фрезерного, мікроударного, гравіювального та штампувального — засвідчив, що кожна з них має свої технічні переваги та експлуатаційні обмеження. Однак жодна з традиційних

технологій у ручному чи напіваавтоматичному виконанні не забезпечує необхідної стабільності, повторюваності та інтегрованості у цифрові виробничі системи.

Аналіз чинних процесів окреслив ключові недоліки ручного та частково автоматизованого виробництва табличок: залежність якості маркування від оператора, низьку продуктивність, обмежену точність формування символів, високу ймовірність помилки під час введення даних та повну відсутність інтеграції з сучасними інформаційними системами підприємства. Ці фактори стримують виробничі можливості підприємств і суперечать концепціям цифрової трансформації промисловості.

На основі ідентифікованих проблем сформульовано мету дипломного проєкту та перелік завдань, спрямованих на автоматизацію системи виробництва ID-табличок, яка усуває недоліки традиційних підходів і відповідає сучасним вимогам до точності, продуктивності та цифрової інтеграції. Це визначає подальший напрям роботи та обґрунтовує необхідність розробки системи, що буде розглянута у наступних розділах.

2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА ID-ТАБЛИЧОК

2.1 Вимоги до автоматизованої системи виробництва

Автоматизована система виробництва металевих ID-табличок є складною інженерною структурою, що поєднує механічні, електронні, програмні та інформаційні компоненти для реалізації безперервного процесу маркування. Вона повинна забезпечувати повторюваний, стабільний і контрольований цикл виготовлення табличок із мінімальною участю оператора. Формування вимог до такої системи є важливим етапом її проектування, оскільки саме вони визначають як архітектуру програмного забезпечення, так і конфігурацію технологічного обладнання, засобів вимірювання та контролю.

Загальні вимоги. Система має працювати в умовах промислової експлуатації, забезпечуючи високу надійність, довговічність та сумісність із наявними виробничими процесами підприємства. Вона повинна виконувати весь комплекс операцій — від отримання даних про табличку до формування готового виробу. Важливо, щоб цей процес міг здійснюватися без ручного втручання на ключових етапах, оскільки саме людський фактор є основним джерелом помилок, непередбачуваності та втрати продуктивності.

Функціональні вимоги:

1. Автоматизація формування маркування. Система повинна приймати вхідні дані з інтерфейсу оператора, з бази даних підприємства або з іншої інформаційної системи. Дані можуть містити серійний номер, рік виготовлення, технічні параметри, QR-код або DataMatrix-код відповідно до стандарту ISO/IEC 16022 [8]. На основі цих даних система повинна автоматично генерувати оптимальне представлення маркувальної інформації.

2. Автономне генерування керуючого G-коду. G-код є універсальною мовою для керування CNC-обладнанням. Система повинна формувати цей код без

залучення програміста чи оператора, використовуючи алгоритми побудови траєкторій та шрифтів. Це дозволяє адаптуватися до різних типів табличок без зміни апаратної частини комплексу.

3. Керування виконавчими механізмами. До складу системи входять приводи подачі, затискачі, датчики положення та CNC-центр. Усі ці компоненти повинні працювати під контролем центрального керуючого модуля. Він має забезпечувати точність позиціонування інструмента, стабільність обробки поверхні та синхронізацію рухів обладнання.

4. Контроль якості готових табличок. Після завершення операції система повинна забезпечити контроль результату. Це може бути візуальний огляд оператором, використання технічного зору або порівняння отриманих параметрів із допустимими значеннями. У разі відхилення система повинна повідомляти оператора або блокувати видачу некоректного виробу.

Технічні вимоги:

1. Точність нанесення символів не повинна бути нижчою за 0,05 мм, що гарантує чіткість навіть дрібних символів.

2. Сумісність із матеріалами, які найчастіше застосовуються у виробництві табличок: нержавіюча сталь, латунь, алюміній.

3. Стійкість маркування до впливу температури, вологи, ультрафіолетового випромінювання та хімічних реагентів. Маркування повинно залишатися читаємо протягом усього терміну експлуатації обладнання, для якого створена табличка.

Експлуатаційні вимоги:

1. Зручність використання. Інтерфейс повинен бути інтуїтивно зрозумілим. Оператор не має виконувати спеціальних технічних процедур: достатньо лише вибрати тип таблички та занести дані. Усі інші дії система виконує автоматично.

2. Мінімізація впливу людського фактору. Будь-яка ручна операція збільшує ризик помилки. На виробництвах із великою кількістю маркувальних операцій навіть незначна похибка призводить до браку продукції. Тому участь оператора повинна бути обмежена лише до контролю процесу.

3. Гнучкість конфігурації. Система повинна легко адаптуватися до зміни розмірів таблички, шрифтів, символів та форматів маркування без переналаштування обладнання.

Інформаційні вимоги:

1. Підтримка обміну даними з корпоративними системами (ERP/MES). Це дає змогу впроваджувати електронні паспорти на вироби, автоматично присвоювати серійні номери та відстежувати життєвий цикл обладнання відповідно до вимог ДСТУ ISO 9001:2015 [9].

2. Протоколювання операцій. Система повинна фіксувати дату, час, вміст маркування та параметри обробки, що необхідно для технічного аудиту та контролю якості.

Безпекові вимоги:

1. Електрообладнання має відповідати вимогам стандарту ДСТУ EN 60204-1:2015 [10].

2. Робоча зона повинна мати захисне огороження або датчики безпеки.

3. Вплив небезпечних факторів (стружка, лазерне випромінювання, шум) має бути мінімізований.

Сформульовані вимоги створюють технічне та методологічне підґрунтя для проектування автоматизованої системи виробництва ID-табличок. Вони визначають необхідний склад функціональних модулів, параметри точності обробки, логіку обміну інформацією та рівень автоматизації, що дозволяє перейти до побудови структурної схеми системи.

2.2 Структурна схема системи автоматизованого виробництва ID-табличок

Структурна схема автоматизованої системи виробництва металевих ID-табличок відображає взаємозв'язки між основними апаратними та програмними модулями комплексу, а також послідовність обробки інформації і матеріальних

потоків у процесі маркування. Вона є базою для подальшого проектування функціональної схеми та алгоритмів роботи системи.

Загальна архітектура системи побудована за модульним принципом і включає такі основні компоненти:

- модуль введення даних та база даних маркувальної інформації;
- програмний модуль формування G-коду (GRBL Controller);
- система керування CNC-обладнанням;
- CNC-маркувальний комплекс;
- підсистема подачі та фіксації заготовок;
- підсистема контролю якості;
- інтерфейс взаємодії з оператором.

На першому етапі відбувається введення маркувальної інформації через інтерфейс користувача або автоматично з корпоративної бази даних підприємства. Введені дані передаються до програмного модуля, де здійснюється їх перевірка, форматування та формування графічного представлення майбутнього маркування.

Далі програмний модуль виконує автоматичне генерування керуючого G-коду, який визначає траєкторію руху інструмента, швидкість обробки та глибину нанесення символів. Сформований код передається до системи керування, яка забезпечує синхронізовану роботу виконавчих механізмів CNC-комплексу.

CNC-комплекс здійснює безпосереднє нанесення маркування на металеву заготовку. Подача та фіксація табличок у робочій зоні реалізується окремою підсистемою, що забезпечує точне позиціонування виробу та його стабільне закріплення під час обробки.

Після завершення маркування табличка передається до підсистеми контролю якості, де здійснюється перевірка відповідності нанесених символів заданим параметрам. У разі виявлення відхилень система може сформувати повідомлення оператору або ініціювати повторний цикл обробки.

Загальна структурна схема системи автоматизованого виробництва ID-табличок наведена на рис. 2.1.

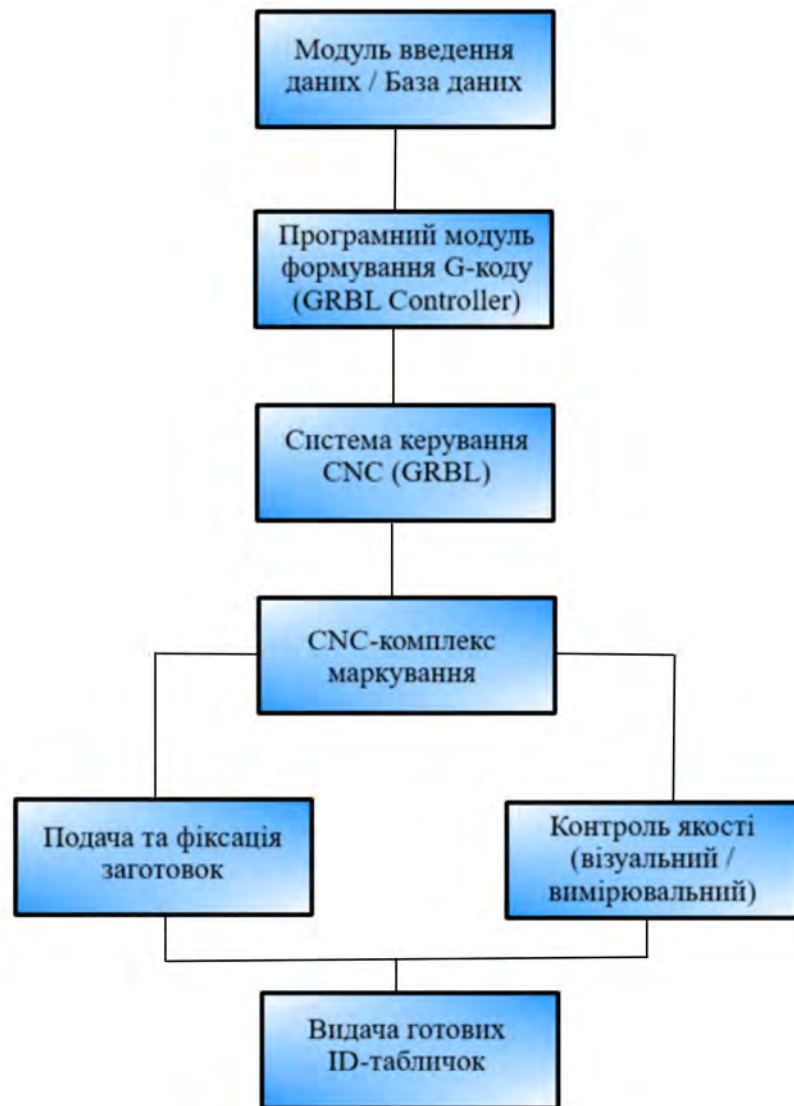


Рис. 2.1 Структурна схема системи автоматизованого виробництва ID-табличок

2.3 Функціональна схема роботи автоматизованого комплексу

Функціональна схема автоматизованого комплексу визначає послідовність виконання операцій під час виготовлення металевих ID-табличок та описує взаємодію основних програмних і апаратних компонентів системи. Вона відображає логіку проходження інформаційних і матеріальних потоків у процесі маркування. Загальний вигляд функціональної схеми наведено на рис. 2.2.



Рис. 2.2 Функціональна схема роботи автоматизованого комплексу

Окремим елементом функціонування комплексу є формування керуючої програми для CNC-обробки. Узагальнену схему процесу генерування CNC-програми наведено на рис. 2.3.

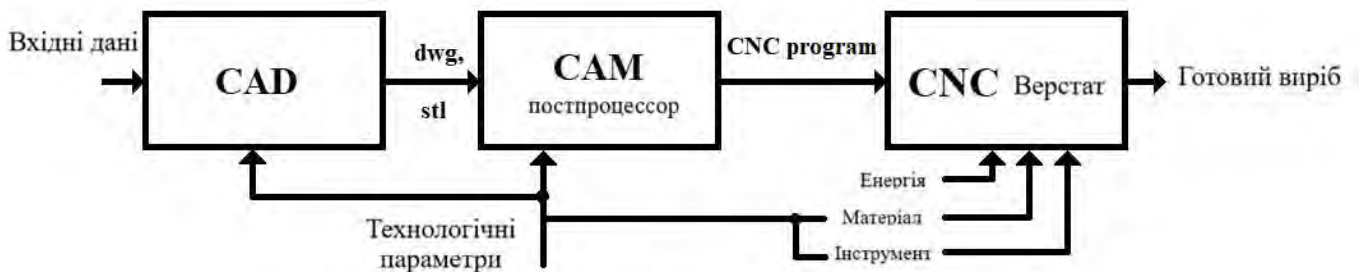


Рис. 2.3 Узагальнена схема формування CNC-програми (CAD–CAM–CNC)

Згідно з рис. 2.3, на етапі CAD формується геометрична модель виробу (макет ID-таблички), на етапі CAM виконується перетворення геометрії у траєкторії руху

інструмента та формування керуючої програми у вигляді G-коду, після чого CNC-верстат здійснює безпосереднє маркування заготовки. У межах даного проєкту ця стандартна послідовність доповнюється автоматизованою подачею заготовок, їх фіксацією та контролем якості готових виробів, що забезпечує замкнений цикл виробництва.

CNC-програма формується у вигляді G-коду, який містить команди керування рухом інструмента в декартовій системі координат, а також сигнали для допоміжних функцій верстата. У більшості практичних застосувань G-код автоматично генерується CAM-системою з використанням постпроцесора, налаштованого під конкретний CNC-верстат.

Сучасні CAD/CAM-платформи забезпечують повний цикл підготовки виробництва, включаючи створення геометричної моделі, формування траєкторій обробки та генерацію керуючої програми. У межах даного проєкту передбачається автоматичне формування G-коду на основі вхідних даних із бази, що дозволяє модифікувати параметри ID-таблички без ручного втручання оператора та забезпечує інтеграцію програмної частини з CNC-обладнанням.

Робота системи розпочинається з введення маркувальної інформації через інтерфейс користувача або її автоматичного отримання з бази даних підприємства. Введені дані можуть містити текстові написи, серійні номери, технічні параметри виробу, а також QR- або DataMatrix-коди. Програмний модуль виконує перевірку коректності інформації та формує макет таблички.

На основі підготовлених даних здійснюється генерація керуючої програми, яка передається до CNC-контролера GRBL. Контролер забезпечує керування приводами осей та синхронізацію роботи виконавчих механізмів.

Паралельно підсистема подачі переміщує металеву заготовку у робочу зону CNC-комплексу та забезпечує її жорстке закріплення. Після підтвердження правильності позиціонування виконується операція маркування. CNC-комплекс наносить символи відповідно до отриманого G-коду, забезпечуючи точне позиціонування інструмента та стабільні параметри обробки.

Після завершення маркування табличка передається до підсистеми контролю якості, де перевіряється відповідність нанесених символів заданим параметрам. У разі виявлення відхилень система формує повідомлення та дозволяє повторити цикл обробки. Після успішного проходження контролю табличка переміщується у зону видачі готової продукції, а інформація про виконану операцію зберігається у журналі системи.

Таким чином, функціональна схема роботи комплексу реалізує замкнений автоматизований цикл виробництва ID-табличок, у якому інформаційні та матеріальні потоки тісно пов'язані між собою. Запропонована організація процесу дозволяє мінімізувати вплив людського фактору, підвищити стабільність роботи системи та забезпечити повторювану якість маркування.

2.4 Опис підсистем та їх взаємодії

Автоматизований комплекс виробництва металевих ID-табличок складається з кількох взаємопов'язаних підсистем, кожна з яких виконує визначені функції у загальному технологічному процесі. Узгоджена робота цих підсистем забезпечує безперервний цикл виготовлення табличок — від введення даних до видачі готового виробу.

Підсистема введення та обробки даних призначена для формування маркувальної інформації. Вона забезпечує приймання даних від оператора або автоматичне отримання параметрів із бази даних підприємства. На цьому етапі здійснюється перевірка коректності введеної інформації, формування макету ID-таблички та підготовка даних для генерації керуючої програми.

Програмна підсистема формування G-коду реалізує перетворення геометричної моделі таблички у траєкторії руху інструмента. На основі заданих параметрів матеріалу та режимів обробки формується керуюча програма, яка передається до CNC-контролера. Дана підсистема забезпечує гнучкість системи та можливість швидкої адаптації до зміни формату або вмісту маркування.

Підсистема керування CNC виконує функції синхронізації роботи виконавчих механізмів, керування приводами осей та контролю процесу маркування. CNC-контролер GRBL приймає G-код, інтерпретує команди та забезпечує точне позиціонування інструмента відповідно до заданої програми.

Механічна підсистема подачі та фіксації заготовок відповідає за транспортування металевих пластин у робочу зону та їх жорстке закріплення. Стабільність положення заготовки є критично важливою для досягнення необхідної точності маркування, тому дана підсистема повинна забезпечувати повторюване позиціонування виробу.

Підсистема маркування реалізується CNC-комплексом, який виконує безпосереднє нанесення символів на поверхню таблички. Взаємодія програмної та апаратної частин дозволяє забезпечити стабільні параметри обробки та високу якість нанесення інформації.

Підсистема контролю якості призначена для перевірки відповідності готової таблички заданим параметрам. Контроль може здійснюватися візуально оператором або із застосуванням вимірювальних засобів. У разі виявлення дефектів система формує сигнал про необхідність повторної обробки, що реалізує замкнений цикл виробництва.

Завершальним етапом є підсистема видачі готових ID-табличок, яка забезпечує передавання виробу до зони накопичення або пакування. Паралельно відбувається реєстрація результатів виконаної операції у журналі системи, що дозволяє здійснювати подальший аналіз процесу та забезпечує простежуваність виробництва.

Таким чином, взаємодія всіх підсистем формує єдиний автоматизований виробничий комплекс, у якому інформаційні потоки тісно інтегровані з технологічними операціями. Запропонована архітектура забезпечує гнучкість, масштабованість та можливість подальшого розвитку системи, а також створює передумови для впровадження принципів комп'ютерно-інтегрованого виробництва.

Висновки до розділу 2

У другому розділі дипломного проєкту сформовано вимоги до автоматизованої системи виробництва металевих ID-табличок та розроблено її структурну і функціональну схеми. Визначено основні програмні та апаратні компоненти комплексу, а також описано їх взаємодію в межах єдиного технологічного процесу.

Розглянуто логіку формування CNC-програми на основі CAD/CAM-технологій і показано місце цього етапу в загальному циклі виготовлення табличок. Запропонована функціональна схема відображає послідовність операцій від введення маркувальної інформації до видачі готового виробу та передбачає замкнений цикл із контролем якості.

Опис підсистем дозволив встановити роль кожного модуля у процесі автоматизації, зокрема підсистем введення даних, генерації G-коду, керування CNC, подачі заготовок, маркування та контролю якості. Запропонована архітектура забезпечує мінімізацію впливу людського фактору, підвищення стабільності виробничого процесу та можливість гнучкої адаптації системи до зміни параметрів маркування.

Отримані результати створюють основу для подальшої розробки електричної схеми, вибору елементної бази та формування алгоритмічно-програмного забезпечення автоматизованої системи виробництва ID-табличок.

3. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ СИСТЕМИ

3.1. Розробка електричної принципової схеми

У системах автоматизації важливу роль відіграють первинні перетворювачі механічних величин, які забезпечують формування електричних сигналів для подальшої обробки системою керування. Для контролю положення рухомих елементів CNC-комплексу використовуються електромеханічні та електронні датчики, що дозволяють реалізувати функції позиціонування, базування осей та захисту обладнання від аварійних режимів роботи [11].

Перед розробкою електричної принципової схеми доцільно розглянути загальну структуру керування CNC-комплексом. Для керування переміщенням координатних осей використовується відкрита система позиційного керування на базі крокових двигунів.

Структурна схема відкритого позиційного керування осями CNC-комплексу наведена на рис. 3.1.



Рис. 3.1 Структурна схема відкритого позиційного керування осями CNC-комплексу

Керуючий комп'ютер формує G-код та передає його до мікроконтролера Arduino з прошивкою GRBL, який виконує функцію CNC-контролера. На основі отриманих команд GRBL формує сигнали STEP/DIR, що надходять до драйверів A4988, які забезпечують живлення фаз крокових двигунів.

Крокові двигуни здійснюють механічне переміщення робочих органів CNC-комплексу та забезпечують взаємодію з технологічним об'єктом, яким у даному випадку є процес маркування металевих ID-табличок.

Електрична принципова схема автоматизованого CNC-комплексу призначена для реалізації керування кроковими двигунами, шпинделем та допоміжними виконавчими механізмами, а також для приймання сигналів від кінцевих перемикачів. Вона базується на мікроконтролерній платформі Arduino з CNC Shield та драйверами A4988.

Загальна електрична схема системи наведена на рис. 3.2.

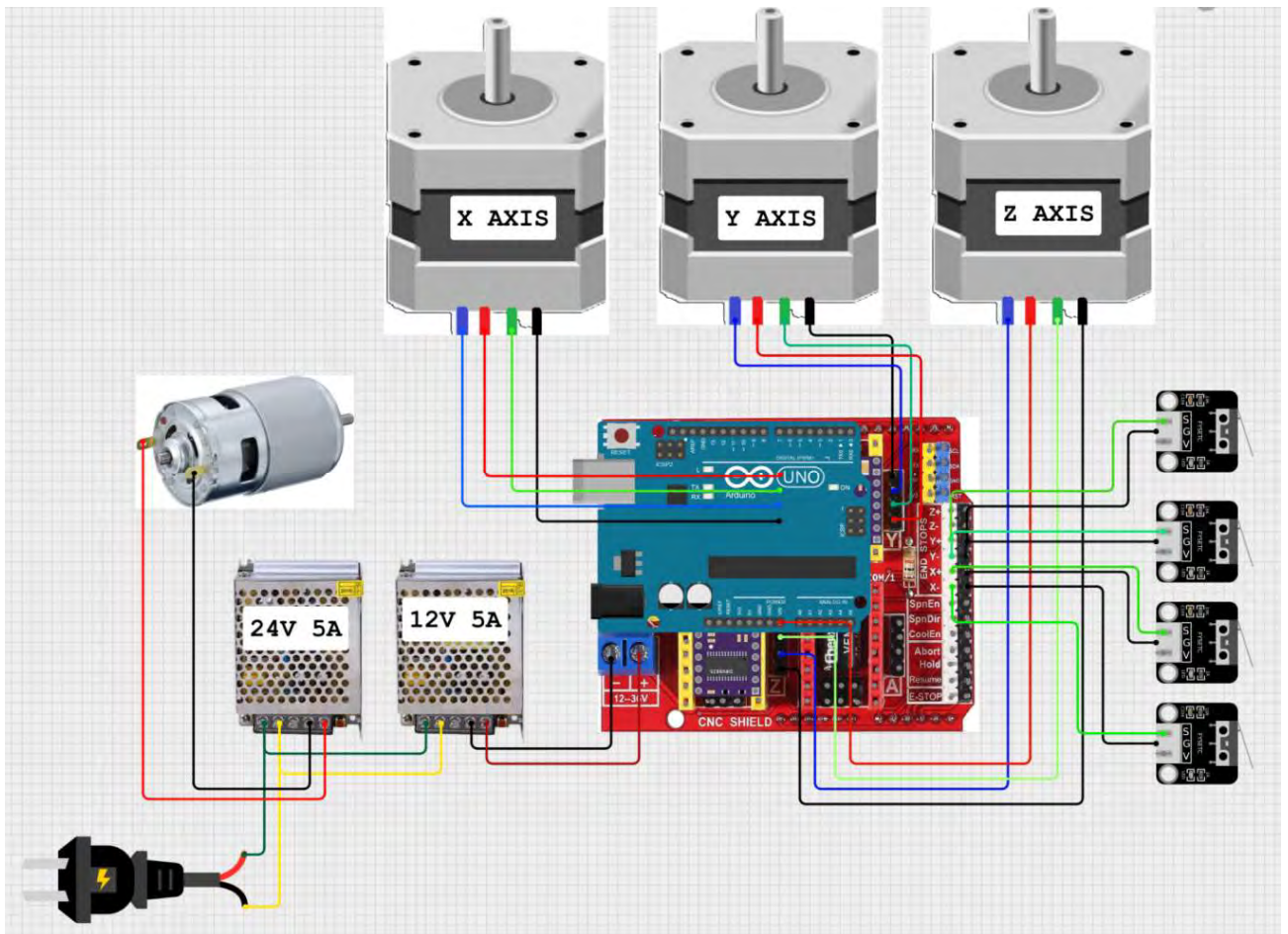


Рис. 3.2 Електрична принципова схема СНС-комплексу маркування ID-табличок

Основним керуючим елементом системи є плата Arduino Uno з прошивкою GRBL, яка забезпечує інтерпретацію G-коду та формування керуючих сигналів STEP/DIR для драйверів крокових двигунів. CNC Shield використовується як модуль

розширення, що спрощує підключення драйверів A4988, кінцевих перемикачів та допоміжних сигналів керування.

Драйвери A4988 виконують функцію силового перетворювача та забезпечують живлення фаз крокових двигунів NEMA17 у мікрокроковому режимі. Кожна вісь (X, Y, Z) має окремий драйвер, що дозволяє незалежно керувати переміщенням інструмента у тривимірному просторі.

Живлення логічної частини системи здійснюється від джерела напруги 12 В, тоді як крокові двигуни та шпиндель живляться від окремого джерела постійної напруги 24 В. Такий поділ дозволяє зменшити вплив завад від силових ланцюгів на роботу мікроконтролера.

Для забезпечення базування осей та обмеження ходу використовуються кінцеві перемикачі, підключені до відповідних входів CNC Shield. Сигнали з датчиків обробляються контролером GRBL та використовуються під час процедури homing.

Керування шпинделем здійснюється через вихід контролера з можливістю регулювання швидкості обертання за допомогою PWM-сигналу або релейного модуля. Це дозволяє автоматизувати запуск і зупинку інструмента у процесі виконання програми.

Розроблена електрична схема забезпечує узгоджену роботу програмної та апаратної частин системи, реалізує відкрите позиційне керування осями CNC-комплексу та створює основу для подальшої інтеграції алгоритмічно-програмного забезпечення.

3.2. Розрахунок та вибір елементної бази:

3.2.1. Вибір контролера системи управління (GRBL / Arduino / STM32 / PLC)

Ключовим елементом автоматизованої системи виробництва ID-табличок є контролер, який забезпечує приймання керуючої програми (G-коду), її інтерпретацію та формування керуючих сигналів для приводів осей CNC-комплексу, а також обробку сигналів від датчиків і допоміжних виконавчих механізмів. Вибір контролера визначає сумісність із CNC-програмами, склад елементної бази, рівень складності налаштування та можливості подальшої модернізації системи.

Для реалізації системи керування розглянуто чотири підходи: застосування мікроконтролерної платформи Arduino з прошивкою GRBL, використання продуктивніших мікроконтролерів STM32, застосування готових CNC-контролерів та використання програмованого логічного контролера (PLC). Результати порівняння можливих варіантів контролерів наведено в табл. 3.1.

Контролер на базі Arduino + GRBL є одним із найпоширеніших рішень для малогабаритних CNC-систем. Прошивка GRBL реалізує інтерпретатор G-коду та формує сигнали STEP/DIR для керування кроковими драйверами. Перевагою такого підходу є простота реалізації, наявність великої кількості готових рішень, доступність модулів розширення та сумісність із поширеними програмами керування (наприклад, Candle, Universal Gcode Sender). Крім того, платформи Arduino є дешевими та легко замінюваними, що знижує вартість системи та спрощує обслуговування.

Разом із тим, Arduino має обмеження за продуктивністю та кількістю входів/виходів, що може ускладнювати реалізацію розширених функцій (наприклад, підключення системи технічного зору або великої кількості датчиків). Також для роботи зі складними траєкторіями та підвищення швидкості обробки може виникати потреба у більш потужному контролері.

Контролери на базі STM32 дозволяють реалізувати керування CNC із вищою частотою формування імпульсів, збільшеною кількістю інтерфейсів та більшою продуктивністю. Для STM32 існують реалізації GRBL-подібних прошивок (наприклад, grblHAL), що забезпечують підтримку G-коду та розширені функції. Основною перевагою такого рішення є можливість підвищити точність і швидкодію системи, а також інтегрувати додаткові модулі без зміни архітектури.

Таблиця 3.1 - Порівняння можливих варіантів контролерів системи керування

Параметр	Arduino + GRBL	STM32	PLC
Підтримка G-коду	Так (GRBL)	Так (grblHAL та аналоги)	Потребує додаткових модулів
Формування STEP/DIR	Так	Так	Через спеціальні motion-модулі
Продуктивність	Середня	Висока	Висока
Кількість I/O	Обмежена	Розширена	Залежить від конфігурації
Складність реалізації	Низька	Середня / висока	Висока
Вартість рішення	Низька	Середня	Висока
Гнучкість модернізації	Середня	Висока	Обмежена
Доцільність для компактного CNC	Висока	Висока	Низька

Недоліком STM32 є складніша розробка й налаштування порівняно з Arduino, а також вища вимога до кваліфікації під час впровадження та обслуговування. Для бакалаврського проєкту, який орієнтований на практичну реалізацію системи, надлишкова складність може бути недоцільною.

PLC традиційно застосовуються у промислових системах автоматизації завдяки високій надійності, можливості роботи в складних умовах та наявності стандартних інтерфейсів промислового рівня. Однак PLC не є оптимальним рішенням саме для керування CNC-траєкторіями: для реалізації інтерпретації G-коду та формування високочастотних STEP/DIR сигналів потрібні або спеціалізовані модулі руху, або окремий CNC-контролер. Це значно підвищує вартість системи та складність реалізації, що не відповідає задачі створення компактного автоматизованого комплексу маркування.

З огляду на особливості поставленого завдання та вимоги до системи, найбільш раціональним є використання мікроконтролерного рішення Arduino з прошивкою GRBL як CNC-контролера. Таке рішення забезпечує необхідну функціональність для генерації керуючих сигналів приводам осей, підтримує стандартний G-код, має достатню точність для маркування ID-табличок та дозволяє реалізувати інтеграцію з операторським програмним забезпеченням. За потреби подальшого розширення функцій система може бути модернізована до STM32-платформи без суттєвих змін загальної концепції.

Обраний варіант контролера: Arduino Uno (ATmega328P) + GRBL (як CNC-контролер) з формуванням сигналів STEP/DIR для драйверів осей та керування допоміжними функціями (шпиндель, охолодження/продувка, аварійна зупинка). Зовнішній вигляд обраного контролера наведено на рис. 3.3.

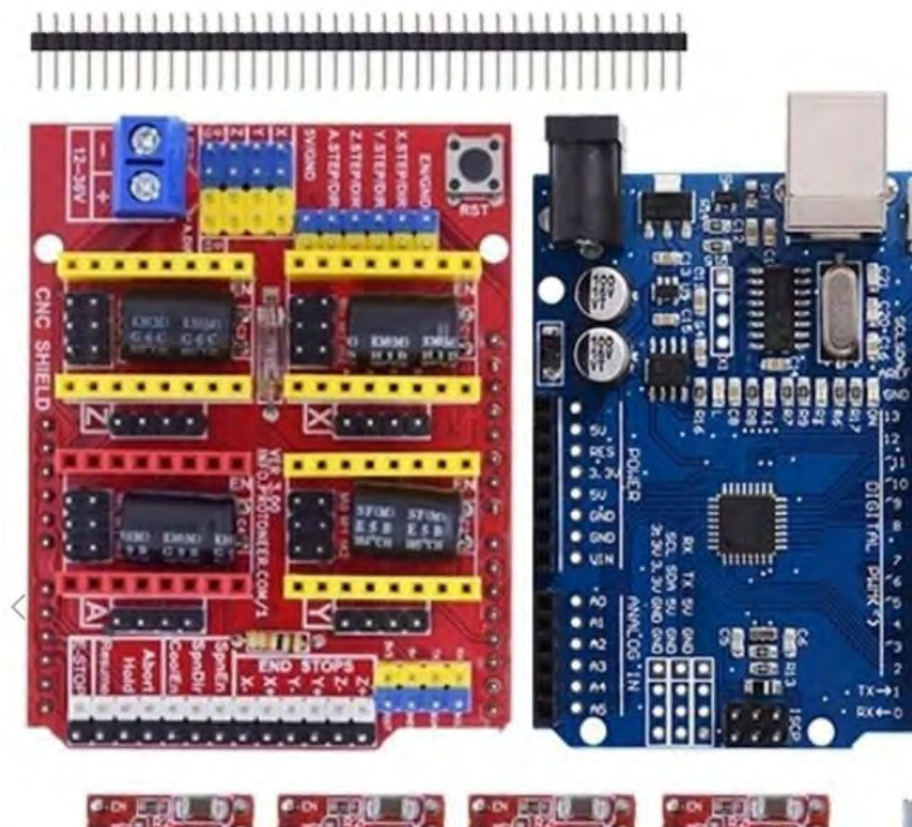


Рис. 3.3 Мікроконтролер Arduino Uno з CNC Shield та драйверами A4988 як апаратна основа CNC-контролера GRBL

Як апаратну основу системи керування обрано мікроконтролерну платформу Arduino з CNC Shield, що забезпечує підключення драйверів крокових двигунів та формування сигналів STEP/DIR. Дана конфігурація дозволяє реалізувати керування осями CNC-комплексу, шпинделем і допоміжними виконавчими механізмами на базі прошивки GRBL, а також забезпечує сумісність із поширеним програмним забезпеченням для передавання G-коду з персонального комп'ютера. Для керування кроковими двигунами використовуються драйвери типу A4988, які забезпечують мікрокроковий режим роботи та обмеження струму фаз.

3.2.2 Вибір приводів та двигунів осей CNC

Для реалізації переміщення робочого інструмента в автоматизованому комплексі виробництва ID-табличок необхідно забезпечити точне позиціонування по координатах X, Y та Z. З цією метою у CNC-системах малого та середнього класу найчастіше застосовуються крокові електродвигуни, які дозволяють реалізувати дискретне керування положенням без використання складних зворотних зв'язків.

Крокові двигуни широко використовуються у CNC-обладнанні завдяки простоті керування, високій повторюваності позиціонування та сумісності з мікроконтролерними системами на базі сигналів STEP/DIR. У поєднанні з драйверами типу A4988 вони забезпечують мікрокроковий режим роботи, що дозволяє підвищити плавність руху та точність позиціонування.

Крокові двигуни в даній системі працюють у відкритому контурі керування без безпосереднього зворотного зв'язку за положенням ротора. Формування мікрокрокового режиму здійснюється шляхом керування струмами фаз двигуна за допомогою драйверів A4988, що дозволяє збільшити кількість стабільних положень ротора та підвищити роздільну здатність системи позиціонування. Такий підхід забезпечує достатню точність переміщень без використання додаткових датчиків положення, що спрощує конструкцію комплексу та зменшує його вартість.

Для осей X, Y та Z доцільно застосувати крокові двигуни типорозміру NEMA 17, які є стандартним рішенням для компактних CNC-верстатів і гравіювальних

установок. Дані двигуни мають достатній крутний момент для переміщення робочого столу та інструмента, компактні габарити та широко представлені на ринку, що спрощує їх заміну та обслуговування.

Типові параметри крокових двигунів NEMA 17 (рис.3.4):

- кут кроку – $1,8^{\circ}$ (200 кроків на оберт);
- номінальний струм фази – $1,2 \dots 1,7$ А;
- утримувальний момент – $40 \dots 50$ Н·см;
- напруга живлення – визначається характеристиками драйвера.



Рис. 3.4 Кроковий двигун NEMA17

Завдяки використанню мікрокрокового режиму ($1/8$ – $1/16$ кроку) ефективна роздільна здатність системи значно зростає, що є важливим для якісного нанесення дрібних символів та графічних елементів на ID-табличках.

Керування двигунами здійснюється через драйвери A4988, підключені до CNC Shield, які забезпечують формування струму у фазах двигуна та дозволяють обмежувати його величину відповідно до паспортних даних. Це підвищує надійність роботи приводів та запобігає їх перегріву.

Обрані крокові двигуни у поєднанні з мікроконтролерним керуванням GRBL забезпечують необхідну точність, повторюваність і стабільність переміщень, що є достатнім для задач маркування металевих ID-табличок.

Система координат CNC-комплексу та базові опорні точки наведені на рис. 3.5, що використовується для задання початкових положень та формування траєкторій руху інструмента.

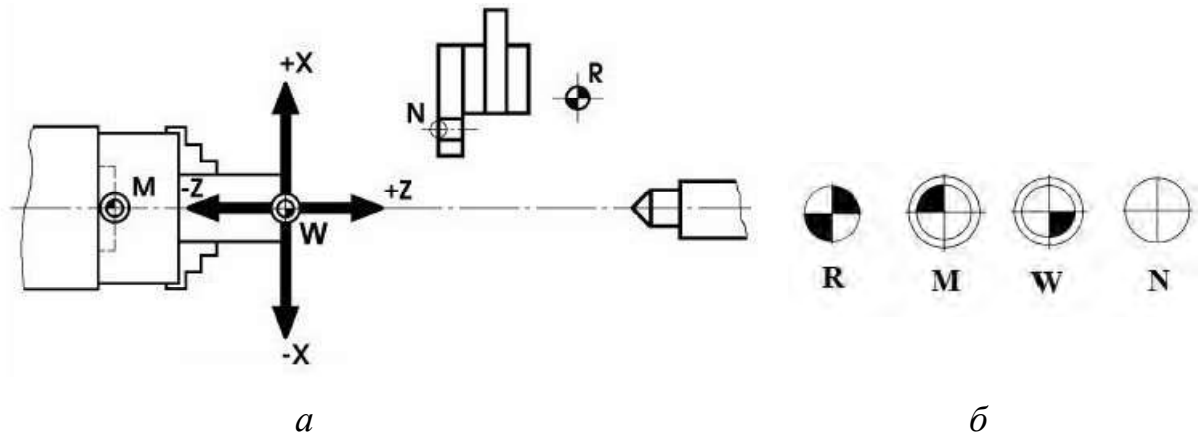


Рис. 3.5 Система координат CNC-верстата та базові опорні точки:

а – координатні осі X, Z та положення інструмента;

б – умовні позначення точок R, M, W, N

3.2.3 Вибір датчиків (кінцевих перемикачів, індикаторів)

Для забезпечення коректної роботи CNC-комплексу та реалізації процедур базування осей необхідно застосувати датчики кінцевого положення. Вони використовуються для визначення нульових координат, запобігання виходу механізмів за допустимі межі та підвищення загальної безпеки системи. Зовнішній вигляд типових кінцевих перемикачів, що застосовуються у CNC-системах на базі GRBL, наведено на рис. 3.6.

У системах керування на базі GRBL найчастіше застосовуються механічні кінцеві перемикачі (endstop) або оптичні датчики положення. Механічні перемикачі вирізняються простотою конструкції, низькою вартістю та достатньою надійністю для компактних CNC-установок. Оптичні датчики забезпечують вищу повторюваність спрацювання, проте потребують більш ретельного налаштування та захисту від забруднень.

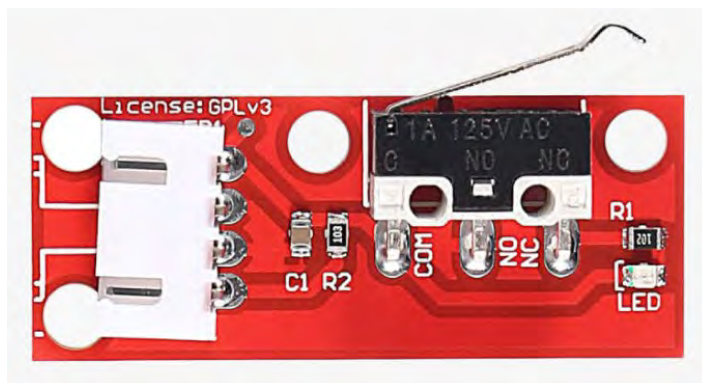


Рис. 3.6 Кінцеві перемикачі (endstop), що застосовуються для базування осей CNC-комплексу

У межах даного проєкту доцільно застосувати механічні кінцеві перемикачі з цифровим виходом, встановлені на кожній координатній осі (X, Y, Z). Такі датчики підключаються безпосередньо до входів CNC Shield та обробляються контролером GRBL, що дозволяє реалізувати автоматичне базування (homing) і програмні обмеження переміщень.

Типові параметри обраних кінцевих перемикачів:

- напруга живлення: 5 В;
- тип контакту: нормально розімкнений (NO) або нормально замкнений (NC);
- ресурс спрацювань: не менше 1×10^6 циклів;
- інтерфейс підключення: цифровий (3-провідний).

Для індикації стану системи (живлення, готовність, аварійний режим) можуть використовуватися світлодіодні індикатори, розміщені на CNC Shield або додатковій панелі керування. Це спрощує візуальний контроль роботи комплексу оператором.

Застосування кінцевих перемикачів дозволяє забезпечити стабільне позиціонування, підвищити безпеку експлуатації та автоматизувати процедури запуску системи. Обрані датчики повністю сумісні з контролером Arduino + GRBL і не потребують складної апаратної обробки сигналів.

Підключення датчика здійснюється через 3-контактний інтерфейс (GND, +5V, Signal), що забезпечує просту інтеграцію з CNC Shield.

3.2.4 Вибір інструменту та шпинделя

Підсистема маркування реалізується за допомогою компактного CNC-шпинделя та гравіювального інструменту, призначеного для обробки тонколистових металів (алюміній, латунь, нержавіюча сталь). З огляду на невелику глибину різання та відносно малі розміри ID-табличок, доцільно застосувати низьковольтний DC-шпиндель потужністю 300...500 Вт з цанговим патроном типу ER11.

Обраний тип шпинделя забезпечує достатню частоту обертання (до 10 000–12 000 об/хв), компактні габарити та просту інтеграцію з CNC-комплексом на базі Arduino + GRBL. Керування увімкненням шпинделя може здійснюватися через вихід контролера або окремий релейний модуль, що дозволяє автоматизувати запуск і зупинку інструмента у процесі виконання G-коду.

Як різальний інструмент доцільно використовувати твердосплавні гравери V-подібної або циліндричної форми діаметром 1...3 мм. Такі інструменти забезпечують чітке формування символів і графічних елементів, мають високий ресурс роботи та придатні для маркування різних металевих поверхонь. Застосування цанги ER11 дозволяє швидко змінювати інструмент без додаткового переналаштування системи.

Поєднання компактного DC-шпинделя з твердосплавними граверами забезпечує необхідну якість нанесення маркування при відносно невеликій потужності приводу, що відповідає задачам виготовлення ID-табличок та не потребує складних систем охолодження. Такий вибір інструменту та шпинделя є оптимальним для автоматизованого комплексу малого класу, орієнтованого на стабільну та повторювану гравіювальну обробку. Зовнішній вигляд обраного шпинделя наведено на рис. 3.7.



Рис. 3.7 DC-шпиндель типу 775 з цанговим патроном ER11 для гравіювання металевих ID-табличок

Обертання шпинделя здійснюється від джерела постійної напруги 24 В із можливістю керування швидкістю за допомогою PWM-виходу контролера.

3.3 Розробка переліку елементів структурної та електричної схеми

На основі структурної та електричної принципової схем сформовано перелік основних елементів автоматизованого CNC-комплексу маркування ID-табличок. До складу системи входять керуючі, силові та допоміжні компоненти, що забезпечують формування керуючих сигналів, переміщення осей, обертання шпинделя та контроль положення.

Перелік основних елементів наведено в табл. 3.2.

Підібрана елементна база забезпечує реалізацію відкритої системи позиційного керування, сумісність із прошивкою GRBL та достатню точність переміщення для задач маркування металевих ID-табличок. Використання типових CNC-компонентів дозволяє зменшити вартість комплексу та спростити його обслуговування і модернізацію.

Таблиця 3.2 Перелік елементів автоматизованого CNC-комплексу

№	Найменування елемента	Тип / модель	Кількість	Призначення
1	Мікроконтролерна плата	Arduino Uno (ATmega328P)	1	CNC-контролер, інтерпретація G-коду
2	Плата розширення	CNC Shield V3	1	Підключення драйверів і датчиків
3	Драйвер крокового двигуна	A4988	3	Керування струмом фаз двигунів
4	Кроковий двигун	NEMA17	3	Переміщення осей X, Y, Z
5	Кінцевий перемикач	Mechanical Endstop	3	Базування та обмеження ходу
6	Шпиндель постійного струму	Тип 775, 24 В	1	Гравіювання та маркування
7	Цанговий патрон	ER11	1	Кріплення інструмента
8	Гравіювальний інструмент	Твердосплавний, 1–3 мм	комплект	Нанесення символів
9	Блок живлення	24 В, 5 А	1	Живлення шпинделя та двигунів
10	Блок живлення	12 В, 5 А	1	Живлення логічної частини
11	Персональний комп'ютер	PC	1	Формування та передавання G-коду
12	З'єднувальні провідники	—	комплект	Електричні з'єднання

Висновки до розділу 3

У даному розділі було розроблено електричну принципову схему автоматизованого CNC-комплексу маркування ID-табличок та виконано вибір основних елементів системи керування. Побудована структура базується на мікроконтролерній платформі Arduino з прошивкою GRBL, що забезпечує інтерпретацію G-коду та формування керуючих сигналів для приводів осей.

Обґрунтовано застосування крокових двигунів NEMA17 у поєднанні з драйверами A4988, що дозволяє реалізувати точне позиційне керування у відкритому контурі без використання складних систем зворотного зв'язку. Для

забезпечення безпечної експлуатації та базування осей обрано кінцеві перемикачі, інтегровані з CNC Shield.

Також виконано вибір компактного DC-шпинделя з цанговим патроном ER11 та твердосплавного гравіювального інструменту, що забезпечує якісне нанесення маркування на металеві ID-таблички. Сформований перелік елементів підтверджує можливість практичної реалізації системи з використанням доступної елементної бази.

Запропонована електрична схема та підібрані компоненти створюють технічну основу для подальшої розробки алгоритмічно-програмного забезпечення автоматизованого комплексу та реалізації повного циклу виготовлення ID-табличок.

4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІЧНО-ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ

Алгоритмічно-програмне забезпечення автоматизованого комплексу призначене для реалізації повного циклу виготовлення металевих ID-табличок — від введення маркувальної інформації до отримання готового виробу. Програмна частина системи забезпечує формування керуючої програми (G-коду), передавання її до CNC-контролера, керування виконавчими механізмами та контроль виконання технологічних операцій.

Основою програмного керування є прошивка GRBL, встановлена на мікроконтролері Arduino, яка виконує інтерпретацію G-коду та формує сигнали STEP/DIR для приводів осей. Формування самого G-коду здійснюється на персональному комп'ютері на основі введених користувачем даних або інформації з бази даних підприємства.

Алгоритм роботи комплексу побудований за принципом послідовного виконання етапів технологічного процесу з мінімальною участю оператора.

4.1 Формування алгоритму роботи автоматизованого комплексу

Робота системи починається з ініціалізації обладнання та перевірки готовності всіх підсистем. Після подачі живлення контролер GRBL переходить у режим очікування команд, а виконавчі механізми перебувають у початковому стані.

На першому етапі оператор або інформаційна система підприємства вводить маркувальні дані, які можуть містити текстові написи, серійні номери, технічні параметри виробу, а також QR- або DataMatrix-коди. Отримана інформація перевіряється програмним модулем на коректність та повноту.

Далі формується макет ID-таблички та автоматично генерується керуюча програма у вигляді G-коду. Під час генерації визначаються траєкторії руху

інструмента, швидкість подачі та глибина гравіювання відповідно до характеристик матеріалу.

Сформований G-код передається з персонального комп'ютера до контролера Arduino з прошивкою GRBL. Після цього запускається процедура базування (homing), під час якої координатні осі встановлюються у початкове положення за сигналами кінцевих перемикачів.

Паралельно із підготовкою керуючої програми здійснюється подача металевої заготовки у робочу зону та її фіксація. Після підтвердження готовності система переходить до виконання операції маркування.

У процесі роботи CNC-контролер формує сигнали STEP/DIR для драйверів A4988, які керують кроковими двигунами осей X, Y та Z. Шпиндель вмикається автоматично, а інструмент рухається по заданих траєкторіях, забезпечуючи нанесення символів на поверхню таблички.

Після завершення гравіювання шпиндель зупиняється, а готова ID-табличка передається до зони контролю якості. Перевіряється чіткість маркування та відповідність нанесеної інформації заданим параметрам. У разі виявлення відхилень система може сформувати повідомлення оператору або дозволити повторний цикл обробки.

Після успішного завершення контролю табличка переміщується у зону видачі готової продукції, а інформація про виконану операцію зберігається у журналі системи. Далі комплекс переходить у режим очікування наступного завдання.

Таким чином реалізується замкнений автоматизований цикл виготовлення ID-табличок, у якому інформаційні та матеріальні потоки тісно інтегровані між собою.

4.2 Автоматизоване формування та передавання G-коду

Формування керуючої програми є ключовим етапом функціонування автоматизованого комплексу маркування ID-табличок, оскільки саме G-код визначає траєкторію руху інструмента, режими обробки та послідовність технологічних операцій CNC-верстата.

У традиційних CNC-системах G-код може створюватися вручну на основі креслення виробу. Проте такий підхід є трудомістким і схильним до помилок, особливо за умови серійного виготовлення табличок із різними параметрами. Тому в межах даного проєкту застосовано автоматизований підхід до генерації керуючої програми.



Згідно з наведеною схемою, процес генерації G-коду складається з таких основних етапів:

2. Формування макету таблиць. На основі отриманих даних програмний модуль створює геометричну модель (макет) ID-таблиць, визначає розміщення символів і графічних елементів.

код. При цьому враховуються технологічні параметри: швидкість подачі, глибина гравіювання, тип інструмента та властивості матеріалу.

4. Передавання програми до CNC-контролера. Готовий G-код надсилається з персонального комп'ютера до CNC-контролера GRBL через USB-інтерфейс за допомогою спеціалізованого клієнтського програмного забезпечення.

5. Виконання програми CNC-верстатом. Контролер GRBL інтерпретує G-код і формує сигнали STEP/DIR для драйверів крокових двигунів, забезпечуючи переміщення інструмента відповідно до заданих траєкторій.

G-код містить команди керування переміщенням у декартовій системі координат (G01, G02, G03 тощо), а також допоміжні M-коди для керування шпинделем і додатковими функціями. Наприклад, команди G01 X... Y... Z... F... задають лінійне переміщення з визначеною швидкістю подачі, а M-коди використовуються для вмикання або вимикання шпинделя.

Автоматичне формування G-коду на основі даних із бази дозволяє оперативно змінювати параметри ID-табличок без ручного перепрограмування та забезпечує інтеграцію інформаційної частини системи з CNC-обладнанням. Такий підхід суттєво зменшує вплив людського фактору, підвищує швидкість підготовки виробництва та забезпечує стабільну якість маркування.

Запропонований алгоритм генерації керуючих програм створює основу для реалізації повністю автоматизованого циклу виготовлення ID-табличок — від введення даних до отримання готового виробу.

4.3 Програмне забезпечення CNC-контролера (GRBL)

Програмне забезпечення CNC-контролера реалізовано на базі відкритої прошивки GRBL, встановленої на мікроконтролерній платформі Arduino Uno, та забезпечує інтерпретацію G-коду, формування керуючих сигналів STEP/DIR, керування шпинделем і обробку сигналів датчиків положення. Прошивка GRBL виконує функції інтерпретації G-коду, формування керуючих сигналів STEP/DIR

для драйверів крокових двигунів, керування шпинделем та обробки сигналів від кінцевих перемикачів.

GRBL являє собою вбудовану систему керування рухом, оптимізовану для малогабаритних CNC-установок. Вона підтримує стандартний набір G- та M-кодів, реалізує планування траєкторій, керування прискоренням і швидкістю подачі, а також забезпечує функції базування координатних осей (homing).

Прошивка завантажується до контролера через USB-інтерфейс за допомогою стандартного середовища Arduino IDE. Після встановлення GRBL налаштування параметрів системи здійснюється через консоль керування або спеціалізоване програмне забезпечення (наприклад, Universal Gcode Sender або Candle). До основних параметрів належать:

- кількість кроків на міліметр для кожної осі;
- максимальна швидкість подачі;
- прискорення руху;
- напрямки обертання двигунів;
- параметри процедури базування;
- налаштування PWM для керування швидкістю шпинделя.

Передавання керуючої програми здійснюється через USB-інтерфейс у вигляді послідовного COM-з'єднання. Для цього використовується клієнтське програмне забезпечення (UGS або Candle), яке забезпечує потокову передачу G-коду, моніторинг стану контролера та можливість ручного керування осями у режимі налагодження.

Після запуску системи контролер переходить у режим очікування команд. Перед початком виконання керуючої програми здійснюється процедура базування, під час якої осі X, Y та Z переміщуються до кінцевих перемикачів, формуючи нульову точку координатної системи верстата.

Отриманий з персонального комп'ютера G-код інтерпретується контролером у реальному часі. На основі інтерпретованих команд переміщення GRBL формує імпульсні сигнали STEP та сигнали напрямку DIR для кожної координатної осі, які подаються на драйвери A4988. Драйвери виконують перетворення логічних сигналів

у керуючі струми фаз крокових двигунів, забезпечуючи точне позиціонування інструмента. Це забезпечує синхронне переміщення інструмента за заданими траєкторіями.

Керування шпинделем реалізується через PWM-вихід контролера або за допомогою релейного модуля, що дозволяє задавати швидкість обертання та автоматично вмикати/вимикати інструмент командами М-коду. Увімкнення та вимкнення шпинделя виконується за допомогою М-кодів, що дозволяє повністю автоматизувати процес гравіювання в межах виконання G-коду.

Таким чином, прошивка GRBL забезпечує інтеграцію програмної та апаратної частин CNC-комплексу, реалізує керування рухом у відкритому контурі та створює основу для стабільної роботи автоматизованої системи маркування ID-табличок.

Приклад фрагмента керуючої програми (G-коду)

Для керування рухом інструмента та допоміжними функціями CNC-комплексу використовується стандартний G-код. Нижче наведено приклад фрагмента керуючої програми, що може застосовуватися під час маркування ID-таблички:

```
G21
G90
G01 X10 Y10 F300
M3
G01 Z-0.3
G01 X50 Y10
G01 X50 Y40
G01 X10 Y40
G01 X10 Y10
M5
G00 Z5
```

де:

G21 – встановлення метричних одиниць вимірювання (мм);

G90 – абсолютне позиціонування координат;

G01 – лінійне переміщення інструмента із заданою швидкістю подачі;

X, Y, Z – координати переміщення;

F – швидкість подачі;

M3 – увімкнення шпинделя;

M5 – вимкнення шпинделя;

G00 – швидке переміщення без обробки.

Наведений приклад демонструє принцип формування траєкторії руху інструмента та керування шпинделем у процесі гравіювання. У реальній системі такі команди формуються автоматично CAM-модулем на основі макету ID-таблички та передаються до контролера GRBL для виконання.

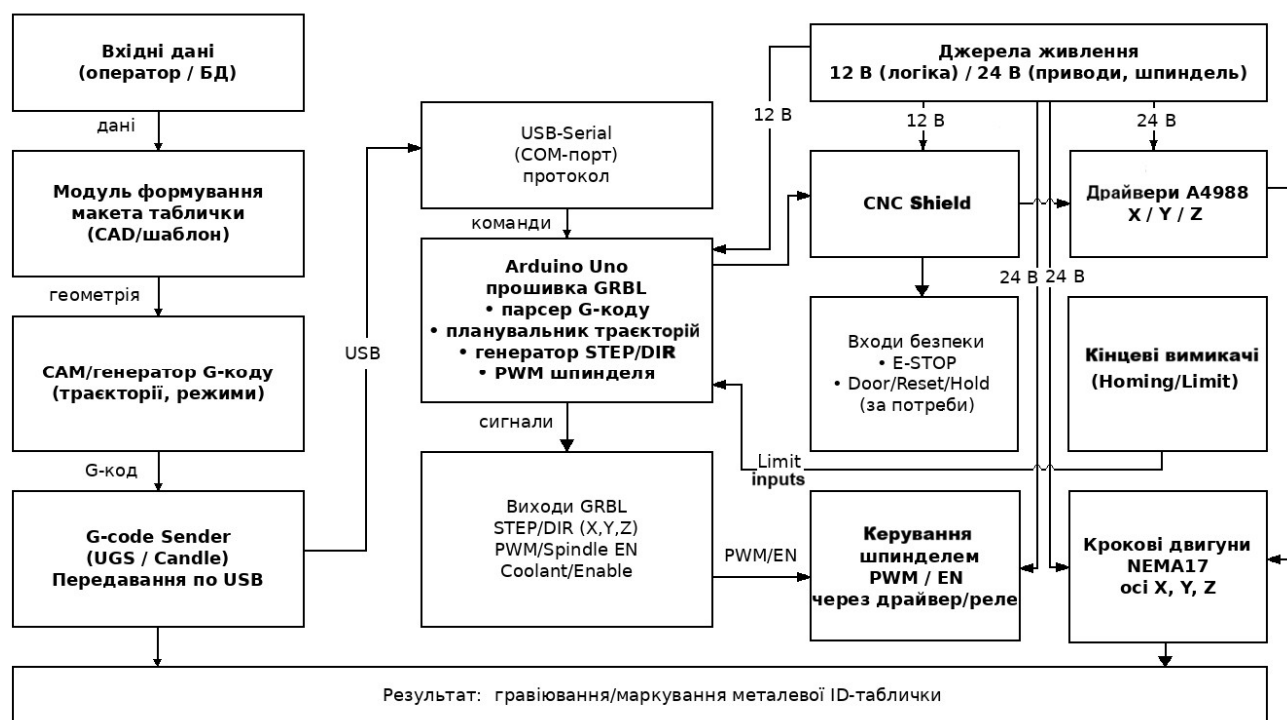


Рис. 4.2 Структурна схема взаємодії програмного забезпечення GRBL з апаратною частиною CNC-комплексу

На рис. 4.2 наведено структурну схему взаємодії програмної та апаратної частин CNC-комплексу. Керуюча програма у вигляді G-коду формується на персональному комп'ютері та передається через USB-інтерфейс до мікроконтролера Arduino Uno з прошивкою GRBL. Контролер виконує інтерпретацію G-коду та формує сигнали STEP/DIR для драйверів A4988, які керують кроковими двигунами осей X, Y та Z. Керування шпинделем здійснюється за допомогою PWM-сигналу, що дозволяє автоматизувати процес маркування.

Представлена структура демонструє повний ланцюг взаємодії програмного забезпечення з апаратною частиною CNC-комплексу - від формування G-коду до керування приводами та виконання операції маркування.

4.4 Розробка макету графічного інтерфейсу програмного забезпечення системи

Графічний інтерфейс користувача призначений для спрощення взаємодії оператора з автоматизованим комплексом маркування ID-табличок та мінімізації ручних операцій під час підготовки виробництва. Основним завданням інтерфейсу є введення маркувальної інформації, керування процесом формування керуючої програми та передавання G-коду до CNC-контролера.

У межах даного проєкту розроблено концептуальний макет графічного інтерфейсу, який відображає основні функціональні блоки програмного забезпечення та логіку взаємодії оператора з системою. Інтерфейс орієнтований на використання на персональному комп'ютері та може бути реалізований у вигляді окремого програмного модуля або інтегрований у наявне програмне забезпечення передавання G-коду (UGS, Candle тощо).

На рис. 4.3 представлено макет графічного інтерфейсу оператора, який включає:

- блок введення маркувальних даних та імпорту інформації з бази даних;
- блок задання технологічних параметрів гравіювання;
- область попереднього перегляду макета ID-таблички;
- модуль генерації та керування виконанням G-коду;
- вікно перегляду G-коду та журналу подій GRBL;
- панель моніторингу стану CNC-комплексу.

Інтерфейс забезпечує передавання керуючих команд до CNC-контролера через USB-інтерфейс, відображення координат осей, станів кінцевих перемикачів, шпинделя та аварійних сигналів. Запропонований макет не прив'язаний до

конкретної реалізації, проте може бути реалізований у вигляді окремого програмного застосунку або на базі існуючих G-code sender-рішень.

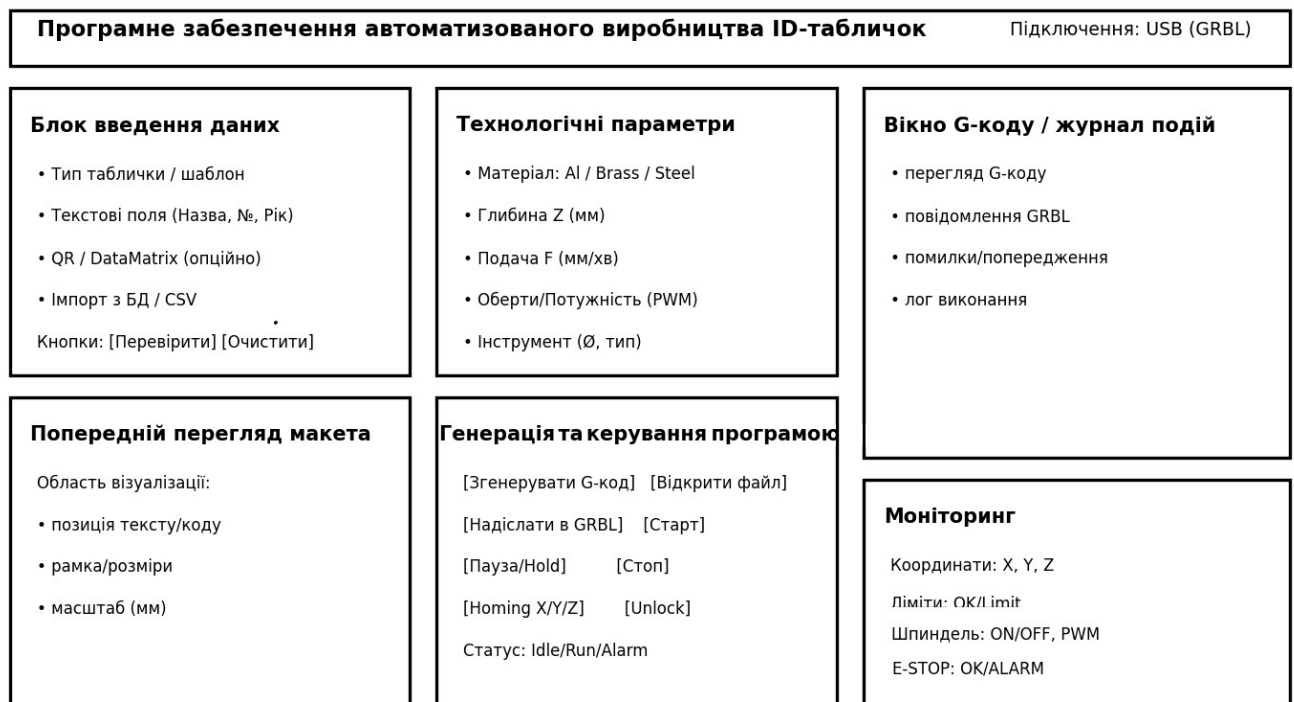


Рис. 4.3 Макет графічного інтерфейсу оператора

Розроблений макет інтерфейсу не є обов'язково прив'язаним до конкретної мови програмування чи середовища реалізації, однак визначає структуру програмного забезпечення та взаємозв'язок його функціональних модулів. Такий підхід дозволяє у подальшому реалізувати інтерфейс у будь-якому зручному середовищі (Python, C#, JavaScript тощо) без зміни загальної архітектури системи.

Запропонований графічний інтерфейс забезпечує зручність роботи оператора, зменшує ймовірність помилок під час підготовки керуючих програм і сприяє підвищенню ефективності використання автоматизованого комплексу маркування ID-табличок.

4.5 Апробація та тестування роботи системи

Для оцінки стабільності роботи вимірювальних та керуючих підсистем автоматизованого комплексу можуть використовуватись підходи до аналізу чутливості, точності та надійності функціонування програмно-апаратних засобів [12].

Апробація роботи автоматизованого комплексу маркування ID-табличок проводилась з метою перевірки коректності розроблених алгоритмів, програмного забезпечення та взаємодії між окремими функціональними модулями системи. Оскільки в межах даного бакалаврського проєкту не передбачалося виготовлення повнофункціонального фізичного стенда, тестування виконувалося у програмно-алгоритмічному режимі.

Тестування автоматизованих систем доцільно виконувати на рівні окремих програмних модулів, підсистем та системи загалом, що дозволяє забезпечити коректність функціонування програмно-апаратного комплексу [13].

Основна увага під час апробації приділялася:

- перевірки логіки алгоритму роботи комплексу;
- коректності автоматичного формування G-коду;
- сумісності з прошивкою GRBL;
- правильності керування виконавчими механізмами на рівні команд керування;
- відповідності структури програмного забезпечення вимогам CNC-систем.

Перевірка алгоритму роботи системи.

Алгоритм роботи автоматизованого комплексу, описаний у підрозділі 4.1, був проаналізований на послідовність виконання етапів та коректність переходів між станами системи. Перевірено логіку ініціалізації, процедури базування осей, формування та виконання керуючої програми, а також завершення технологічного циклу.

Усі етапи алгоритму узгоджуються між собою та відповідають типовим сценаріям роботи CNC-установок малого класу.

Тестування формування керуючих програм (G-коду).

Для перевірки працездатності підсистеми генерації G-коду були сформовані тестові приклади маркування ID-табличок з різними параметрами:

- текстові написи різної довжини;
- змінні розміри табличок;
- різні глибини гравіювання та швидкості подачі.

Згенеровані керуючі програми аналізувалися на відповідність стандарту G-коду, підтримуваного прошивкою GRBL. Було перевірено правильність команд переміщення (G01, G00), керування координатами, а також використання M-кодів для керування шпинделем.

Результати тестування показали, що сформований G-код є коректним та може бути безпосередньо переданий до CNC-контролера для виконання.

Перевірка взаємодії програмного забезпечення з контролером GRBL.

Передавання керуючої програми здійснюється через стандартний USB-інтерфейс із використанням G-code sender-програм (UGS, Candle). GRBL коректно приймає та інтерпретує команди, формує сигнали STEP/DIR для керування приводами осей та PWM-сигнал для керування шпинделем.

Також було перевірено логіку обробки сигналів кінцевих перемикачів та аварійних входів (Reset, Hold, E-STOP), що підтверджує можливість безпечної експлуатації системи.

Загальні результати апробації.

Проведена апробація підтвердила працездатність розробленого алгоритмічно-програмного забезпечення автоматизованого комплексу. Запропоновані рішення забезпечують повний цикл підготовки та виконання процесу маркування ID-табличок у автоматизованому режимі.

Отримані результати свідчать про можливість практичної реалізації системи на базі доступної елементної бази та відкритого програмного забезпечення GRBL. У

подальшому система може бути доповнена фізичним CNC-стендом для проведення повномасштабних експериментальних випробувань.

Тестування здійснювалося у вигляді набору сценаріїв (табл.4.1), що моделюють реальні умови експлуатації системи маркування ID-табличок: введення даних, автоматичну генерацію G-коду, передавання команд до контролера GRBL та реакцію системи на стандартні й аварійні ситуації.

Таблиця 4.1 Сценарії тестування алгоритмічно-програмного забезпечення

№	Сценарій тестування	Вхідні дані	Очікуваний результат
1	Стандартна ID-табличка	Текст + серійний номер	Коректна генерація G-коду
2	Довгий текст	>20 символів	Автоматичне масштабування
3	QR/DataMatrix	Код + текст	Побудова траєкторій
4	Зміна матеріалу	Al / Brass / Steel	Зміна режимів різання
5	Помилка базування	Активний кінцевий вимикач (limit)	Перехід у режим Alarm

Результати тестування підтвердили коректність роботи алгоритмів формування макету, генерації керуючої програми та обробки команд контролером GRBL. Система адекватно реагує на зміну вхідних параметрів і аварійні ситуації, що свідчить про логічну завершеність програмної частини комплексу.

Для оцінки доцільності впровадження автоматизованого формування G-коду проведено порівняння запропонованого підходу з традиційним ручним програмуванням CNC-верстатів (табл.4.2).

Як видно з результатів порівняння (табл.4.2), автоматизоване формування керуючих програм забезпечує суттєве скорочення часу підготовки виробництва, зменшує вплив людського фактору та підвищує стабільність якості маркування.

Таблиця 4.2 Порівняння ручного та автоматизованого формування G-коду

Критерій	Ручне програмування	Автоматизоване формування
Час підготовки	Високий	Низький
Ймовірність помилок	Висока	Мінімальна
Повторюваність	Обмежена	Стабільна
Масштабованість	Низька	Висока
Інтеграція з БД	Відсутня	Реалізована

Таким чином, проведена апробація підтверджує працездатність запропонованого алгоритмічно-програмного забезпечення та доцільність його використання в автоматизованому комплексі виготовлення ID-табличок.

Висновки до розділу 4

У даному розділі було розроблено та проаналізовано алгоритмічно-програмне забезпечення автоматизованого комплексу виготовлення металевих ID-табличок. Розглянуто повний цикл функціонування системи - від введення маркувальної інформації до виконання CNC-обробки та отримання готового виробу.

Сформовано алгоритм роботи автоматизованого комплексу, який забезпечує послідовне виконання технологічних операцій з мінімальною участю оператора. Алгоритм охоплює етапи ініціалізації системи, автоматичного формування керуючої програми, базування координатних осей, виконання процесу маркування та контролю результатів обробки.

Розроблено підхід до автоматизованого формування керуючих програм у вигляді G-коду на основі вхідних даних із бази або інтерфейсу користувача. Такий підхід дозволяє відмовитися від ручного програмування CNC-верстата, зменшити ймовірність помилок та суттєво скоротити час підготовки виробництва.

Проаналізовано програмне забезпечення CNC-контролера на базі прошивки GRBL, яке забезпечує інтерпретацію G-коду, формування керуючих сигналів STEP/DIR, керування шпинделем і обробку сигналів кінцевих перемикачів.

Показано взаємодію програмної та апаратної частин CNC-комплексу, що підтверджує коректність обраної архітектури керування.

Також розроблено концептуальний макет графічного інтерфейсу користувача, який відображає основні функціональні модулі системи та забезпечує зручну взаємодію оператора з автоматизованим комплексом. Запропонований інтерфейс дозволяє виконувати введення даних, керування генерацією G-коду, моніторинг стану CNC-системи та контроль виконання технологічних операцій.

Проведена апробація алгоритмічно-програмного забезпечення шляхом функціонального та логічного тестування підтвердила коректність роботи основних програмних модулів і доцільність використання автоматизованого підходу до формування керуючих програм. Отримані результати свідчать про можливість практичної реалізації розробленої системи та її ефективність для задач автоматизованого маркування ID-табличок.

5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОНАНИХ РОЗРОБОК

Економічне обґрунтування виконаних розробок проводиться з метою оцінки доцільності впровадження автоматизованої системи виробництва металевих ID-табличок у порівнянні з традиційним ручним або напівавтоматичним способом маркування. Автоматизація процесу дозволяє зменшити витрати часу, знизити вплив людського фактору та забезпечити стабільну якість готової продукції.

5.1 Аналіз вартості впровадження автоматизованої системи

Для оцінки економічної доцільності впровадження автоматизованої системи визначено орієнтовну вартість основних складових CNC-комплексу маркування ID-табличок. Розрахунок виконується на основі середніх ринкових цін на комплектуючі, що застосовуються у малогабаритних CNC-системах.

До складу витрат на впровадження входять:

- вартість апаратної частини (CNC-обладнання, електронні компоненти);
- вартість програмного забезпечення (використовується відкрите ПЗ);
- витрати на монтаж і налаштування системи.

Орієнтовна вартість автоматизованої системи за середніми цінами ринку наведена в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 Орієнтовна вартість автоматизованої системи

№	Найменування	Орієнтовна вартість, грн (Київ)
1	CNC-механіка (рама, напрямні, гвинти)	28 000
2	Крокові двигуни NEMA17 (3 шт.)	6 000
3	Драйвери A4988 (3 шт.)	1 500
4	Контролер Arduino Uno + CNC Shield	2 200
5	ДС-шпindel 775 + цанга ER11	5 500
6	Гравіювальний інструмент (набір)	1 800
7	Блоки живлення (12 В, 24 В)	4 000
8	Кабелі, кріплення, дрібні комплектуючі	3 000
9	Монтаж і первинне налаштування	5 000
	Загальна вартість системи	57 000 грн

Використання відкритого програмного забезпечення GRBL та безкоштовних САМ-рішень дозволяє уникнути витрат на ліцензійне ПЗ, що суттєво знижує загальну вартість системи.

5.2 Порівняння витрат ручного та автоматизованого виробництва табличок

Для оцінки ефективності автоматизації проведено порівняння витрат часу та трудових ресурсів при ручному та автоматизованому виготовленні ID-табличок.

При ручному виробництві оператор виконує введення даних, налаштування обладнання та контроль процесу, що призводить до значних витрат часу та підвищеного ризику помилок. В автоматизованій системі більшість операцій виконується програмно. Порівняльні характеристики наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 Порівняння ручного та автоматизованого виробництва ID-табличок

Критерій	Ручне виробництво	Автоматизоване виробництво
Час виготовлення 1 таблички	10–15 хв	3–5 хв
Участь оператора	Постійна	Мінімальна
Ймовірність помилок	Висока	Низька
Повторюваність якості	Нестабільна	Стабільна
Можливість масштабування	Обмежена	Висока

З наведеного порівняння видно, що автоматизація процесу дозволяє зменшити тривалість виготовлення однієї таблички більш ніж у два рази.

5.3 Економічний ефект від автоматизації

Економічний ефект від впровадження автоматизованої системи проявляється у:

- скороченні витрат робочого часу;
- зменшенні кількості браку;

- підвищенні продуктивності;
- зниженні витрат на переналаштування обладнання.

За умови виготовлення в середньому 100 ID-табличок на місяць економія часу становить близько 15–20 годин робочого часу. Це дозволяє або зменшити навантаження на персонал, або збільшити обсяг виробництва без залучення додаткових працівників.

Таким чином, навіть за відносно невеликих обсягів виробництва автоматизована система має потенціал окупності протягом 1–2 років експлуатації за рахунок зниження експлуатаційних витрат і підвищення продуктивності.

За умов середньої вартості години роботи оператора у м. Києві автоматизація дозволяє зменшити витрати на оплату праці та підвищити продуктивність без залучення додаткового персоналу.

Висновки до розділу 5

У даному розділі виконано економічне обґрунтування впровадження автоматизованої системи виробництва металевих ID-табличок. Проведений аналіз показав, що застосування CNC-комплексу на базі доступної елементної бази та відкритого програмного забезпечення не потребує значних капітальних вкладень.

Порівняння ручного та автоматизованого способів виготовлення табличок підтвердило доцільність автоматизації за рахунок скорочення часу виробництва, зниження ймовірності помилок та підвищення стабільності якості продукції. Отримані результати свідчать про економічну ефективність запропонованого рішення та можливість його практичного впровадження на підприємствах малого та середнього масштабу.

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврського дипломного проєкту було розглянуто та обґрунтовано доцільність автоматизації процесу виробництва металевих ID-табличок на основі CNC-технологій. Актуальність теми зумовлена зростаючими вимогами до точності, повторюваності та стабільності маркування, а також необхідністю зменшення впливу людського фактору у виробничих процесах.

Для досягнення поставленої мети у роботі було вирішено такі завдання:

1. Проведено аналітичний огляд сучасних технологій механічного маркування та засобів автоматизації процесу виготовлення ID-табличок. У результаті аналізу встановлено, що ручні та напівавтоматичні методи виготовлення табличок характеризуються високою трудомісткістю, значною залежністю від людського фактора та обмеженою повторюваністю якості. Обґрунтовано доцільність застосування CNC-технологій для автоматизованого маркування металевих виробів.

2. Проаналізовано існуючий виробничий процес та визначено його вузькі місця, зумовлені участю оператора. Виявлено, що основними недоліками традиційного підходу є тривалий час підготовки керуючих програм, імовірність помилок під час введення даних та складність масштабування виробництва. Це підтвердило необхідність автоматизації ключових етапів процесу.

3. Розроблено структурну та функціональну схеми автоматизованої системи виробництва ID-табличок. Запропонована архітектура системи забезпечує замкнений цикл виробництва - від отримання маркувальної інформації до виконання CNC-обробки та контролю результату. Описано взаємодію програмних і апаратних підсистем комплексу.

4. Виконано вибір CNC-обладнання та елементної бази для реалізації системи автоматизації. Обґрунтовано використання мікроконтролерної платформи Arduino з прошивкою GRBL як CNC-контролера, крокових двигунів NEMA17 з драйверами A4988, кінцевих перемикачів та компактного DC-шпинделя з гравіювальним

інструментом. Сформовано перелік основних елементів, що підтверджує можливість практичної реалізації системи.

5. Розроблено алгоритмічно-програмне забезпечення автоматизованого комплексу маркування. Сформовано алгоритм роботи системи, розглянуто процес автоматичного формування керуючих програм у вигляді G-коду та описано програмне забезпечення CNC-контролера GRBL. Запропоновано концептуальний макет графічного інтерфейсу користувача, який забезпечує зручну взаємодію оператора з системою.

6. Проведено апробацію та тестування розробленого алгоритмічно-програмного забезпечення. Апробація виконувалася шляхом функціонального та логічного тестування програмних модулів без використання фізичного CNC-обладнання. Результати тестування підтвердили коректність роботи алгоритмів, сумісність з прошивкою GRBL та доцільність автоматизованого підходу до формування керуючих програм.

7. Оцінено економічну ефективність упровадження автоматизованої системи. Проведене економічне обґрунтування показало, що автоматизація процесу виготовлення ID-табличок дозволяє скоротити час виробництва, зменшити вплив людського фактора та забезпечити стабільну якість продукції. Для умов м. Києва запропоноване рішення є економічно доцільним для підприємств малого та середнього масштабу.

У цілому, поставлену мету дипломного проєкту досягнуто, а всі визначені завдання виконано. Розроблений автоматизований комплекс виготовлення металевих ID-табличок може бути рекомендований для впровадження на підприємствах малого та середнього масштабу. Запропоновані технічні та програмні рішення мають потенціал подальшого розвитку шляхом інтеграції систем технічного зору, розширення функціоналу програмного забезпечення та створення повнофункціонального фізичного CNC-стенда.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Leonardo Technology. Procesy laserového značenia [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mylt.sk/e-learning/laser/procesy-laseroveho-znaceni/>.
2. Solaris Laser. eMark DLA – технічний опис лазерного маркувального апарата [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.presa.com/nl/industriemachines/coderen-markeren/laser-markeersystemen/yag-laser-/emark-dla>.
3. Teximp. CNC frézovanie – огляд технології обробки та застосування фрезерних станків з ЧПК [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.teximp.com/zoznam-cnc-produktov/frezovanie>.
4. Caucau. Kompas H-400 HF – вертикальний фрезерний центр [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.caucau.sk/cnc-router-kompas-h400gs/?srsltid=AfmBOoof8G3jngGu5nlaKXvyWpCQEakG6Myj05i5is6Cs09EhhJ9G1C8>.
5. Leonardo Technology. Značenie mikroúderom – опис технології мікроударного маркування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mylt.sk/produkty/mechanicky-mikrouder/>.
6. Automator. Rytie – гравірування на металевих поверхнях [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.automator.com/SK/RYTIE-SK/>.
7. Automator. Ako ražba zvyšuje hodnotu a autenticitu výrobkov? – штампування та механічне нанесення символів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://automatorgroup.sk/blog/ako-razba-zvysuje-hodnotu-a-autenticitu-vyrobkov/>.
8. ISO/IEC 16022:2006. Information technology — Automatic identification and data capture techniques — Data Matrix bar code symbology specification.
9. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
10. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.

11. Безвесільна О. М., Киричук Ю. В., Назаренко Н. М. Перетворювачі механічних величин в електричні [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 156 с.

12. Stakhova A. Determination of dynamic range of stand-alone shock recorders / A. Stakhova, Y. Kyrychuk, N. Nazarenko // Measurement science review. - 2022. - 22 №5. - P. 208-213. <https://doi.org/10.2478/msr-2022-0026>

13. Киричук Ю. Огляд методів, модулів тестування підсистем та програми загалом / Ю. Киричук, А. Стахова, Н. Назаренко // Новітні технології. - 2022. - №1(13). - С. 111-122. [https://doi.org/10.52058/2524-0102-2022-1\(13\)-111-122](https://doi.org/10.52058/2524-0102-2022-1(13)-111-122)