

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
Факультет комп'ютерних наук

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

Завідувача кафедри АКІТ

кандидат технічних наук, доцент

_____ М. І. Сіделев

« ___ » _____ 2026 р

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ЛАЗЕРНОГО ВИГОТОВЛЕННЯ
ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ

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

Освітня програма: «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Здобувач

_____ В.О. Герасимюк
« ___ » _____ 2026 р.

Керівник д. т. н., професор

_____ О.М. Трунов
« ___ » _____ 2026 р.

Консультант

докт. біол. наук, професор

_____ Л.І. Григор'єва
« ___ » _____ 2026 р.

зовнішнього контуру деталей довільна. Деталь має отвори форма та розташування яких теж змінюється. Матеріал алюміній, сталь, АМГ. Підприємство виконувало замовлення, однак, за існуючим планом розвитку має потребу наростити випуск продукції із листового матеріалу. Підприємство поставило задачу розробити автоматизовану систему лазерного виготовлення деталей із листового матеріалу. **Перед вами особисто як автора альтернативного проєкту було поставлено задачу запропонувати засоби, що дозволять збільшити ефективність технологічного процесу і зменшити витрати матеріалу. Розробити автоматизовану систему керування, яка б виготовляла деталі із листових матеріалів шляхом аналітичного формування моделей руху різачка за довільним контуром деталі, що забезпечує трьох координатне переміщення системи приводів.**

6. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

- провести огляд сучасних підходів не механічного різання для виготовлення деталей складного контуру із листового матеріалу;

- обґрунтувати, поставити та розв'язати задачі про синтез системи переміщення лазерного різачка у АСК для виготовлення деталей із листового матеріалу;

- поставити та розв'язати задачі про температурне поле та засоби контролю якості у АСК виготовлення деталей із листового матеріалу;

- розробити структуру АСК та провести імітаційне моделювання засобів переміщення лазерного різачка, синтезувати та дослідити параметри перехідних процесів в розробленій системі керування переміщенням в сучасних середовищах, наприклад, інструментами Simulink у середовищі MathLab;

5) перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Блок-схеми систем, рисунки загальних видів елементів конструкцій, схематичні зображення, блок схеми алгоритмів програм, екранні відображення фрагментів ПЗ (скрін-шоти), осцилограми процесів результатів моделювання роботи елементів. Презентація.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв
1	Трунов О. М., д. т. н. професор каф. АКІТ	05.11.2025	
2	Трунов О. М., д. т. н. професор каф. АКІТ	05.11.2025	
3	Трунов О. М., д. т. н. професор каф. АКІТ	05.11.2025	
4	Григор'єва Л. І., доктор. біол. наук, проф. кафедри екології	05.11. 2025	

7. Дата видачі завдання «05» листопада 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
виконання кваліфікаційної роботи

Тема: **Автоматизована система лазерного виготовлення деталей із листового матеріалу**

№	Найменування роботи	Початок	Закінчення	Примітки
1.	Розробка та затвердження завдання на виконання КМР	09.09.2025	30.10.2025	
2.	Огляд літератури за темою роботи	31.10.2025	17.11.2025	
3.	Складання календарного плану КМР	18.11.2025	20.11.2025	
4.	Аналіз предметної області	21.11.2025	24.12.2025	
5.	Розробка проектних рішень	25.12.2025	02.03.2025	
6.	Моделювання, конструювання та програмування СА та РТС	03.03.2026	20.04.2026	
7.	Дослідження СА та РТС, аналіз результатів	21.04.2026	18.05.2026	
8.	Відгук керівника КМР	19.05.2026	23.05.2026	
9.	Оформлення КМР та презентації	26.05.2026	04.06.2026	
10.	Попередній захист	05.06.2026	15.06.2026	
11.	Рецензування	16.06.2026	17.06.2026	
12.	Завершення оформлення КМР та презентації	18.06.2026	19.06.2026	
13.	Захист кваліфікаційної роботи	25.06.2026	25.06.2026	

Здобувач

Герасимюк В. О.

«__» _____ 20__ р.

Керівник роботи

д. т. н., професор

Трунов О. М.

«__» _____ 20__ р.

Анотація

Актуальність теми кваліфікаційної роботи обумовлена в необхідності впровадження високотехнологічних рішень для якісного і ефективного виготовлення деталей із листового матеріалу.

Метою роботи є підвищення ефективності автоматизованих систем виготовлення деталей із листових матеріалів шляхом аналітичного формування моделей руху різачка за довільним контуром деталі, що забезпечує трьох координатне переміщення системою приводів.

Об'єкт дослідження: автоматизація процесів керування різкою деталей із листового матеріалу

Предмет дослідження: моделі, методи, алгоритми та програмне забезпечення керування процесами різки, розділення на окремі потоки та контролю деталей.

Для досягнення мети було поставлено завдання:

- Провести аналіз стану та тенденцій розвитку технологій і засобів різки деталей з листового матеріалу придатних для створення вузлів та підсистем АСК виготовлення плоских деталей, що аналізуються за даними відкритих джерел та патентної інформації;
- Провести аналіз існуючих методів та засобів будови моделей траєкторії руху різачка для різки листових заготовок і формування концептуальної моделі АСК виготовлення деталей із листового матеріалу;
- Розробити концептуальну модель АСК виготовлення плоских деталей з листового матеріалу;
- Поставити та розв'язати задачу про розкрій плоского матеріалу за даними контуру деталі;
- Поставити та розв'язати задачу про температурне поле заготовки та деталі як задачу про розподілені рухомі джерела тепловиділення;

- Поставити та розв'язати задачу про аналітичний синтез параметрів регуляторів переміщення різака;
- Оцінити технічні характеристики та експлуатаційні вимоги до розробленої системи та розробити засоби техніки безпеки при роботі АСК лазерного виготовлення деталей із листового матеріалу та заходи контролю і сповіщення порушення умов безпечної роботи.

Сторінок – 131. Рисуноків – 41. Таблиць – 10. Додатків – 0. Посилань – 37.

Abstract

The relevance of the topic of the qualification thesis is determined by the need to implement high-tech solutions for the high-quality and efficient manufacturing of parts from sheet material.

The aim of the work is to improve the efficiency of automated systems for manufacturing parts from sheet materials by analytically forming models of the cutter's movement along an arbitrary part contour, which ensures the three-axis movement of the drive system.

Object of research: automation of control processes for cutting parts from sheet material.

Subject of research: models, methods, algorithms, and software for controlling cutting processes, separation into individual streams, and part inspection.

To achieve this aim, the following tasks were set:

- To analyze the current state and development trends of technologies and equipment for cutting sheet material parts, suitable for creating units and subsystems of automated control systems (ACS) for manufacturing flat parts, based on open sources and patent information;
- To analyze existing methods and tools for developing models of the cutter movement trajectory for cutting sheet blanks and to form a conceptual model of an ACS for manufacturing parts from sheet material;
- To develop a conceptual model of an ACS for manufacturing flat parts from sheet material;
- To formulate and solve the problem of cutting flat material based on the part's contour data;
- To formulate and solve the problem of the temperature field of the blank and the part as a problem of distributed moving heat sources;

– To formulate and solve the problem of analytical synthesis of parameters for the cutter motion controllers;

– To evaluate the technical characteristics and operational requirements for the developed system and develop safety measures during the operation of the laser cutting machine for sheet metal parts and measures for monitoring and reporting violations of safe working conditions..

Pages – 131. Figures – 41. Tables – 10. Appendices – 0. References – 37.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	12
ВСТУП.....	13
1 РОЗДІЛ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ АСК ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ.....	16
1.1 Аналіз сучасних способів виготовлення деталей складного контуру із листового матеріалу.....	16
1.2 Приклади та аналіз структури функціональних блоків та окремих технічних рішень для інноваційного удосконалення АСК виготовлення деталей із листового матеріалу.....	22
1.3 Сфери застосування засобів різки, порівняння характеристик та можливі застосування.....	32
1.4 Аналіз патентних рішень та встановлення тенденцій розвитку за даними патентного пошуку.....	37
Висновки до першого розділу.....	43
2 ПОСТАНОВКА ТА РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ ПРО СИНТЕЗ СИСТЕМИ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЛАЗЕРНОГО РІЗАКА У АСК ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ.....	45
2.1. Розробка концептуальної моделі лазерного різачка у АСК виготовлення деталей із листового матеріалу.....	45
2.2. Розробка математичної моделі параметрів руху лазерного різачка у АСК виготовлення деталей із листового матеріалу.....	52
2.3. Розробка математичної моделі режимних параметрів лазерного різачка у АСК виготовлення деталей із листового матеріалу.....	56
2.4. Розробка алгоритмічного та програмного забезпечення та моделювання руху лазерного різачка.....	61
Висновки до другого розділу:.....	64
3 ПОСТАНОВКА ТА РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ ПРО ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ У АСК ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ.....	66

3.1. Постановка задачі про статистичне визначення параметрів розподіленого джерела тепла	66
3.2. Постановка задачі про температурне поле із рухомим розподіленим джерелом тепла.....	69
3.3. Розробка алгоритмічного та програмного забезпечення та моделювання температурного поля деталі та заготовки	72
Висновки до третього розділу	85
4 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЛАЗЕРНИМ РІЗАКОМ У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK	87
4.1. Розробка засобів переміщення лазера різки і розкрою листового матеріалу	88
4.2. Синтез параметрів регуляторів систем керування переміщенням лазера різки і розкрою листового матеріалу	92
4.3. Розрахунок параметрів та імітаційне моделювання контурів керування лазерного різачка у середовищі MATLAB/Simulink	94
Висновки до четвертого розділу	114
5 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ РОБОТІ АСК ЛАЗЕРНОГО ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ ТА ЗАХОДИ КОНТРОЛЮ І СПОВІЩЕННЯ ПОРУШЕННЯ УМОВ БЕЗПЕЧНОЇ РОБОТИ.	116
5.1 Особливості роботи АСК та її підсистем, що є джерелами потенціальних загроз та норми, правила і регламентуючі матеріали	116
5.2 Формування додаткових структурних підсистем, що забезпечуватимуть контроль і сповіщення порушення умов безпечної роботи	119
5.3 Обґрунтування та розрахунок інженерно-технічних параметрів пасивного захисту лазерного комплексу	122
Висновки до п'ятого розділу	127
ВИСНОВКИ	128
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	131

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АСК – Автоматизована система керування;

ЧПУ – Числове програмне керування (в англ. варіації **CNC**);

ШІ – Штучний інтелект (в англ. варіації **AI**);

РМ – Робот-маніпулятор;

ПЛК – Програмований логічний контролер (в англ. варіації **PLC**);

ПЗ – Програмне забезпечення;

ККД – Коефіцієнт корисної дії;

CAD – Computer-Aided Design (комп'ютерне проектування);

CAM – Computer-Aided Manufacturing (автоматизована розробка програм обробки);

G-код – Стандартизована мова програмування пристроїв із ЧПУ;

OCT – Optical Coherence Tomography (оптична когерентна томографія, використовується для 3D-моніторингу зони різку);

Industry 4.0 – Четверта промислова революція (концепція розумного виробництва);

Nd:YAG – Неодимовий ітрій-алюмінієвий гранат (тип твердотільного лазера);

ВСТУП

Однією із глобальних задач підвищення ефективності технологічного процесу [1, 2] та рівня якості продукції є перехід до автономних виробничих систем лазерного різання із чистового матеріалу [3]. Приклади успішної реалізації, інноваційних пошуків розв'язку задачі заощадження демонструють зменшення витрат матеріалу сировини або окремих заготовок за рахунок впровадження ідеї: заготовка з чистою обробкою, які стали практично значущими. Особливої актуальності проблема заготовка із чистою обробкою набуває в умовах сучасного ринку, де ключовими факторами є швидкість випуску продукції, при високій індивідуалізації та швидкій і частій зміні номенклатури замовлень.

На сьогоднішній день, крім механічної різки листових заготовок матеріалів, існує декілька способів не механічної різки: газополуменева, гідрообразивна, електроерозійна, електродугова, плазмова та лазерна. Однак, означенні види різки мають обмежене застосування, що визначається горючістю та електропровідністю матеріалів. Лазерна різка, як особливий спосіб багато фотонної взаємодії практично позбавлена цих обмежень.

Разом з тим, незважаючи на ефективність операцій основного технологічного процесу, невідповідність функціональних можливостей та рівня допоміжних операцій гальмує подальший розвиток потенціалу ідеї чистої заготовки. Комплексне застосування методів підвищення ефективності технологічного процесу, за рахунок впровадження автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та автоматизованого контролю технічних параметрів, як очікується, забезпечать рівень точності та якості. У зв'язку з цим більшість досліджень спрямовується на розв'язок цього переліку проблем.

Відповідно до теми та завдання магістерської кваліфікаційної роботи було конкретизовано актуальність та визначено мету, об'єкт предмет і сформульовано задачі досліджень.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи обумовлена в необхідності впровадження високотехнологічних рішень для якісного і ефективного виготовлення деталей із листового матеріалу.

Метою роботи є підвищення ефективності автоматизованих систем виготовлення деталей із листових матеріалів шляхом аналітичного формування моделей руху різачка за довільним контуром деталі, що забезпечує трьох координатне переміщення системи приводів.

Об'єкт дослідження: автоматизація процесів керування різкою деталей із листового матеріалу.

Предмет дослідження: моделі, методи, алгоритми та програмне забезпечення керування процесами різки, розділення на окремі потоки та контролю деталей.

Для досягнення мети було поставлено **завдання:**

- Провести аналіз стану та тенденцій розвитку технологій і засобів різки деталей з листового матеріалу придатних для створення вузлів та підсистем АСК виготовлення плоских деталей, що аналізуються за даними відкритих джерел та патентної інформації;
- Провести аналіз існуючих методів та засобів будови моделей траєкторії руху різачка для різки листових заготовок і формування концептуальної моделі АСК виготовлення деталей із листового матеріалу;
- Розробити концептуальну модель АСК виготовлення плоских деталей з листового матеріалу;
- Поставити та розв'язати задачу про розкрій плоского матеріалу за даними контуру деталі;

- Поставити та розв'язати задачу про температурне поле заготовки та деталі як задачу про розподілені рухомі джерела тепловиділення;
- Поставити та розв'язати задачу про аналітичний синтез параметрів регуляторів переміщення різача;
- Оцінити технічні характеристики та експлуатаційні вимоги до розробленої системи та розробити засоби техніки безпеки при роботі АСК лазерного виготовлення деталей із листового матеріалу та заходи контролю і сповіщення порушення умов безпечної роботи.

1 РОЗДІЛ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ АСК ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ

1.1 Аналіз сучасних способів виготовлення деталей складного контуру із листового матеріалу

Більшість розповсюджених виробничих дільниць, що працюють у світі та в Україні і займаються лазерним різанням, використовують, як окремі станки ЧПК, так і верстати, що інтегровані до складу автоматизованих систем керування (АСК) [15-23].

Один із характерних представників верстату лазерної різки зображено на фото у процесі вирізки отворів спеціальної форми (рисунок 1.1.1) [16].

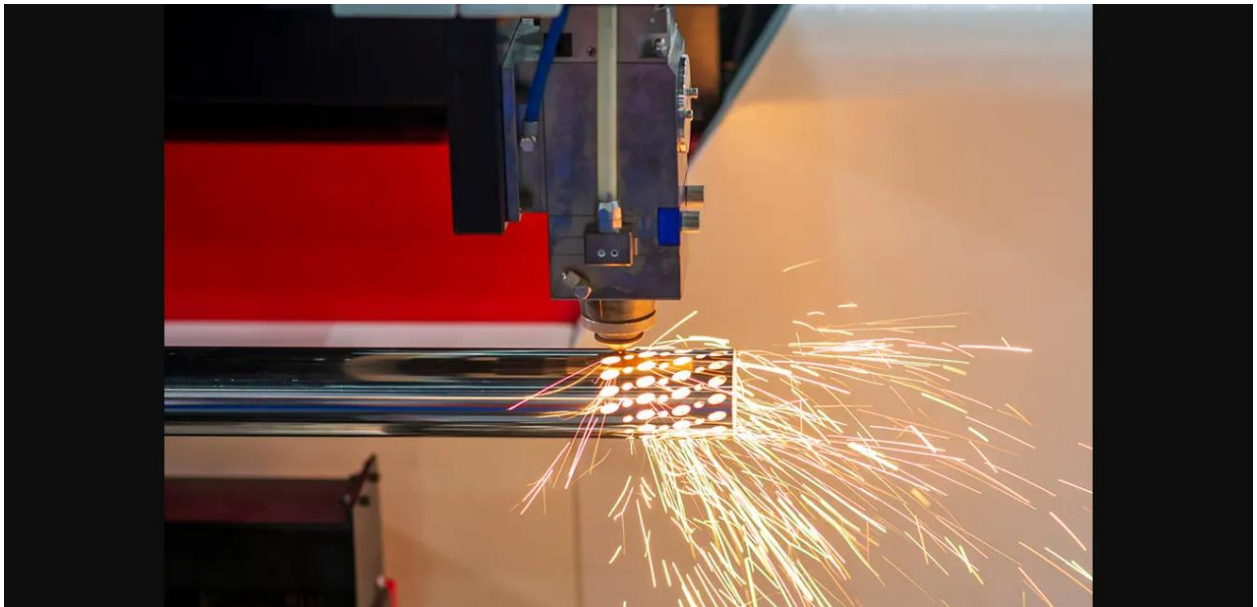


Рисунок 1.1.1 – Фото лазерної вирізки системи отворів довільної форми у тілі труби [16]

Станок передбачає у своєму складі лазерний різак та інші структурні блоки, додаткові засоби та спеціальні вузли. До них відносяться засоби переміщення різача, кріплення та регульованого повороту тіла (у даному випадку труби), засоби

продувки повітря та візуального контролю. Крім того, до складу станка будуть включені джерела живлення лазера, що забезпечують стабілізацію струму лазера. Джерела, що живлять інші механізми і системи із джерелом живлення лазера незв'язані електрично між собою.

Другим характерним представником верстатів лазерної різки, що зображено на фото, яке зафіксувало процес вирізки отворів у виді плоских тіл спеціальної форми (рисунок 1.1.2) із тонкого листового матеріалу [17].

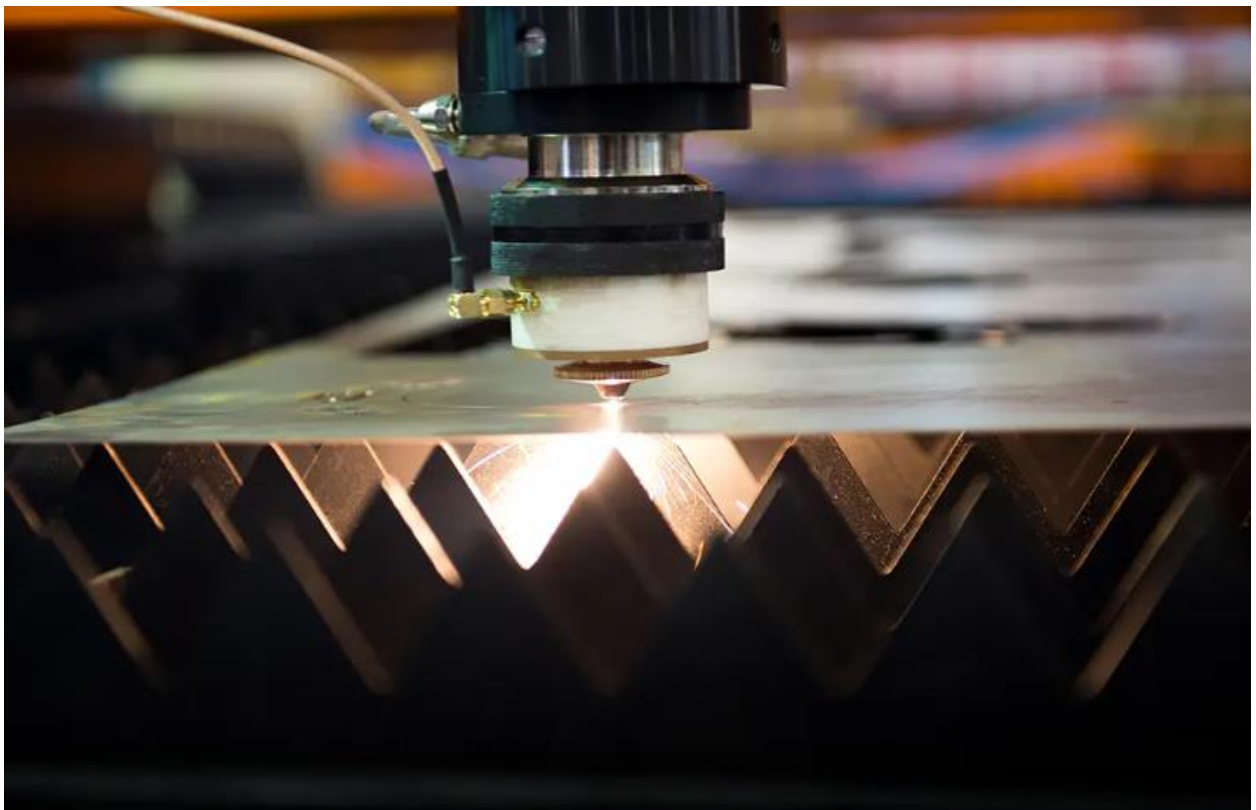


Рисунок 1.1.2 – Фото лазерної вирізки системи отворів у виді плоских тіл спеціальної форми із тонкого листового матеріалу [17]

Приклад, що демонструє варіанти розширення можливостей устаткування станка лазерної різки представлено на фото (рисунок 1.1.3). На відміну від технологічного устаткування для різки тонкого листового матеріалу (рисунок 1.1.2) устаткування для різки товстого матеріалу доповнюється системою опорних виступів трикутної форми. Оскільки на них опирається більш товстий, а значить і важчий лист заготовки, то їх виготовлено більш товстими підвищеної міцності. Крім того, оскільки товщина листа, збільшується, то відходи речовини і газу, що виникають у наслідок різання збільшуються пропорційно товщині листа.

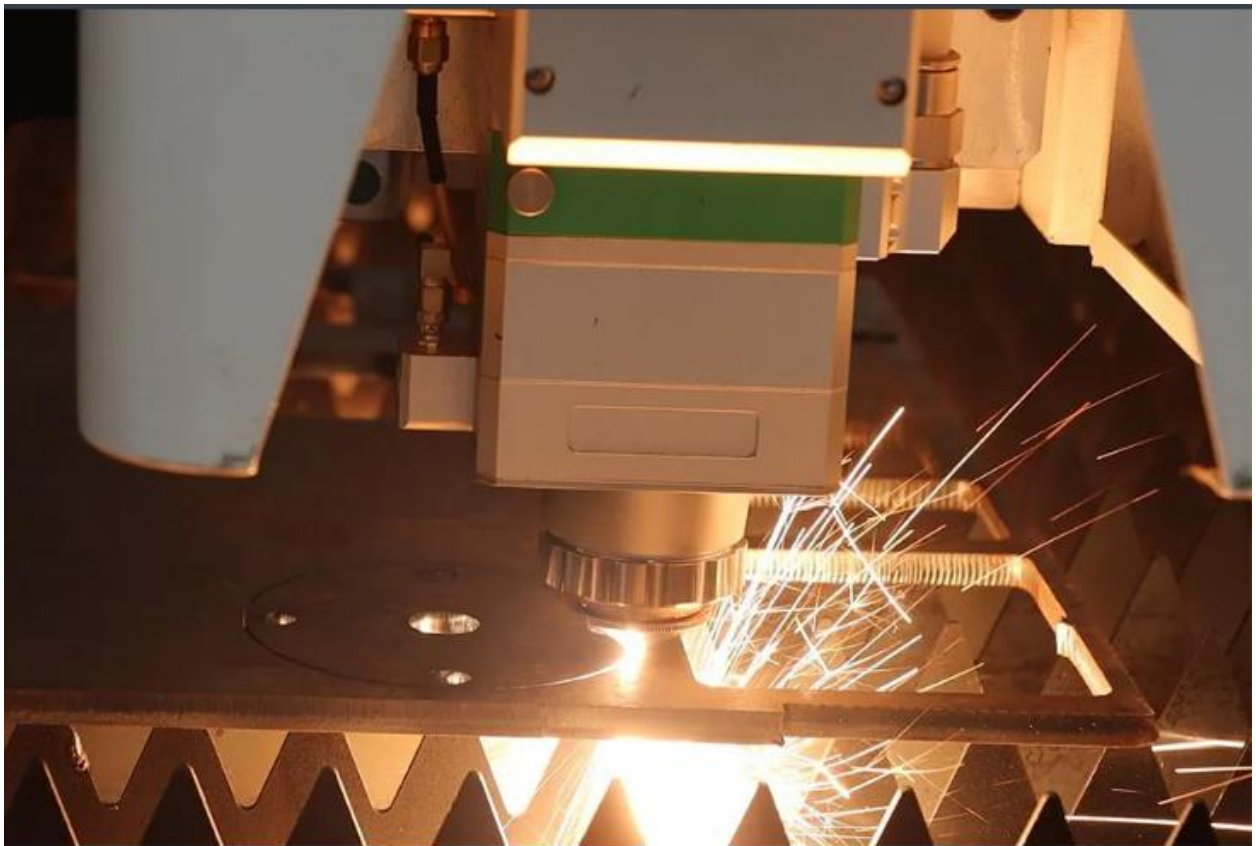


Рисунок 1.1.3 – Фото лазерної вирізки системи отворів у виді плоских тіл спеціальної форми із товстого листового матеріалу [17]

Останнє зумовлює потребу збільшеної подачі повітря у робочу зону різачка та збільшувати потужність витяжної вентиляції.

Крім того, при збільшенні товщини листового матеріалу якість стінок падає, що в свою чергу буде потребувати контролю та регулювання параметрів різки: швидкості руху та режимних параметрів лазера. Означене дає підстави заключити, що збільшення товщини листа погіршує якість стінок поверхні уздовж різку [17]. У зв'язку з цим висновком застосування відео контролю якості різку буде наступним необхідним кроком для створення універсальних систем різку. Також, на підставі вивчення деталей, що придатні виробляти такі АСК рисунок 1.1.4 комплексне застосування засобами згину та зварювання суттєво розширяють можливості такого утаткування.

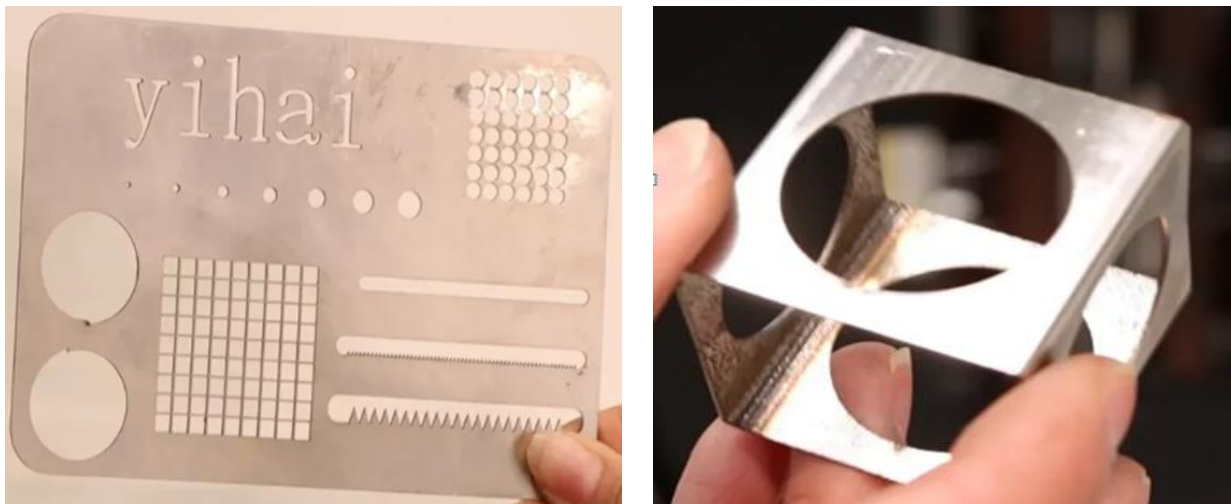


Рисунок 1.1.4 – Фото деталей, що виготовлено шляхом лазерної вирізки системи отворів у виді плоских тіл спеціальної форми із тонкого та товстого листового матеріалу [17]: А- панель провітрювання корпусу; Б – тіло для кріплення.

Прикладом спроб удосконалення окремого верстату є конструкція, яка відома на ринку як верстат лазерної різки з ЧПК Trumpf TRUMATIC L [20]. Однак, узагальнюючи спостереження за процесом розкрою плоского листового металу

різаком станка лазерної різки стає зрозуміло, що окреме удосконалення станка не забезпечить виконання потрібних операцій, які виконуються вручну в зоні підвищеної небезпеки. Останні є суттєвими недоліками, не зважаючи на привабливість різку (ширина, якого становить приблизно 0,2 – 0,5 мм, та при тому, що лазером розрізається більшість конструкційних, інструментальних та легированих сталей, нержавіючі сталі, деякі марки алюмінію, титан та ін.). Застосування для керування процесом переміщення різка по контуру здійснюється по координатам його точок, що дозволяє вирізати деталі довільної форми. Однак необхідність формування масивів цих точок загальмовує процес навчання та програмування рухів. Лазерне різання найкраще проявляє себе при розкрої тонколистових металів товщиною від 0,4 мм до 16 мм, де за точністю та якістю обробки, а також швидкістю різання – воно поза конкуренцією [20].

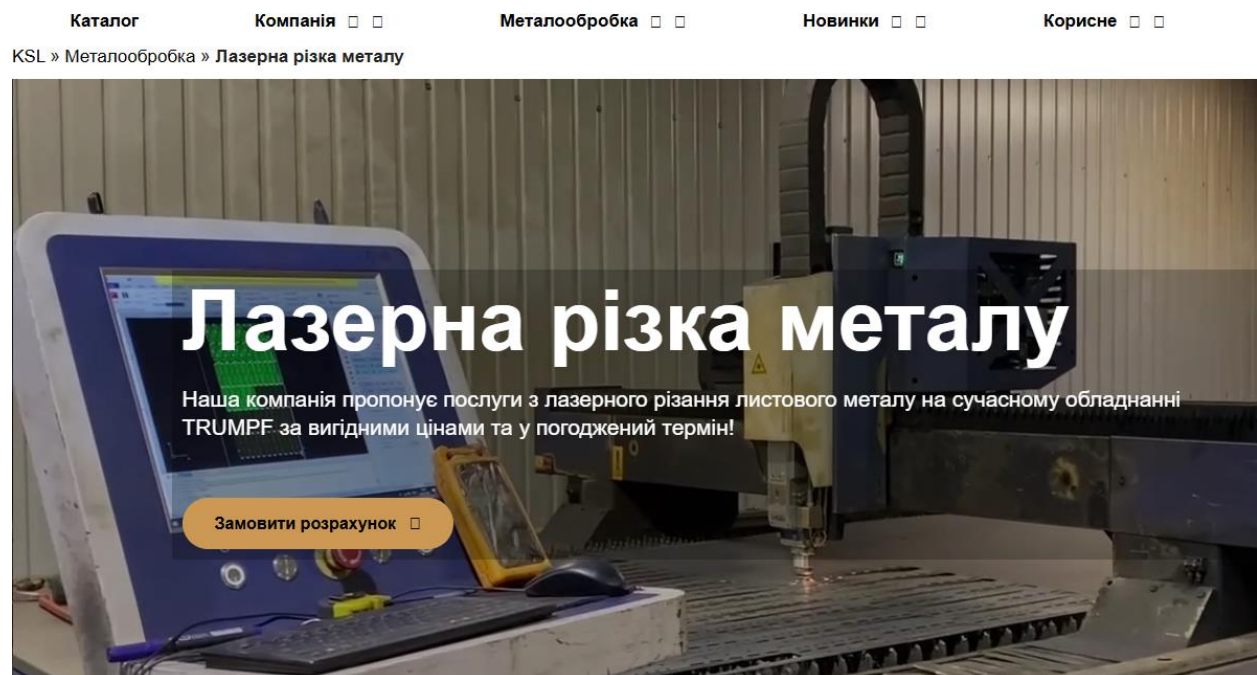


Рисунок 1.1.5 – Фото верстату лазерної різки ЧПК Trumpf TRUMATIC L [20].



Рисунок 1.1.6 – Фото робочої зони верстату лазерної різки ЧПК Trumpf TRUMATIC L [20].

Сьогодні коли, успіхи розвитку одноплатних-комп'ютерів, контролерів та досвід впровадження автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки прикладом для створення АСК слугує системи [AXYZ CNC ROUTERS](#) & [AUTMAED SYSTMS](#) (Рисунок 1.1.7) [21].

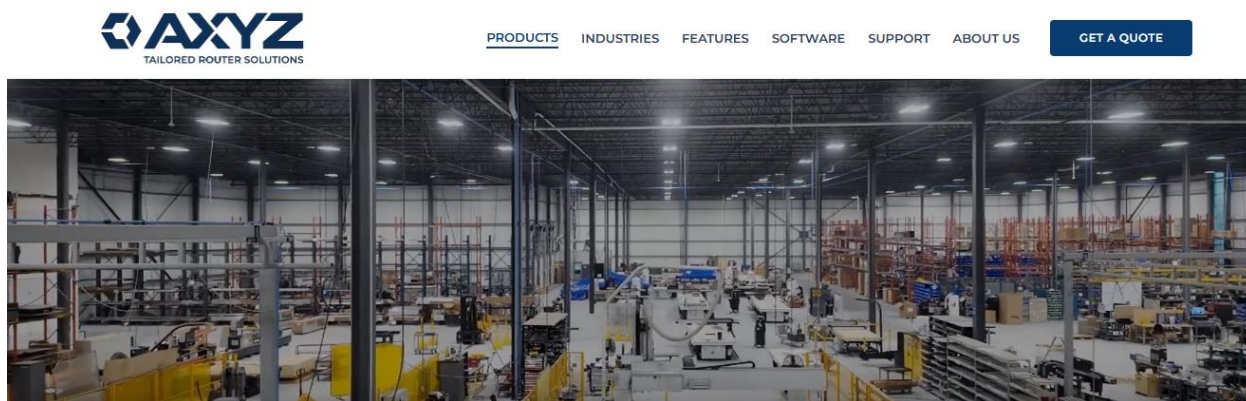


Рисунок 1.1.7 – Фото виробничої зони лазерної різки систем [AXYZ CNC ROUTERS](#) & [AUTMAED SYSTMS](#) [21].

Аналіз пропозицій станків лазерної різки АСК, що було представлено на виставці CNC EXPOLONDON CNC EXPO - 2026 TRADE SHOW FOAM EXPO NORTH AMERICA 2026 CNC EXPOONTARIO CNC EXPO - 2026 [21] демонструє, що сучасні АСК повинні проектуватись, як безлюдні технології.

1.2 Приклади та аналіз структури функціональних блоків та окремих технічних рішень для інноваційного удосконалення АСК виготовлення деталей із листового матеріалу

Сьогодні багато технічних університетів, зокрема TU Berlin, розглядають лазерне різання не просто як технологічну операцію, а як фундамент «цифрового виробництва». На практиці ми бачимо, що найбільший біль інженерів – це гнучка перебудова станка під умови масової персоналізації. Уявіть ситуацію: кожна деталь, що потрапляє на стіл, має іншу товщину, тип металу або навіть відрізняється термічним станом після попередньої обробки. Традиційні системи АСК в таких умовах часто «пасують»: швидкість зворотного зв'язку просто не встигає за запитами, а спроби синхронізувати рух головки з миттєвим стрибком потужності лазера нерідко призводять до браку.

Для вирішення цих завдань сучасні системи, такі як пакет TC3 CNC Cutting Plus (TF5290) від Beckhoff, впроваджують спеціалізовані технологічні функції, що забезпечують як апаратну так і програмну гнучкість. Одним із ключових аспектів є автоматичне підняття та опускання різачка по осі Z для запобігання колізіям із піднятими фрагментами матеріалу, шанс на появу яких доволі високий при вирізанні складних за контуром деталей, що дозволяє системі працювати автономно в умовах складного розкрою. Крім того, впровадження високоточного виводу M-функцій із часовими мітками (точність до 1 мкс) забезпечує ідеальну синхронізацію імпульсу лазера з траєкторією руху, що є критичним при обробці гострих кутів та малих отворів.

Така інтеграція дозволяє реалізувати параметричну гнучкість, де система автоматично коригує значення швидкості та потужності, спираючись на дані передбаченими за формою контуру. Це нівелює вплив людського фактору та дозволяє лазерному комплексу бути частиною гнучкої виробничої комірки (FMC), що здатна переналаштовуватися на новий виріб за лічені секунди.

Таблиця 1.2.1 – Порівняльний аналіз традиційних АСК та інтелектуальних систем Industry 4.0 у лазерній обробці.

Характеристика	Традиційна система (Traditional CNC)	Система Industry 4.0 (Smart ACS)
Метод програмування	Статичний G-код, підготовлений заздалегідь.	Динамічне коригування траєкторії на основі даних сенсорів.
Синхронізація	Обмежена часом циклу ПЛК (мілісекунди).	Високоточна синхронізація за часовими мітками (мікросекунди).
Реакція на колізії	Зупинка системи або пошкодження головки.	Автоматичне оминання перешкод (функція Lift/Drop).
Адаптація до матеріалу	Ручне налаштування параметрів оператором.	Автоматичний вибір режиму за базами даних та сенсорним моніторингом.

Роль сенсорних систем у забезпеченні автономності та гнучкості АСК

Ключовим фактором, що визначає здатність АСК до гнучкої перебудови без втручання оператора, є інтеграція розгалуженої мережі сенсорів зворотного зв'язку.

У сучасних лазерних комплексах датчики виконують роль органів чуття, які дозволяють системі не просто виконувати жорстко задану програму, а адаптуватися до мінливих умов робочого середовища в реальному часі, Як приклад розглянемо наступні.

1. Системи ємнісного контролю висоти (Precitec, Beckhoff)

Однією з головних проблем при лазерному виготовленні деталей із тонколистового матеріалу є термічна деформація листа під впливом високої температури променя. Для підтримки стабільної якості різку АСК повинна забезпечувати постійну відстань між соплом лазерної головки та поверхнею матеріалу з точністю до міліметрів. Це досягається за допомогою ємнісних датчиків висоти, які інтегруються безпосередньо в різучу головку, дані з яких обробляються високошвидкісними алгоритмами ЧПК, що дозволяє рухом вдовж напрямної по осі Z миттєво реагувати на нерівності матеріалу, запобігаючи колізіям та втраті фокусу.

2. Системи візуального контролю (Machine Vision)

Для реалізації повної автономності в межах концепції Industry 4.0, АСК оснащуються камерами технічного зору. Використання алгоритмів Computer Vision дозволяє системі самостійно вирішувати такі завдання:

Автоматичне визначення країв листа та розрахунок його кута повороту на робочому столі.

Пошук реперних (калібрувальних) міток на попередньо оброблених заготовках для ідеального суміщення нових контурів різання.

Моніторинг стану сопла та виявлення дефектів у зоні різання, що критично для систем «безлюдного виробництва».

3. Моніторинг параметрів середовища та процесу

Гнучка перебудова системи під різні типи матеріалів (наприклад, перехід від кисневого різання чорної сталі до азотного різання нержавіючої сталі) вимагає суворого контролю параметрів допоміжних газів. АСК використовує датчики тиску

та потоку для автоматичного регулювання подачі газу відповідно до обраного режиму. Крім того, важливим елементом є датчики температури та потоку охолоджувальної рідини, які запобігають перегріву лазерного джерела та оптичних компонентів, або утворенню конденсату та забезпечуючи стабільність вихідної потужності.

Таблиця 1.2.2 – Сенсори та їх роль у АСК лазерної різки.

Тип сенсора	Контрольований параметр	Роль у гнучкій перебудові системи
Ємнісний датчик	Відстань сопло-матеріал	Компенсація деформацій листа при зміні товщини/типу металу.
Відеокамера (CCD/CMOS)	Візуальні мітки, контур заготовки	Автоматичне позиціонування без ручної прив'язки координат.
Датчик тиску газу	Тиск O ₂ , N ₂ або повітря	Автоматична адаптація до різних режимів термічного розділення.
Фотодатчик променя	Потужність, відбите випромінювання	Захист оптичного тракту та корекція параметрів у реальному часі.

У контексті сучасної концепції Industry 4.0 гнучкість виробничої системи визначається її здатністю до швидкої та мінімально витратної переналадки при зміні об'єктів виготовлення або властивостей вхідного матеріалу. Для систем лазерного виготовлення деталей із листового матеріалу ця проблема є особливо актуальною

через широку номенклатуру матеріалів та складність геометрії сучасних виробів. Перехід до інтелектуальних АСК вимагає трансформації технічних ресурсів у «розумні об'єкти», здатні самотійно сприймати стан робочого середовища [4].

Концепція гнучкої автоматизації та вибір джерел випромінювання

Розвиток АСК лазерними комплексами пройшов довгий шлях від жорстко заданих алгоритмів до адаптивного керування. Гнучкість системи починається з можливості лазерного джерела миттєво змінювати свої енергетичні характеристики. Сучасні волоконні лазери, такі як серія TruFiber S [8], забезпечують стабільність потужності на рівні $\pm 1\%$, що дозволяє системі підтримувати ідентичну якість різку незалежно від тривалості роботи. Можливість модуляції потужності в діапазоні 2–100% дозволяє одній АСК виконувати як силовий різ товстих плит, так і прецизійне маркування.

Роль сенсорних систем в адаптивному керуванні

Ключовим фактором автономності та гнучкості системи є інтеграція сучасних засобів моніторингу в реальному часі. Для забезпечення якісного різання АСК повинна обробляти дані з таких рівнів:

1. Системи ємнісного контролю висоти. Для підтримки стабільної якості різку АСК повинна забезпечувати постійну відстань між соплом та поверхнею матеріалу з точністю до міліметрів. Це досягається за допомогою ємнісних датчиків, інтегрованих безпосередньо в ріжучу головку. Дані з таких датчиків обробляються високошвидкісними алгоритмами ЧПК, що дозволяє осі Z миттєво реагувати на термічні деформації листа [8].

2. Системи візуального контролю (Machine Vision). Використання алгоритмів технічного зору, таких як VisionLine OCT Detect, дозволяє АСК здійснювати 3D-моніторинг шва та автоматичне позиціонування заготовки. Технологія базується на оптичній когерентній томографії, що дозволяє будувати модель поверхні незалежно від умов освітлення та наявності диму в зоні обробки [6].

3. Моніторинг параметрів середовища та процесу. АСК використовує датчики тиску та потоку для автоматичного регулювання подачі допоміжних газів (кисню, азоту) відповідно до обраного режиму. Це дозволяє реалізувати параметричну гнучкість, де система автоматично коригує *override* швидкості та потужності, спираючись на дані зворотного зв'язку.

Архітектура АСК на основі Edge-технологій

Сучасний розвиток АСК передбачає впровадження технологій Edge Computing (наприклад, Siemens Industrial Edge). Це дозволяє винести складні обчислення за межі критичного циклу ЧПК. Архітектура базується на використанні адаптерів SinumerikAdapter, які збирають високочастотні дані (HF-data) з інтервалом 2 мс [9].

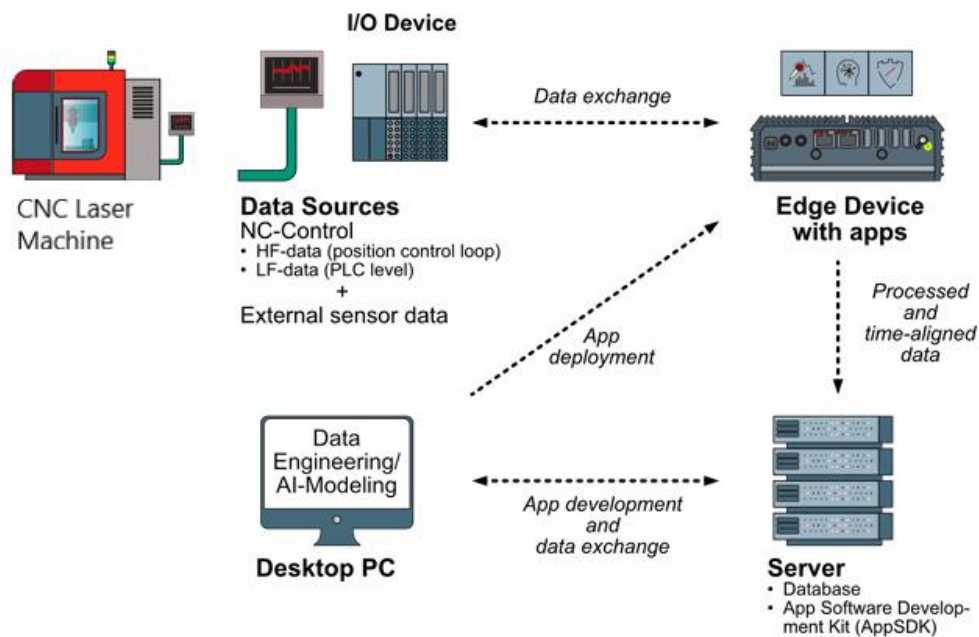


Рисунок 1.2.1 – Структурна схема інтелектуальної АСК із використанням Edge-пристрою

Передача даних всередині системи здійснюється за протоколом MQTT, що забезпечує швидкість обміну між контролером та зовнішніми додатками для аналізу (Рисунок 1.2.1). Це дозволяє впроваджувати предиктивний моніторинг стану оптики та джерела [8].

Програмний інтерфейс: R-параметри та синхронні дії

Наукова новизна сучасних АСК полягає у механізмі динамічної адаптації G-коду. Традиційні програми є статичними, проте в інтелектуальних системах вони стають керованими через інтерфейс R-параметрів [9]. Діапазон R300–R399 часто використовується як комунікаційний шлюз:

- R301 (SyncFlag): Служить семафором для синхронізації G-коду та зовнішнього ПЗ.
- R310 (Feedback Variable): Передає розраховані значення параметрів безпосередньо в активний цикл різання [9].

Для забезпечення миттєвої реакції на непередбачувані ситуації використовуються Synchronous Actions (команди WHEN... DO). Ці команди обробляються в кожному циклі інтерполяції ЧПК (кожні 2–4 мс), що дозволяє перервати рух головки або змінити потужність променя миттєво, не чекаючи завершення рядка програми [9]. Сучасний розвиток систем лазерного виготовлення характеризується переходом від автономних верстатів до повністю інтегрованих роботизованих комплексів, що функціонують у межах єдиного інформаційного середовища Industry 4.0. Головним трендом є створення «машин повного циклу» (full-service machines), які автоматизують увесь процес: від зчитування конструкторського креслення до видачі відсортованих та готових до збирання деталей.

Інтеграція промислових роботів та автоматизоване сортування

Одним із найбільш складних етапів лазерного різання листового матеріалу традиційно залишалось вилучення готових деталей із залишків листа («скелета»). Традиційні методи вимагають використання мікроперемичок (microjoints) для утримання деталей, що призводить до необхідності ручного сортування та додаткової механічної обробки країв.

Сучасні тенденції, втілені в таких системах як TruLaser Center 7030 [33], передбачають повну відмову від мікроперемичок завдяки інтелектуальному керуванню підтримкою листа. Це стає можливим завдяки синхронізації руху ріжучої головки та самого листа, що дозволяє досягати пікових значень динаміки при потужності лазера до 12 кВт (Рисунок 1.2.2).

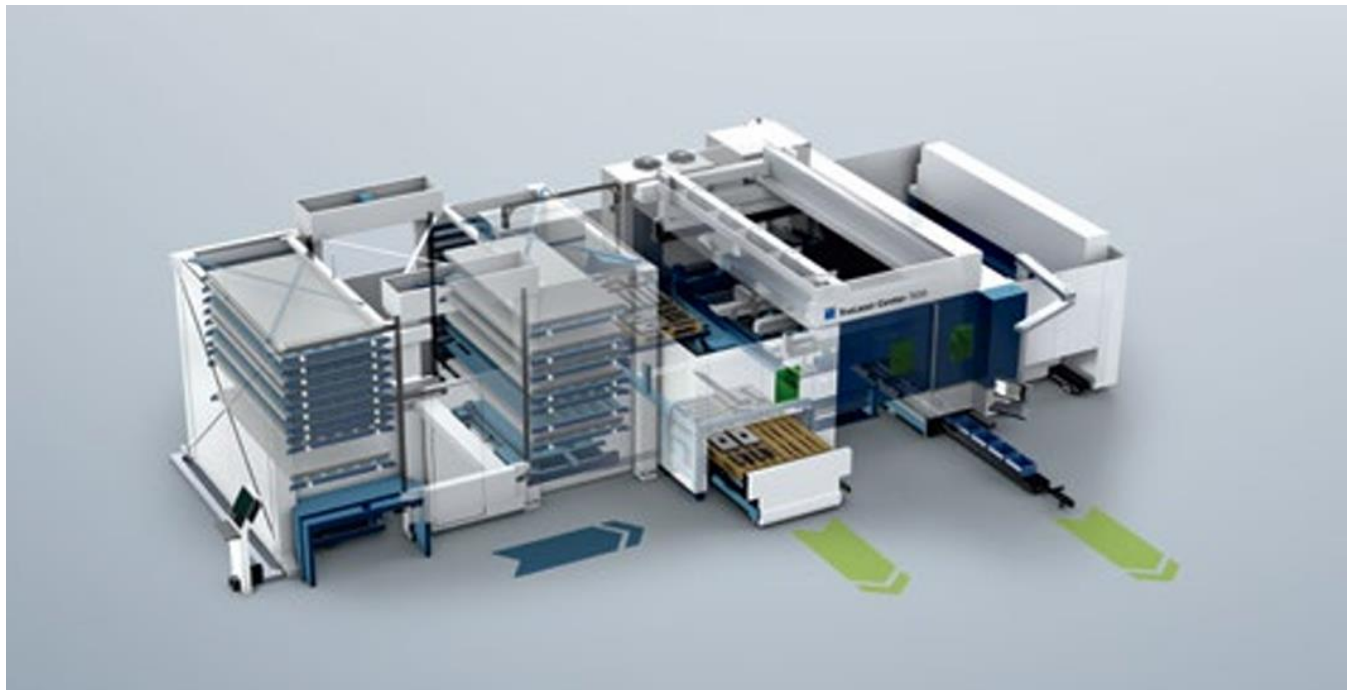


Рисунок 1.2.2 – Інтелектуальна роботизованої комірки лазерного виготовлення [33].

Технічні засоби синхронізації: G-код та R-параметри

Для забезпечення «синергії» між лазерним джерелом та роботоманіпулятором використовуються специфічні механізми обміну даними всередині системи ЧПК (Computerized Numerical Control).

У сучасних АСК (наприклад, на базі контролерів Siemens SINUMERIK 840D sl) зв'язок реалізується через систему R-параметрів. Це числові змінні в

програмуванні NC (Numerical Control), які дозволяють визначати параметри процесу (швидкість подачі v_f , оберти шпинделя n , потужність лазера) не як константи, а як гнучкі значення.

Технічне зауваження: Стандартний діапазон параметрів зазвичай охоплює від R1 до R1000. У складних експериментальних системах певні діапазони (наприклад, R300–R399) резервуються виключно для інтерфейсу зв'язку між G-кодом та зовнішніми Edge-пристроями на базі Python .

Такий підхід дозволяє використовувати Synchronous Actions (синхронні дії) – спеціальні команди, які виконуються паралельно з основним NC-блоком . Наприклад, за допомогою ключових слів DO та WHEN система може миттєво перервати процес різання, якщо сенсори робота виявили перешкоду або зміщення листа.

Роль інтелектуальної сенсорики та штучного інтелекту

Тенденції розвитку вказують на обов'язкове використання систем технічного зору з підтримкою ШІ. Наприклад, технологія VisionLine Detect з AI Filter дозволяє системі розпізнавати контури деталей навіть за наявності відблисків, пилу або забруднень на заготовці.

Для точного позиціонування по осі Z використовується VisionLine OCT Detect, що базується на оптичній когерентній томографії (ОСТ) . Це дозволяє будувати 3D-модель поверхні в реальному часі та вимірювати висоту компонентів незалежно від умов освітлення.

Фізичне підключення таких систем до засобів обробки даних зазвичай виконується через високошвидкісні інтерфейси, такі як X120 Ethernet interface, що забезпечує збір високочастотних даних (HF-data) безпосередньо з контурів позиціонування.

Таблиця 1.2.3 – Порівняльні характеристики методів передачі даних у роботизованих комплексах.

Інтерфейс / Метод	Призначення	Швидкість / Особливість
OPC UA	Стандартизований обмін між пристроями різних виробників.	Мінімальний інтервал опитування ~100 мс.
Central Link	Фірмовий інтерфейс TRUMPF для Industry 4.0.	Повна цифрова прозорість процесу від замовлення до деталі.
Sinumerik Adapter	Прямий доступ до внутрішніх сигналів ЧПК.	Висока частота збору даних (інтервал 2 мс).
R-Parameters Interface	Динамічна адаптація G-коду «на льоту».	Гнучке керування траєкторією через змінні в реальному часі.

Прогноз розвитку

Майбутнє галузі лежить у площині предиктивного моніторингу (Predictive Maintenance) та хмарних платформ навчання ШІ, таких як EasyModel AI . Це дозволить системам самостійно навчатися на малих вибірках даних для автоматичного виправлення похибок фокусу або потужності через функцію CalibrationLine . Використання Edge-обчислень у парі з промисловими роботами забезпечить створення повністю автономних заводів, де роль людини зведеться до дистанційного нагляду через цифрові панелі (dashboards).

1.3 Сфери застосування засобів різки, порівняння характеристик та можливі застосування

Сучасний стан промислового виробництва вимагає від автоматизованих систем керування (АСК) не лише стабільності виконання заданих операцій, а й високого рівня адаптивності. У контексті парадигми Industry 4.0 гнучкість системи лазерного виготовлення визначається її здатністю до миттєвої перебудови при зміні фізико-хімічних властивостей матеріалу, товщини заготовки або складності контуру різання. Це досягається завдяки інтеграції високопродуктивних джерел випромінювання, розгалужених сенсорних мереж та інтелектуальних обчислювальних платформ.

Порівняльний аналіз технологій термічного та механічного розділення матеріалів

Перш ніж розглядати розвиток безпосередньо лазерних АСК, доцільно провести порівняльний аналіз лазерного різання з іншими поширеними методами автоматизованої обробки, такими як гідроабразивне та плазмове різання. Згідно з дослідженнями Д. Крайцажа [5], вибір технології визначає структуру майбутньої АСК.

Лазерне різання забезпечує найвищу точність та швидкість при роботі з тонкими та середніми товщинами металів. Проте, на відміну від гідроабразивного різання, яке є «холодним» методом обробки, лазерний процес супроводжується значним термічним впливом на матеріал [6]. Як зазначають С. Спадло та П. Млинарчик, термічна деформація заготовки при лазерній обробці зростає пропорційно товщині листа, що ставить перед АСК завдання динамічної компенсації теплових розширень у реальному часі [6].

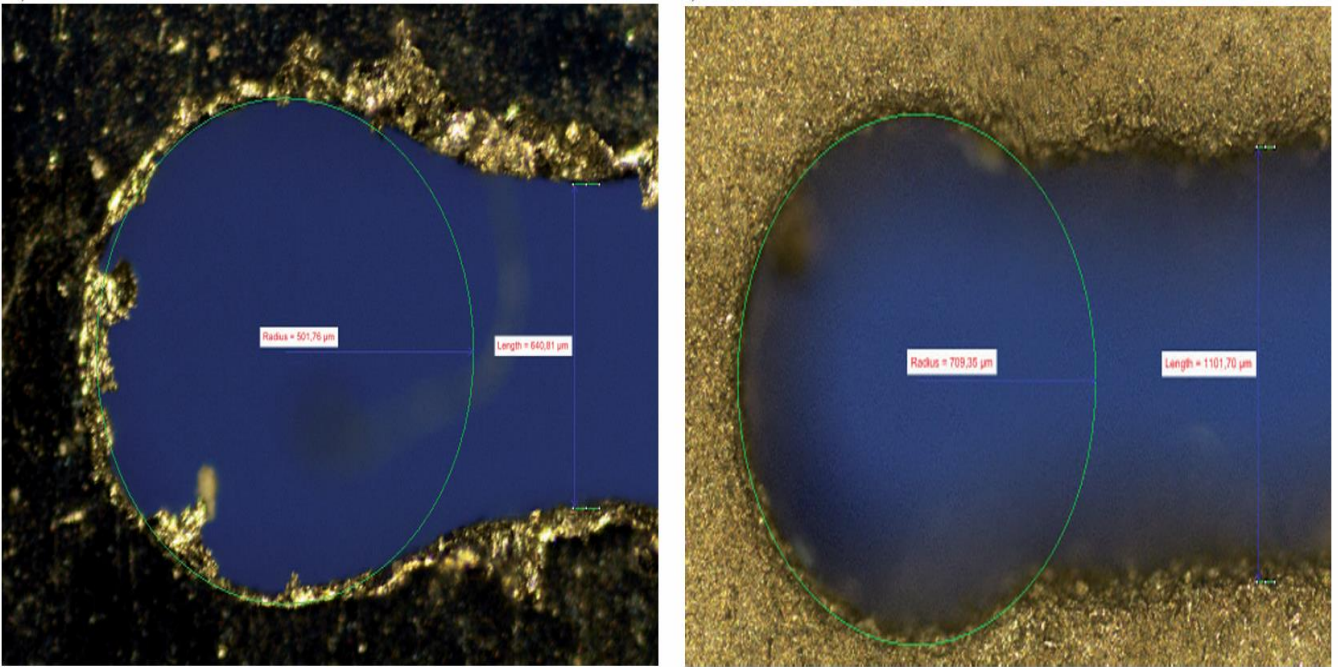


Рисунок 1.3.1– Фото результату різки гідроабразивом нержавіючої сталі товщиною 2мм, вид зверху листа і знизу

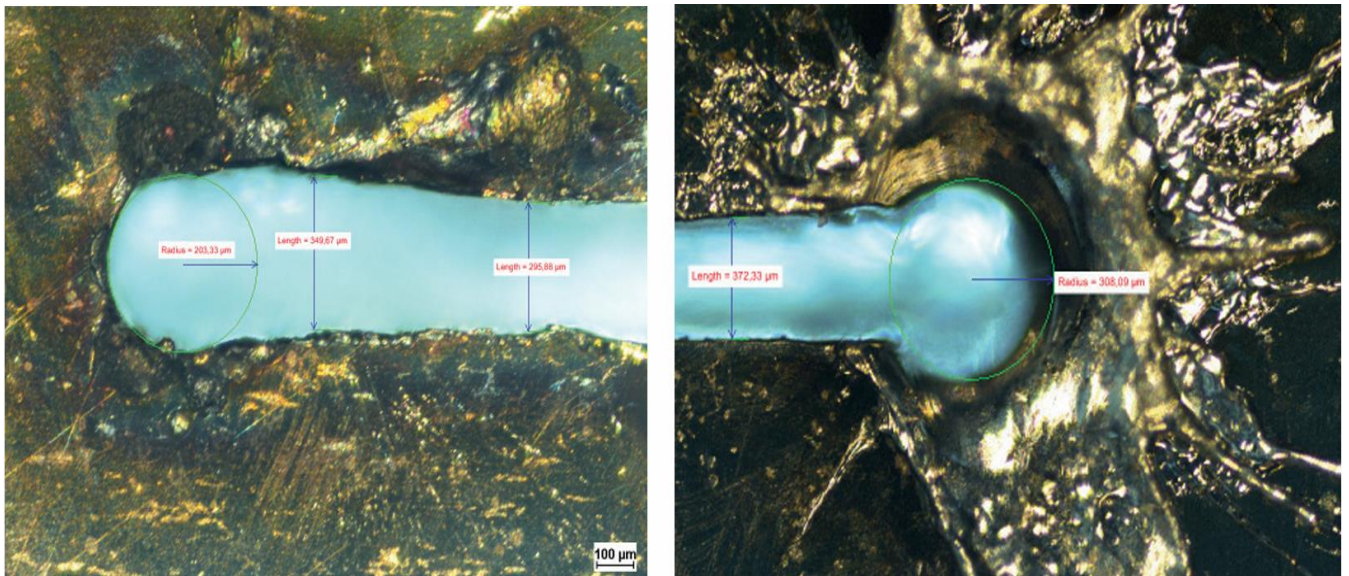


Рисунок 1.3.2 – Фото результату різки лазерним промінem нержавіючої сталі товщиною 2мм, вид зверху листа і знизу

Таблиця 1.3.1 – Порівняльні характеристики методів автоматизованого різання металів [11, 13]

Характеристика	Лазерне різання (CO ₂ / Fiber)	Гідроабразивне різання	Плазмове різання
Точність обробки (мм)	0,05 – 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5
Ширина різку (мм)	0,1 – 0,4	0,7 – 1,5	1,0 – 3,0
Зона термічного впливу	Наявна (незначна)	Відсутня	Значна
Шорсткість поверхні Rz	Низька	Середня	Висока
Гнучкість автоматизації	Дуже висока	Середня	Середня

Саме високий потенціал до автоматизації та можливість точного керування енергетичними параметрами променя роблять лазерні комплекси основою для побудови гнучких виробничих систем.

Еволюція та класифікація промислових лазерних джерел

Розвиток АСК лазерною різкою листового матеріалу відбувався паралельно з еволюцією джерел випромінювання. Кожне нове покоління лазерів висувало специфічні вимоги до систем керування, точності регулювання параметрів та швидкості зворотного зв'язку. Якщо на початкових етапах АСК виконувала роль простого контролера ввімкнення/вимкнення, то сьогодні це багатопроцесорна система, що інтегрована в оптичний тракт.

Сучасна класифікація лазерних джерел для обробки металів базується на типі активного середовища, що визначає довжину хвилі λ та, відповідно, логіку побудови АСК:

Газові (CO₂) лазери. Протягом тривалого часу вони залишалися домінуючим рішенням у галузі (понад 41% ринку). Сучасні АСК для CO₂ лазерів оперують складними системами керування газовим розрядом. Використання конфігурації з дифузійним охолодженням (slab-лазери) дозволило отримати випромінювання високої якості при потужностях до 8 кВт. Основною особливістю для АСК тут є довжина хвилі 10,6 мкм, яка вимагає використання дзеркальних оптичних трактів, що обмежує динаміку маніпулятора порівняно з волоконними системами.

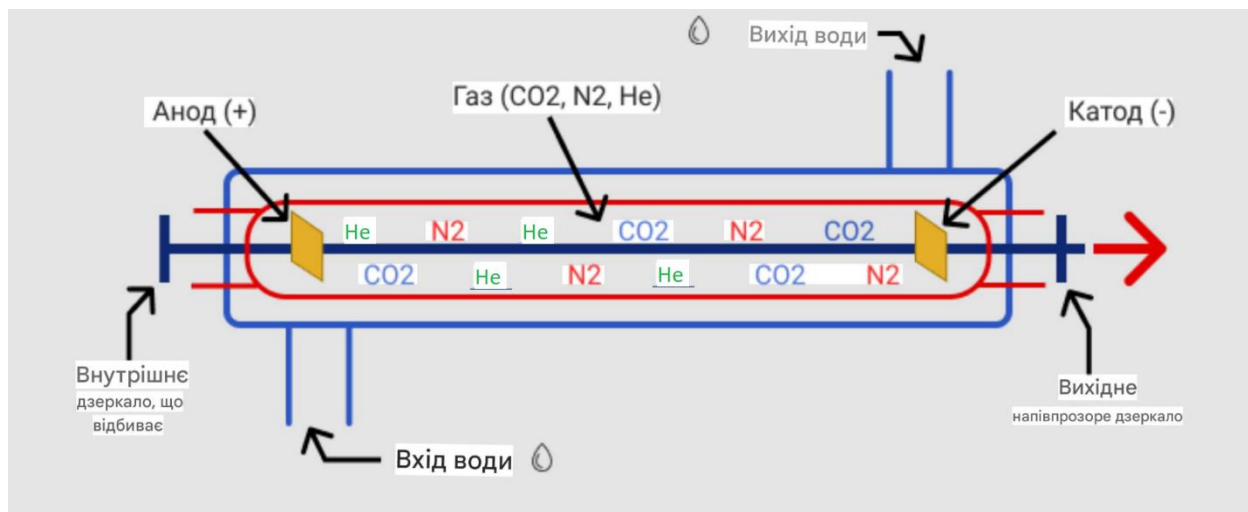


Рисунок – 1.3.3 Схематичне зображення CO₂ трубки

Твердотільні та дискові лазери. Важливим етапом стало впровадження дискових лазерів (Thin Disk), де активне середовище має форму диска товщиною близько 100-200 мкм. Вони в основному складаються з двох частин: твердого основного матеріалу і активних іонів, легованих основним матеріалом. Активні іони мають специфічні властивості, такі як різкі лінії флуоресценції, широкі смуги поглинання та високу квантову ефективність на бажаній довжині хвилі. Але основний матеріал повинен мати такі властивості, як міцність, стійкість до руйнування, висока теплопровідність і оптична якість.

Така геометрія дозволяє ефективно відводити тепло, мінімізуючи ефект «теплової лінзи», що критично для стабільності фокусної плями при високих потужностях.

2026р.

потужностях. АСК таких комплексів повинні забезпечувати прецизійне керування насосними діодами для підтримки якості променя BPP на рівні 2–4 мм·мрад.

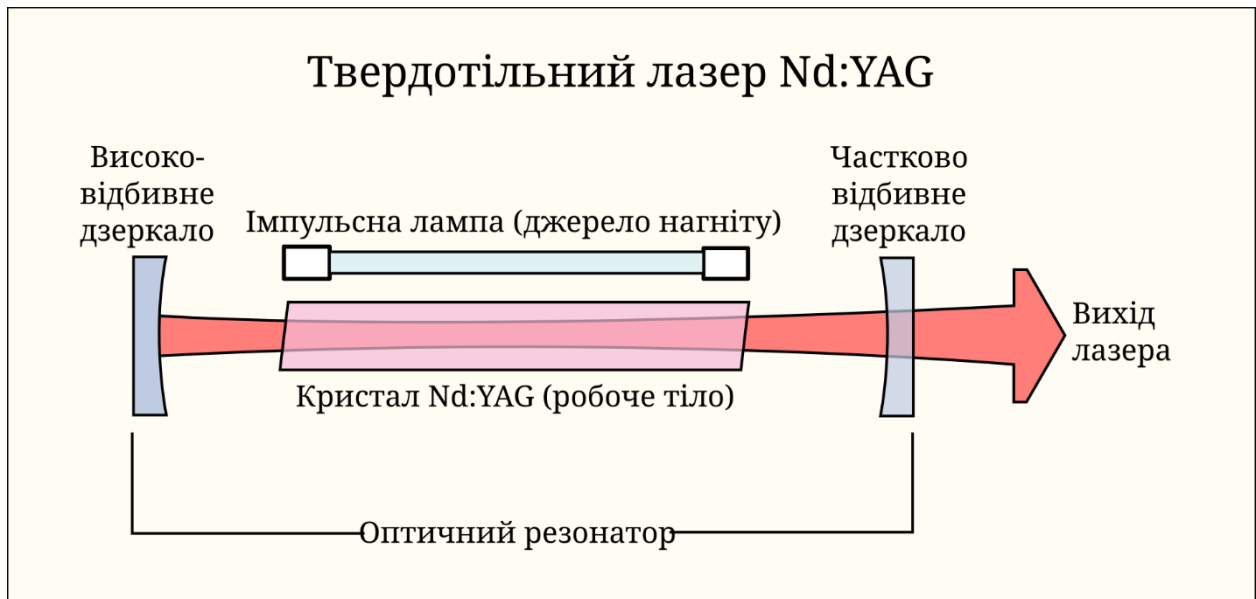


Рисунок – 1.3.4 Схематичне зображення твердотілого лазера [34]

Волоконні (Fiber) лазери. Це найбільш динамічний сегмент сучасної фотоніки. Завдяки монолітному дизайну та відсутності юстирувальних елементів, волоконні лазери (наприклад, серія TRUMPF TruFiber [6]) забезпечують ККД до 40% [8]. Для АСК волоконний лазер є «ідеальним» об'єктом керування, оскільки він дозволяє змінювати потужність за мікросекунди без ризику пошкодження джерела зворотним відбиттям від матеріалу.

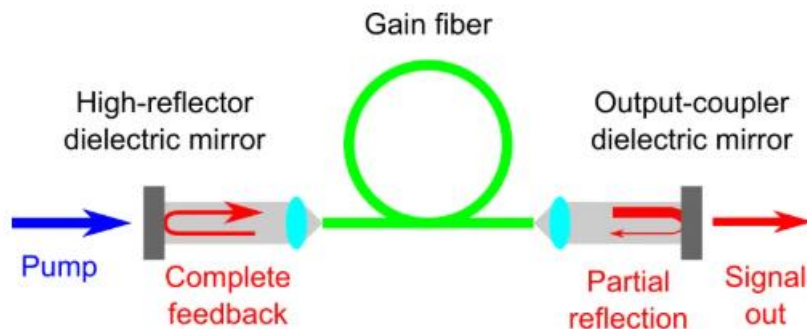


Рисунок – 1.3.5 Схематичне зображення волоконного лазера [35]

Дослідження впливу параметрів процесу на якість виготовлення

Для побудови ефективної АСК необхідно розуміти математичні та фізичні залежності між вхідними параметрами та результатом обробки. Експериментальні дослідження С. Генни та колег [7] демонструють, що якість різку (kerf quality) є функцією багатьох змінних, які АСК повинна контролювати одночасно.

Вплив швидкості та тиску газу. При автоматизованому різанні низьковуглецевих сталей (наприклад, St37-2) АСК використовує кисень як допоміжний газ для екзотермічної реакції [7]. Якщо швидкість руху головки перевищує критичне значення для даної товщини, виникає ефект «недорізу». Навпаки, занизька швидкість призводить до надмірного термічного розширення та утворення ґрату на нижній кромці.

Матеріалозалежність. Обробка нержавіючої сталі (AISI 304) та алюмінієвих сплавів (AlMg3) вимагає зовсім іншої логіки АСК – використання азоту під високим тиском (до 20 бар) для механічного видування розплаву без окислення [7]. Адаптивна АСК повинна автоматично змінювати тиск газу в реальному часі при проходженні кутів та складних радіусів, де швидкість подачі вимушено знижується для дотримання точності траєкторії.

1.4 Аналіз патентних рішень та встановлення тенденцій розвитку за даними патентного пошуку

Для визначення актуальних векторів розвитку автоматизованих систем керування (АСК) лазерною різкою листового матеріалу було проведено патентний пошук у міжнародних базах даних (Google Patents, Espacenet, WIPO). Основний акцент було зроблено на рішеннях, що забезпечують повну автономність циклу обробки, інтелектуалізацію процесів планування траєкторій та мінімізацію втручання оператора у критичні фази виробництва.

Інтелектуальне планування траєкторій на основі технічного зору та ШІ

Сучасний етап розвитку АСК характеризується переходом від жорстко детермінованих алгоритмів руху до адаптивних систем, що базуються на машинному зорі. Аналіз патенту, присвяченого інтелектуальному плануванню шляху, наприклад рішення представлені в документах з AI Path Planning [10], демонструє впровадження контурів зворотного зв'язку за відеосигналом.

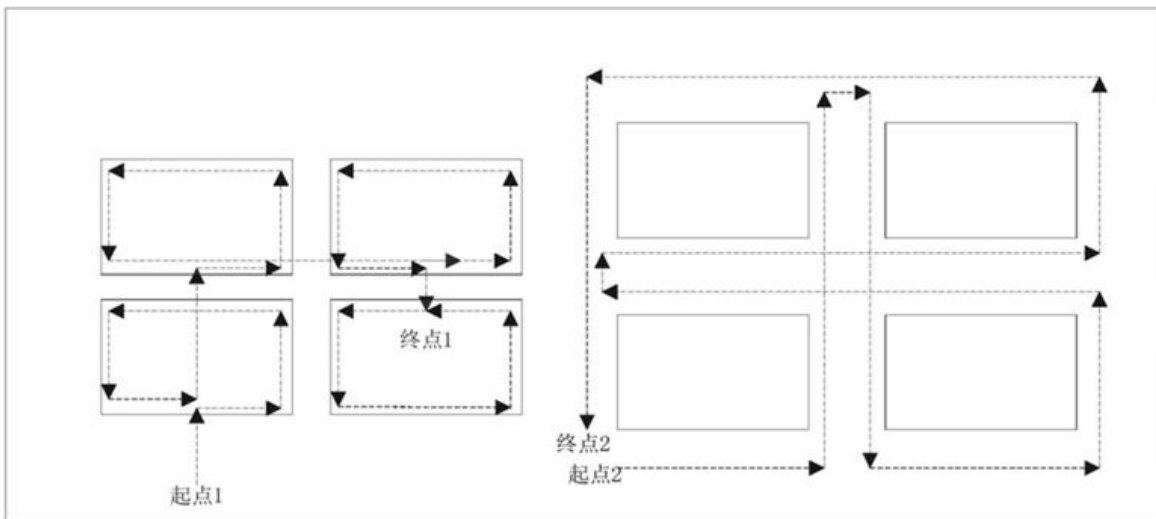


Рисунок 1.4.1 – Блок-схема та алгоритм інтелектуальної системи планування траєкторії різання з використанням нейронних мереж

Як видно з Рисунку 1.4.1 АСК не просто відпрацьовує статичний G-код, а здійснює безперервний аналіз робочої зони. Система технічного зору ідентифікує реальні межі заготовки та наявні дефекти. Алгоритм ШІ, інтегрований у контролер, у реальному часі коригує вектор швидкості та потужність випромінювання, що дозволяє уникнути перегріву гострих кутів та забезпечує рівномірність ширини різки. Це вирішує проблему «теплових деформацій», які часто виникають при обробці складних контурів на великих швидкостях[10].

Автоматизація мехатронних систем сортування готової продукції

Важливою складовою комплексного лазерного верстата є модуль автоматизованого вивантаження. Патентні рішення провідних виробників (зокрема розробки *Trumpf*) спрямовані на створення універсальних сортувальних систем,

здатних працювати з деталями будь-якої конфігурації без переналагодження захватів[11].

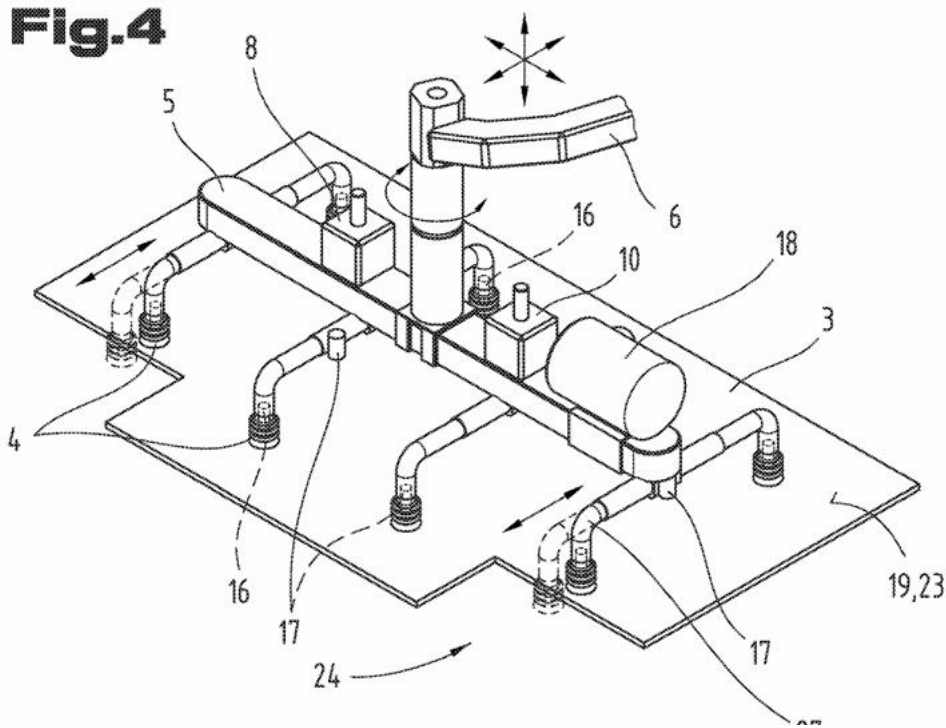


Рисунок 1.4.2 – Загальна компоновка та кінематична схема роботизованого модуля сортування готових деталей

На Рисунку 1.4.2 представлено мехатронну структуру модуля сортування. АСК верстата передає координати центру мас кожної вирізаної деталі на контролер маніпулятора. Особливістю цього рішення є високий ступінь синхронізації: маніпулятор починає позиціонування над детальною ще до завершення фінального різку, що радикально скорочує час циклу.

Адаптивні системи підтримки та запобігання колізіям (SmartGate)

Одним із критичних ризиків при автономній роботі верстата є перекидання деталей після їхнього відокремлення від листа. Патентні рішення, відомі як **SmartGate** (Рисунок 1.4.3), пропонують активну систему підтримки матеріалу[12].

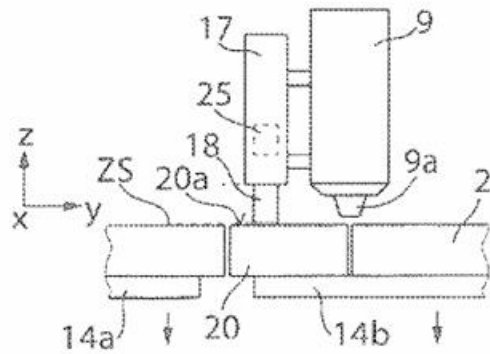


Fig. 3D

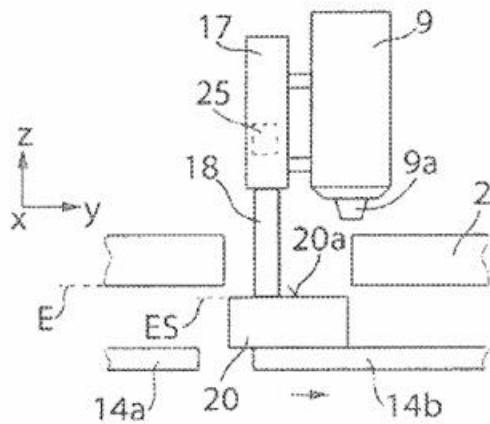


Fig. 3E

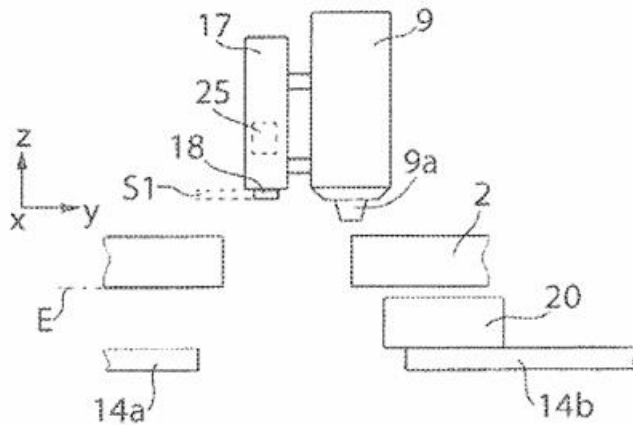


Fig. 3F

Рисунок 1.4.3 – Схема функціонування адаптивних опорних елементів для забезпечення стабільності заготовки та вилучення відходів

Згідно зі схемою на Рисунку 1.4.3, опорні сегменти столу інтегровані в АСК як додаткові керовані осі. Вони автоматично зміщуються, створюючи вільний простір під ріжучою голівкою саме в момент пробою або завершення контуру, що дозволяє деталі або відходам безпечно падати в накопичувач, не створюючи перешкод для

руху головки. Це виключає можливість зіткнення сопла з піднятою деталлю, що є критичним для безлюдного виробництва.

Внутрішній моніторинг та сенсорика ріжучої головки

Для забезпечення стабільної якості обробки сучасні АСК використовують дані з датчиків, інтегрованих безпосередньо в оптичний тракт. Аналіз патенту на інтелектуальну сенсоріку дозволяє детально розглянути будову «розумної» головки[13].

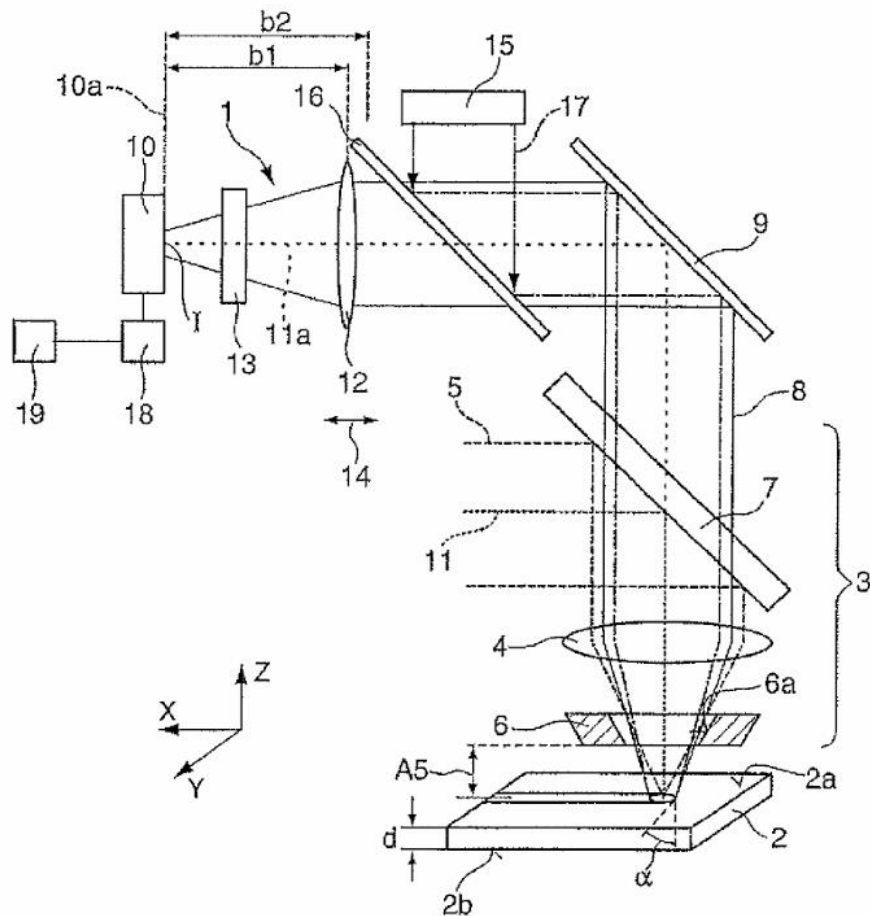


Рисунок 1.4.4 – Конструктивна схема ріжучої головки з вбудованими сенсорами контролю фокусу та стану оптичних елементів

На Рисунку 1.4.4 показано розташування датчиків, що відстежують відбите випромінювання та температуру лінзи. Якщо АСК фіксує критичне забруднення

оптики або нестабільність факела розплаву, вона ініціює автоматичний цикл очищення сопла або коригує положення фокуса за допомогою п'єзоелектричного привода. Такий рівень автоматизації дозволяє підтримувати прецизійну точність обробки протягом тривалого часу без участі сервісного персоналу.

Інтелектуальні захвати на базі ШІ для складних сценаріїв сортування

Завершальним етапом аналізу є розгляд систем, що поєднують ШІ з механічною гнучкістю. У патентах, присвячених AI Sorting (Рисунок 1.4.5), описуються методи динамічного керування вакуумними або магнітними захватами [14].

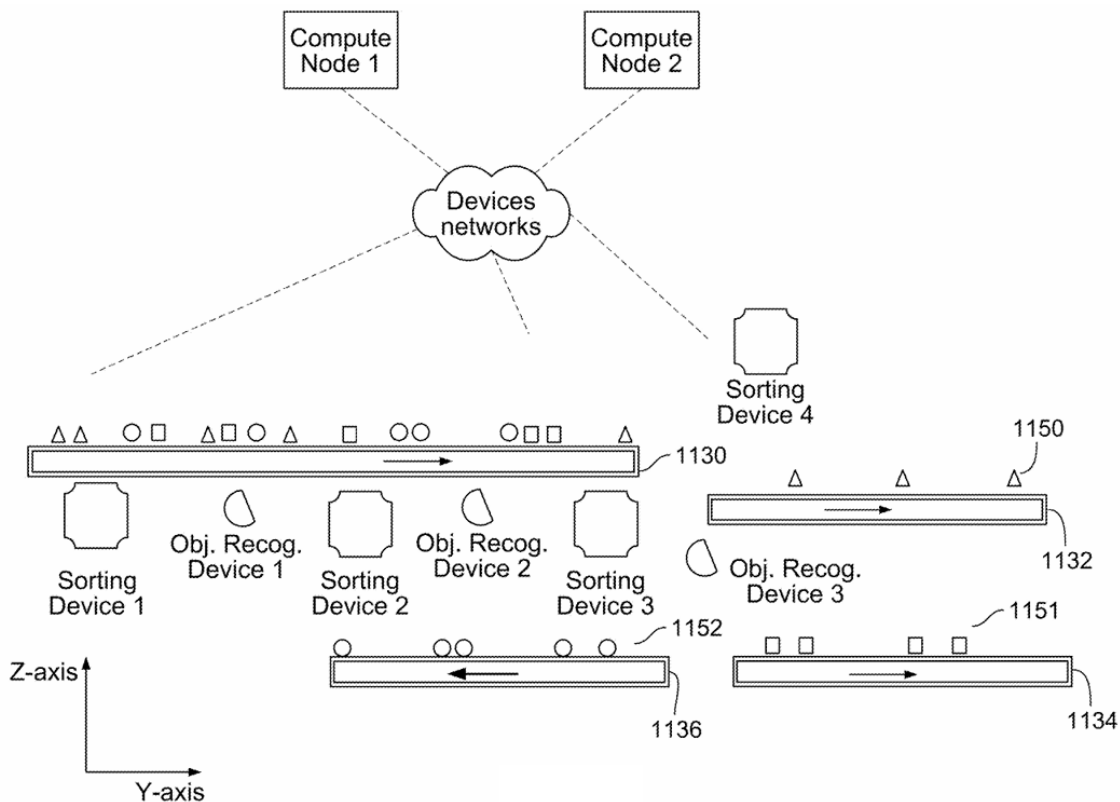


Рисунок 1.4.5 – концептуальна схема інтелектуального сортування деталей

Система, зображена на Рисунку 1.4.5, дозволяє АСК самостійно приймати рішення про конфігурацію зон захвату та позиціонування. Це означає, що при зміні номенклатури деталей верстат не потребує фізичної зміни оснащення. Контролер на

основі CAD-даних активує лише ті сегменти захвату, які гарантують надійну фіксацію деталі без ризику її деформації.

Встановлені тенденції розвитку за результатами аналізу

Аналіз представлених патентних рішень дозволяє сформулювати три основні тенденції розвитку АСК лазерної різки:

1. Глибока інтеграція ШІ в контури керування: Перехід від виконання лінійних команд до інтелектуального аналізу ситуації в зоні різку та автоматичного коригування технологічних параметрів (траєкторії, швидкості, потужності).
2. Сенсорна надлишковість для повної автономності: Використання широкого спектра датчиків (від камер технічного зору до акустичних сенсорів пробую), що дозволяє системі самостійно діагностувати та усувати помилки в процесі роботи.
3. Гнучкість мехатронних вузлів: Створення універсальних систем підтримки та сортування, які керуються єдиним програмним ядром, що забезпечує швидкий перехід на випуск нових виробів у межах концепції гнучкого автоматизованого виробництва.

Отже, сучасна АСК лазерної різки листового матеріалу еволюціонує в бік створення кіберфізичної системи, де програмний інтелект здатний повністю замінити досвід та інтуїцію оператора-технолога.

Висновки до першого розділу

1. Огляд процесу еволюційного переходу від відкриття фізичних основ будови лазерів до удосконаленого устаткування лазерної різки підтверджує небезпеку лазерного випромінювання, у тому числі при створенні складних автоматизованих комплексів різки. Узв'язку з цим АСК процесом різки повинна проектуватись такою, що реалізує тільки безлюдні технології.

2. До її складу повинні увійти додаткові системи стиснутого повітря, та системи подачі не горючих газів або їх сумішей, вентиляції, видалення окалини та бруду, маніпулятори для видалення обрізків та упорядкування деталей
3. Створення концептуальної моделі АСК та її розвиток до математичних моделі у комплексі повинні встановити відповідність між величиною відхилення від контуру деталі довільної форми і компонентами вектора швидкості переміщення різака та режимними параметрами лазера.
4. Аналіз фізико-технологічних параметрів показує, що волоконні лазери є найбільш ефективними для різки листового матеріалу завдяки високому ККД та стабільності променя.
5. Дослідження ринку та патентної документації виявило критичну потребу в інтелектуалізації АСК. Встановлено, що сучасні системи розвиваються в напрямку автономного сортування, адаптивного контролю фокусу та використання ШІ для планування траєкторій.
6. Встановлено, що найбільш слабкою ланкою існуючих систем залишається гнучкість при переході на нові типи виробів, що обґрунтовує необхідність розробки адаптивної АСК у межах даної роботи.

2 ПОСТАНОВКА ТА РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ ПРО СИНТЕЗ СИСТЕМИ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЛАЗЕРНОГО РІЗАКА У АСК ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ

2.1. Розробка концептуальної моделі лазерного ризака у АСК виготовлення деталей із листового матеріалу

На основі аналізу сучасних тенденцій розвитку АСК лазерними комплексами, проведеного в першому розділі, встановлено, що ключовою вимогою до сучасного обладнання є високий рівень автономності та гнучкої перебудови під мінливі виробничі завдання. Для практичної реалізації цих вимог у межах данної роботи розглядатимуться задачі теоретичного синтезу та практичної побудови архітектури системи.

У зв'язку з цим було поставлено задачу розробки концептуальної моделі як перший етап проектування складної кіберфізичної системи. Остання дозволить візуалізувати та логічно структурувати взаємодію між верхнім рівнем керування (інформаційні системи, бази даних, рівень прийняття рішень) та рівнем програмованих логічних контролерів, промислові роботи-маніпулятори, лазерні випромінювачі, спеціальні джерела живлення, інформаційні системи та мережі.

Запропонована концептуальна модель АСК лазерним виготовленням побудована за модульним принципом і розбита на чотири взаємопов'язані підсистеми. Перша – загальна підсистема ІТ-архітектура керування виробництвом. Друга - підсистема логістики та подачі матеріалу. Третя підсистема - роботизованого сортування та безпосереднього переміщення. Четверта - підсистема лазерної різки. Такий підхід дозволяє детально описати кожен контур керування та забезпечити прозорість інформаційних і енергетичних потоків усередині комплексу.

Першою базовою підсистемою для АСК є загальна ІТ - архітектура керування виробництвом, яка забезпечує глобальну інтеграцію лазерного комплексу в інформаційне середовище підприємства відповідно до парадигми Industry 4.0. На

адміністративному рівні її структура (рис.2.1.1) включає хмарні сервіси (Cloud), локальні сервери та мережеве обладнання (Router, Internet, мережі).

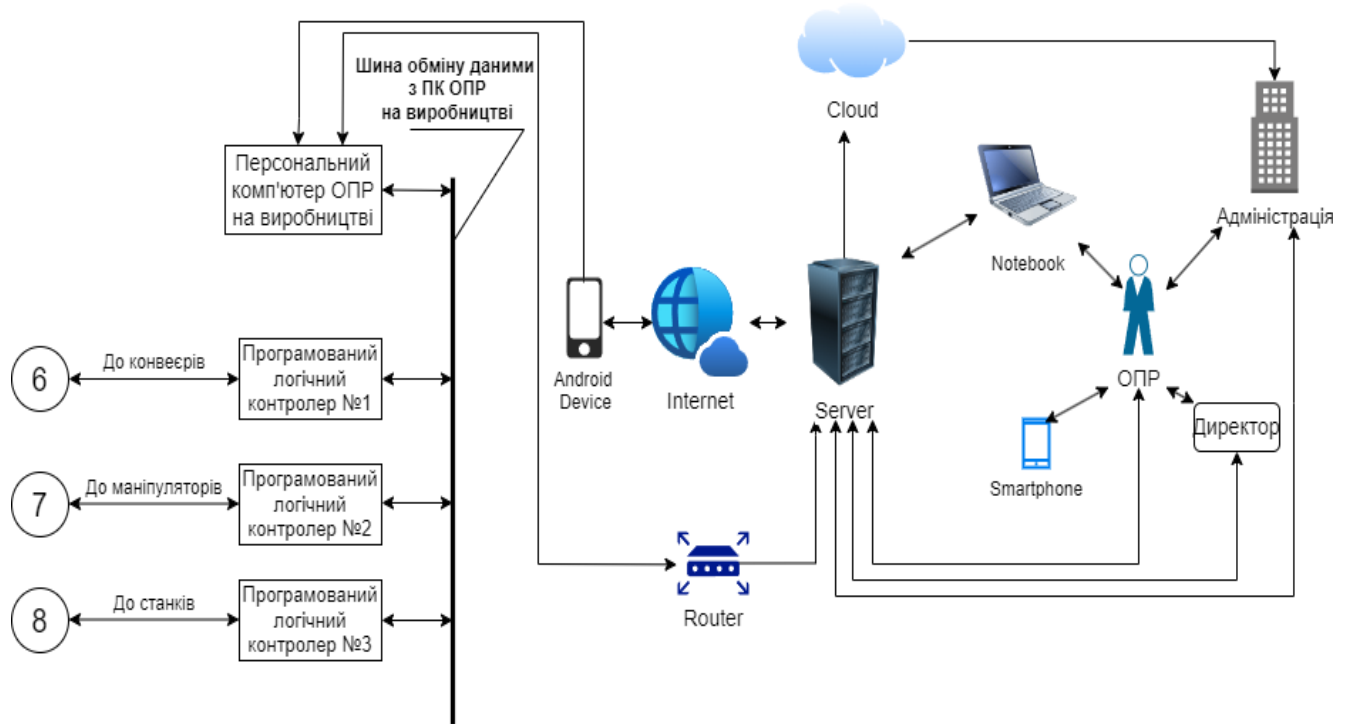


Рисунок 2.1.1 – Загальна підсистема концептуальної моделі ІТ-структури керування виробництвом АСК лазерної різки

Цей рівень забезпечує дистанційний моніторинг, збір статистичних даних та доступ для керівництва підприємства (Директора) з використанням мобільних пристроїв (Smartphones) або портативних комп'ютерів (Notebooks). Нижче розташований рівень керування виробництвом, який представлений персональним комп'ютером особи, яка приймає рішення (ПК ОПР на виробництві). Саме на цьому вузлі відбувається обробка інженерних даних, завантаження CAD/CAM моделей, генерація керуючих G-кодів та загальний контроль за виконанням змінних завдань. Апаратна частина (Shop Floor) включає набори програмованих логічних контролерів (ПЛК №1, ПЛК №2, ПЛК №3), кожен з яких є керівним центром для своєї

підсистеми: конвеєрів, маніпуляторів та безпосередньо верстата. Зв'язок між ПК ОПР та набором ПЛК реалізовано через високошвидкісну промислову шину передачі даних (наприклад, PROFINET або OPC UA). Використання такого протоколу гарантує надійний та захищений від завад обмін керівними сигналами та діагностичними даними без затримок у реальному часі, що є критично важливим для синхронізації всіх підсистем та вузлів комплексу.

Другою важливою є підсистема логістики та подачі матеріалу, яка відповідає за переміщення матеріалів та керується програмованим логічним контролером №1 (Рисунок 2.1.2). Ця підсистема забезпечує автоматизоване транспортування важкого листового металу до робочої зони верстата.

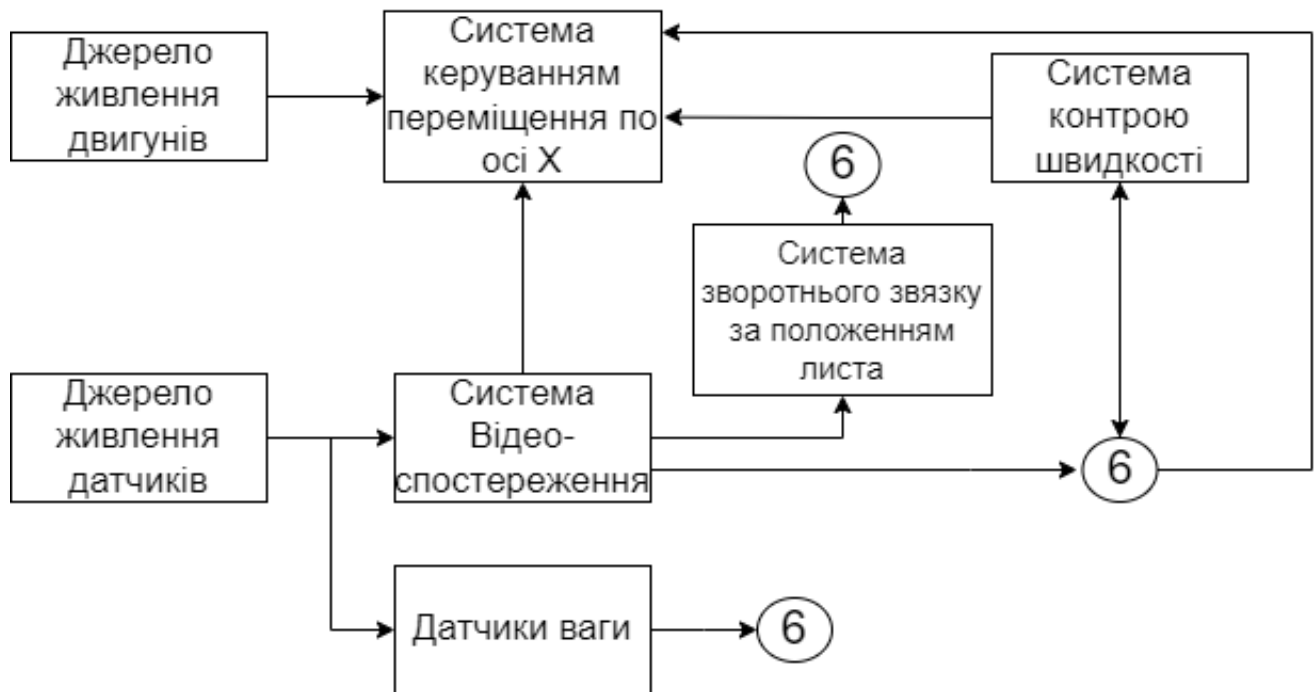


Рисунок 2.1.2 – Підсистеми логістики і подачі матеріалу концептуальної моделі лазерної різки

Енергетичні властивості характеристик архітектури цього блоку передбачають логічне та фізичне розділення джерел живлення для кожної із трьох потужних електроприводів системи переміщення по осі OX, OY, OZ та вторинних джерел для

визначення координат положення різачка з високою роздільною здатністю та інших систем контролю і мережевого інформаційного обміну. Таке рішення значно підвищує завадостійкість системи, унеможливаючи вплив електромагнітних перешкод, які утворюють електромагнітні завади під час перехідних процесах при роботі двигунів, що негативно впливає на точність показників датчиків. Для забезпечення необхідної динаміки розгону та гальмування підсистема переміщення оснащена замкненим контуром контролю швидкості. При цьому, для прецизійного позиціонування листа металу в зоні різання, система керування використовує дані з енкoderів, які виконують функцію системи зворотного зв'язку за положенням. Додатковий контроль логістичного процесу здійснюється за допомогою датчиків ваги, що дозволяють верифікувати масу та габарити завантаженого матеріалу, запобігаючи перевантаженням напрямних. До підсистеми логістики часто додаються камери відео спостереження, які передають візуальну інформацію на верхній рівень для загального контролю робочої зони.

Наступною є підсистема роботизованого сортування, до складу якої очутливлені маніпулятори і системи технічного зору, управління якою покладено на ПЛК №2 (Рисунок 2.1.3). Ця підсистема виконує найскладніші етапи автоматизації – автономне вивантаження та сортування готових деталей після різання, повністю виключаючи потребу в ручній праці оператора. Головним виконавчим механізмом тут виступає промисловий маніпулятор, який комплектується різними типами захватів. Залежно від конфігурації деталі, система може використовувати кліщовий захват для жорсткої фіксації країв, або вакуумний насос із присосками для надійної фіксації поверхонь деталей складної геометрії без ризику їх пошкодження чи деформації. Інтелектуальним ядром підсистеми виступає система технічного зору (Machine Vision), яка об'єднує функції відеоспостереження, ідентифікації об'єкта та системи визначення його орієнтації у просторі. Завдяки цьому АСК здатна самостійно розпізнавати контури вирізаних деталей на робочому столі, точно

обчислювати їхній центр мас та кут повороту, після чого передавати маніпулятору скориговані координати для ідеально точного захвату. Крім того, наявність датчиків ваги на маніпуляторі дозволяє підтвердити успішне підняття деталі та відбракувати елементи, що не відповідають заданим масо-габаритним параметрам. Джерела живлення для двигунів маніпулятора та для його сенсорної мережі також структурно розділені.

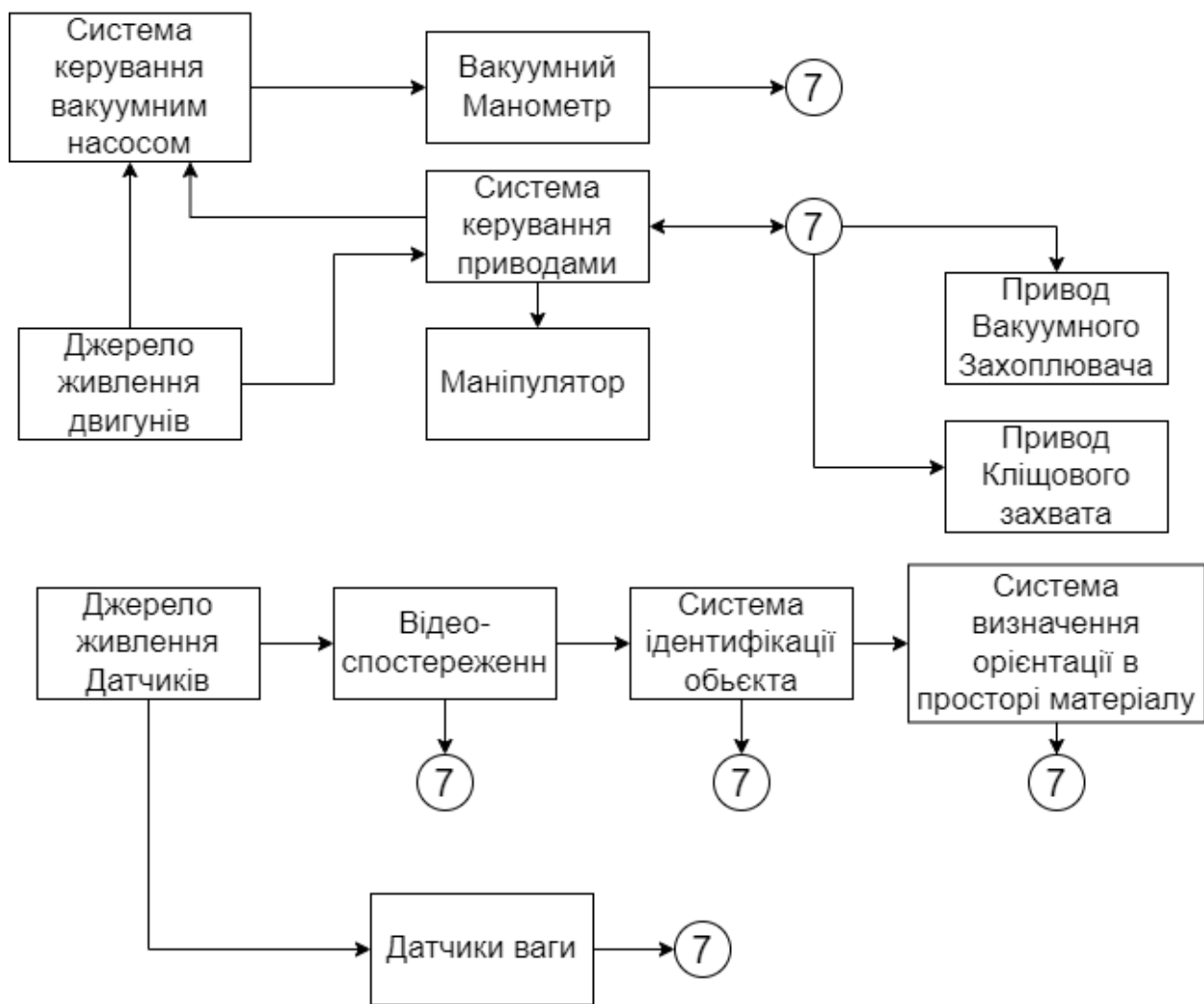


Рисунок 2.1.3 – Підсистема роботизованого сортування деталей концептуальної моделі АСК лазерної різки

Ядром усього виробничого комплексу виступає підсистема лазерної обробки (лазерні верстати з ЧПК), яка підпорядковується швидкодіючому контролеру – ПЛК №3. Серцем цього блоку є джерело лазерного випромінювання, яке генерує потужний промінь для термічного розділення листового металу. Для точного наведення променя використовуються виконавчі механізми переміщення по осях X, Y (портальна система) та Z (висота сопла), які об'єднані в єдину високодинамічну кінематичну систему позиціонування ріжучої головки. Кінематична схема цієї системи жорстко синхронізована з блоком живлення лазера для мікросекундного узгодження імпульсів потужності зі швидкістю руху інструменту. Стабільність самого технологічного процесу підтримується допоміжними вузлами: системою подачі допоміжного газу (кисню, азоту або повітря) у форсунку для видування розплаву, системою вентиляції для ефективної витяжки продуктів згоряння та диму, а також модулем моніторингу і контролю температури для запобігання перегріву оптичних елементів та самої заготовки. Найвищий рівень автономності та безпеки гарантується наявністю розгалуженої системи датчиків, яка живить системи адаптації. Зокрема, впроваджено систему контролю якості різки, яка в реальному часі здійснює моніторинг пробою матеріалу, та систему уникнення зіткнень, що базується на інтелектуальних алгоритмах ухилення, які запобігають зіткненню лазерної головки з фрагментами матеріалу, що випадково піднялися над поверхнею столу. Окрема система відеоспостереження в зоні різки дозволяє фіксувати процес безпосередньо у зоні взаємодії променя з металом.

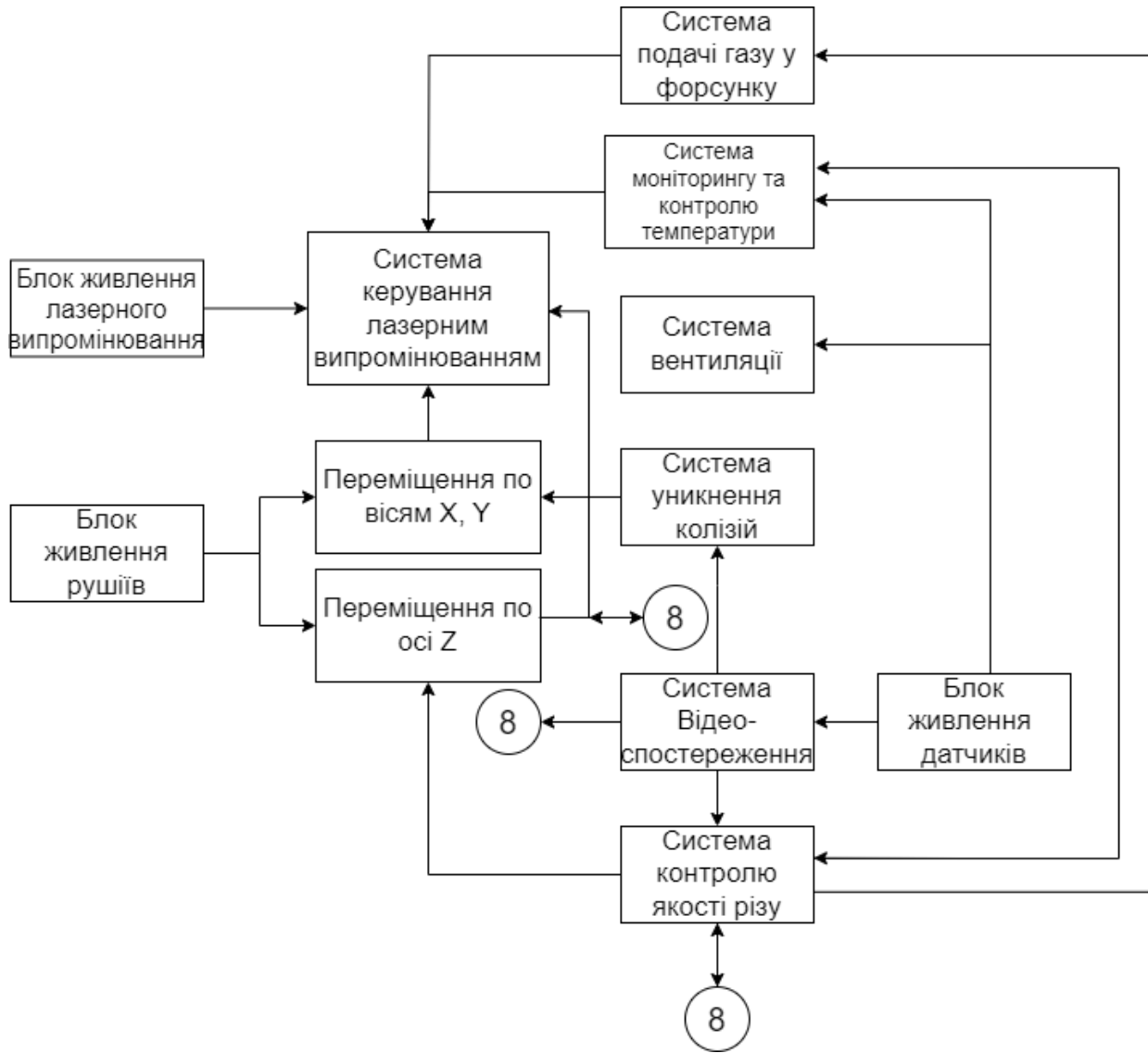


Рисунок 2.1.4 – Підсистема лазерної різки концептуальної моделі АСК лазерної різки

Таким чином, побудовано концептуальну модель АСК лазерної різки, що придатна забезпечити виготовлення деталей із листового матеріалу. Її функціональні підсистеми придатні реалізовувати задачі керування комплексом технологічних і допоміжних операцій.

2.2. Розробка математичної моделі параметрів руху лазерного різачка у АСК виготовлення деталей із листового матеріалу

Для формування математичної моделі параметрів руху лазерного різачка задачу було узагальнено і представлено наступним чином. Для однорідного листового матеріалу, який є заготовкою для виготовлення плоских деталей постійної товщини і однорідних теплофізичних властивостей та який має початкову форму прямокутника, товщини яких дорівнюють товщині листа, поставимо задачу вирізати плоску деталь. За основу постановки задачі визначення кінематичних параметрів візьмемо одну деталь, контур якої на площині описано функцією $f(x,y)$ (рисунок 2.2.1).

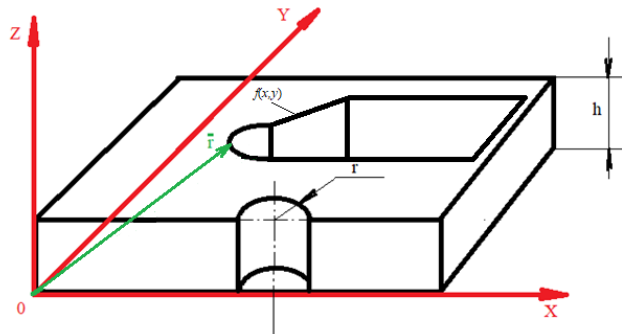


Рисунок 2.2.1 – Схематичне представлення заготовки листа контурної різки

Задамо положення довільної точки на цьому контурі з поточними координатами x , y , та z . Подальший опис руху будемо здійснювати для фіксованого значення величини координати z . Далі положення центру вісі п'ятна лазерного променя різачка точку O , будемо задавати радіус вектором $r(x, y)$. Побудуємо кінематичну модель руху як функцію залежну від часу. Припустимо, що контур деталі, як траєкторія руху точки O $f(x(t), y(t))$ є непервною та тричі диференційовною функцією часу. За цих умов і припущень її розклад у звичайний ряд Тейлора або рекурентний ряд при значній нелінійності функції контуру або

нелінійній динаміки механізмів, забезпечуює будову моделі у три або два доданки [1]. Останню у означених позначках може бути записано:

$$f(x, y) = f(x, y)|_k + f'_x(x, y)|_k \Delta x + f'_y(x, y)|_k \Delta y \quad (1)$$

Таким чином, якщо перетворити скінченні прирости Δx та Δy і подати їх із врахуванням конструкції системи приводів, що забезпечує рух засобу різки, то проекції вектора швидкості на вісі базової системи координат запишемо:

$$\Delta x = \frac{dx}{dt} \Delta t = v_x \Delta t; \quad \Delta y = \frac{dy}{dt} \Delta t = v_y \Delta t. \quad (2)$$

Якщо, врахувати другі похідні, у тому числі і змішані, від закону змін контуру деталі, то запишемо:

$$f(x, y) = f(x, y)|_k + f'_x(x, y)|_k \Delta x + f'_y(x, y)|_k \Delta y + f''_{xx}(x, y)|_k \frac{\Delta x^2}{2} + f''_{yy}(x, y)|_k \frac{\Delta y^2}{2} + f''_{xy}(x, y)|_k \Delta x \Delta y. \quad (3)$$

Аналіз розвинення $f(x, y)$ функції опису контуру деталі із врахуванням функції приростів координат у базовій системі координат $OXYZ$ (Рисунок 2.2.1) дозволяє встановити зв'язок між миттєвими значеннями проекцій вектора швидкості та прискорень:

$$f(x, y, t) = f(x, y, t_k)|_k + f'_x(x, y, t_k)|_k v_x \Delta t + f'_y(x, y, t_k)|_k v_y \Delta t + f''_{xx}(x, y, t_k)|_k v_x^2 \frac{(\Delta t)^2}{2} + f''_{yy}(x, y, t_k)|_k v_y^2 \frac{(\Delta t)^2}{2} + f''_{xy}(x, y, t_k)|_k v_x v_y (\Delta t)^2. \quad (4)$$

За своєю структурою це розвинення подає процес руху променю різачка, як квадратичний поліном компонент вектора швидкостей, квадрату швидкості та фіксованого часу t_k і приростів часу Δt . За останнє можливо застосовувати як реальний так і системний час, величина якого розраховується за допомогою числа Стерджеса або за загальною довжиною контуру деталі. Коефіцієнти ряду (4)

визначаються аналітично за функцією опису контуру деталі $f(x, y)$ та її похідних у фіксовані моменти часу t_k .

Для дослідження точнісних характеристик моделі шляхом проведення імітаційного моделювання було розглянуто приклад форми вирізу, що задано прикладом контуру:

$$f(x, y) = 0,1 \cdot x \cdot y + 0,2 + 0,1 \cdot e^{-0,1 \cdot x \cdot y}. \quad (5)$$

Запишемо вирази частинних похідних для точок контуру :

$$\begin{aligned} f'_x(x, y)|_k &= \left(0,1 \cdot y - 0,01 \cdot e^{-0,1 \cdot x \cdot y} \right)|_k \\ f'_y(x, y)|_k &= \left(0,1 \cdot x - 0,01 \cdot e^{-0,1 \cdot x \cdot y} \right)|_k \end{aligned} \quad (6)$$

На підставі розвинення (3) запишемо відносну похибку, що визначиться у зафіксованій точці $r_k(x, y, z, t)$ набором координат і поточного часу та компонентами вектора швидкості. Введемо поняття відносної похибки:

$$\varepsilon(x(t), y(t)) = \frac{f(x(t), y(t)) - f(x, y)|_k}{f(x, y)|_k} = \frac{f(x(t), y(t))}{f(x, y)|_k} - 1. \quad (7)$$

За цих умов і позначень відносну похибку буде оцінено:

$$\varepsilon(x, y) = \frac{f'_x(x, y)|_k}{f(x, y)|_k} v_x \Delta t + \frac{f'_y(x, y)|_k}{f(x, y)|_k} v_y \Delta t. \quad (8)$$

Таким чином, при наявності аналітичного представлення контуру деталі аналітичних розвинень, встановлено зв'язок між кінематичними та конструктивними параметрами, що дозволяє оцінювати відносну похибку як величину відхилень. Для подальшого дослідження якості роботи системи було побудовано алгоритм оцінки похибки різку.

Алгоритм розрахунку відносної похибки $\varepsilon(x, y)$

1. Вводимо данні із таблиці 1

2. Розраховуємо функцію та її похідні у точці для рядка координат і часу:

$$f(x, y) = 0,1 \cdot x \cdot y + 0,2 + 0,1 \cdot e^{-0,1 \cdot x \cdot y} \Big|_k$$

$$f'_x(x, y) \Big|_k = (0,1 \cdot y - 0,01 \cdot e^{-0,1 \cdot x \cdot y}) \Big|_k$$

$$f'_y(x, y) \Big|_k = (0,1 \cdot x - 0,01 \cdot e^{-0,1 \cdot x \cdot y}) \Big|_k$$

3. Розраховуємо для обчислених функції та її похідних у точці для рядка координат і часу з п.1 та п.2 та відносну похибку за формулою:

$$\varepsilon(x, y) = \frac{f'_x(x, y) \Big|_k}{f(x, y) \Big|_k} v_x \Delta t + \frac{f'_y(x, y) \Big|_k}{f(x, y) \Big|_k} v_y \Delta t.$$

Таблиця – 2.2.1 Вплив кінематичних параметрів руху на відносну похибку позиціонування

№	x, m	y, m	t _k , c	v _{x10} , м/с	v _{y10} , м/с	$\varepsilon(x, y)$, %
1	0,1	0	0	1	1	0,03
2	0,5	0	0	1	1	0,15
3	1	0	0	1	1	0,3
4	0,1	0,1	0	1	1	0,0598

Таблиця – 2.2.1 Вплив кінематичних параметрів руху на відносну похибку позиціонування

№	x, m	y, m	t_k, c	$v_{x10}, m/c$	$v_{y10}, m/c$	$\varepsilon(x, y), \%$
6	0,5	0,1	0	1	1	0,1774
7	1	0,1	0	1	1	0,3207
8	0,1	0,5	0,1	2	2	0,3549
9	0,5	0,5	0,1	2	2	0,5596
10	1	0,5	0,1	2	2	0,7866
11	0,1	1	0,5	2	2	0,6415
12	0,5	1	0,5	2	2	0,7866
13	1	1	0,5	2	2	0,9317

2.3. Розробка математичної моделі режимних параметрів лазерного різачка у АСК виготовлення деталей із листового матеріалу

Забезпечення функціонування АСК лазерної різки заготовок у тому числі із листового матеріалу відповідно до концептуальної моделі необхідно побудувати математичні моделі для забезпечення функціонування чотирьох підсистем. На основі розробленої кінематичної моделі (підрозділ 2.2), яка описує просторове переміщення лазерної головки з урахуванням моделей динаміки трьох систем x, y, z приводів у зафіксованій точці $r_k(x, y, z, t)$ та миттєві значення вектора швидкості V . Наступним етапом було визначено розробку математичної моделі режимних (технологічних) параметрів. Головним завданням побудови підсистеми АСК лазерної різки на цьому рівні є забезпечення прецизійної точності стінок різку у ході обробки та наскрізного

проплавлення матеріалу без утворення надлишкової зони термічного напливу при зміні швидкості руху на складних контурах.

Енергетичний баланс та струмова модуляція.

За основу постановки задачі визначення енергетичних параметрів візьмемо рівняння теплового балансу в зоні взаємодії лазерного променя з матеріалом. Функціонально-технологічну схему цієї зони із зазначенням основних керованих та геометричних параметрів представлено на рисунку 2.3.1. Загальна енергія, що підводиться до заготовки, витрачається на фазовий перехід (плавлення/випаровування) металу в зоні різку та на компенсацію тепловтрат. Ефективна теплова потужність P_{melt} , необхідна для розплавлення матеріалу, визначається за формулою:

$$P_{melt} = \rho \cdot V \cdot h \cdot d \cdot (C_p \cdot (T_m - T_0) + \lambda_m). \quad (5)$$

Де ρ – густина матеріалу, кг/м³; V – миттєва швидкість переміщення променя, м/с; h – товщина листа, м; d – діаметр фокусної плями (ширина різку), м; C_p – питома теплоємність, Дж/(кг·К); T_m, T_0 – абсолютна температура плавлення та початкова температура відповідно у градусах Кельвіна, °К; λ_m – питома теплота плавлення, Дж/кг.

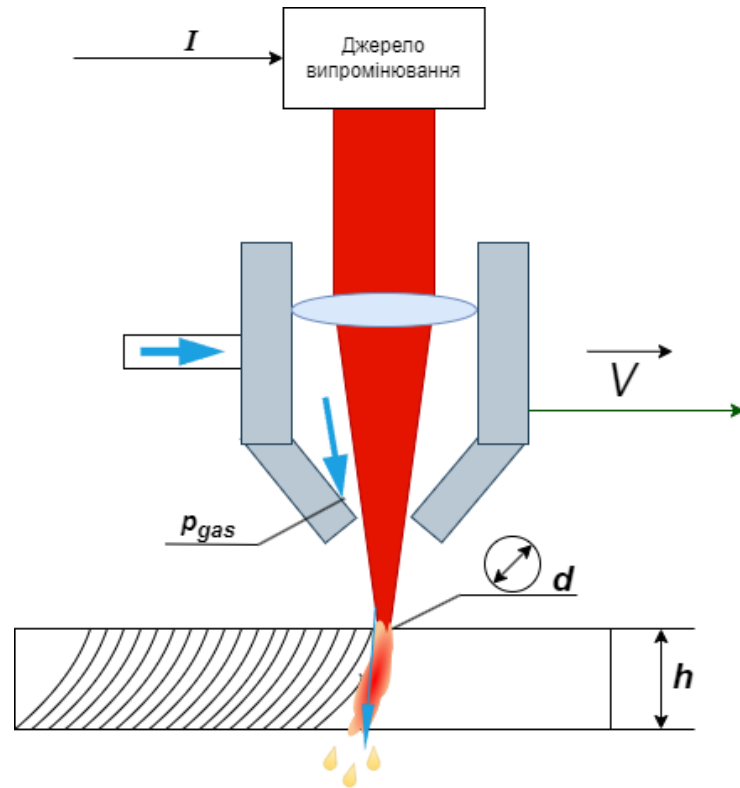


Рисунок 2.3.1 Функціонально-технологічна схема

В автоматизованих комплексах керування вихідною оптичною потужністю лазера P_{las} здійснюється шляхом аналогової модуляції – зміни сили струму живлення генератора (або діодів накачки). Зв'язок між втратами оптичною потужністю та електричними параметрами можна подати лінійною залежністю:

$$P_{laslos} = \eta_{eo} \cdot U \cdot (I - I_{th});$$

$$P_{las} = \eta_{eo} \cdot U \cdot I_{th}. \quad (6)$$

де η_{eo} – електрооптичний коефіцієнт корисної дії лазерного джерела; U – робоча напруга живлення, В; I – миттєве значення сили струму, А; I_{th} – пороговий струм генерації лазерного випромінювання, А.

Враховуючи коефіцієнт втрат випромінювання за рахунок поглинання поверхнею α_n та втрати теплоти q_{loss} , загальне рівняння балансу має вигляд:

$$P_{las} \cdot \alpha_n = P_{melt} + q_{loss}.$$

Підставивши вирази, отримаємо фінальну математичну модель для АСК, яка визначає закон керування силою струму залежно від миттєвої швидкості руху різака:

$$I(V) = I_{th} + \frac{\rho \cdot V \cdot h \cdot d \cdot (C_p \cdot (T_m - T_0) + \lambda_m) + q_{loss}}{\alpha_{II} \cdot \eta_{eo} \cdot U}. \quad (7)$$

Ця залежність дозволяє системі керування уникати надмірної потужності на ділянках гальмування (наприклад, при проходженні гострих кутів контуру), пропорційно знижуючи силу струму, що є критичним для забезпечення жорстких допусків різання.

Математичне моделювання режимів імпульсно-частотної модуляції

Під час відпрацювання траєкторій із високою кривизною (гострі кути, спряження радіусів), де за законами кінематики (підрозділ 2.2) відбувається механічне гальмування різака ($V \rightarrow 0$), або на етапі первинної прошивки матеріалу, безперервний режим роботи призводить до критичного перегріву та деструкції країв металу. Для запобігання цьому в АСК реалізують механізм широтно-імпульсної (ШІМ) або імпульсно-частотної модуляції.

У цьому випадку контролер оперує середньою тепловою потужністю P_{avg} , яка регулюється через зміну робочого циклу (шпаруватості) D_c (Duty Cycle) та частоти повторення імпульсів f_p :

$$P_{avg} = P_{peak} \cdot D_c = P_{peak} \cdot (\tau_p \cdot f_p); \quad (8)$$

де P_{peak} – пікова оптична потужність поодинокого імпульсу, Вт; D_c – робочий цикл, що відображає відношення часу увімкненого стану лазера до загального періоду повторення ($0 \leq D_c \leq 1$); τ_p – тривалість (ширина) лазерного імпульсу, с; f_p – частота повторення імпульсів, Гц.

Тоді закон адаптивного керування енергетичним режимом у кожній дискретній точці часового інтервалу інтерполятора набуває форми системи рівнянь, що зв'яже робочий цикл та піковий струм живлення з кінематикою:

$$\begin{cases} P_{peak}(I) = \eta_{eo} \cdot U \cdot (I_{peak} - I_{th}) \\ D_c(V) = \frac{\rho \cdot V \cdot h \cdot d \cdot (C_p \cdot \Delta T + \lambda_m) + q_{loss}}{\alpha_n \cdot P_{peak}(I)} \end{cases} \quad (9)$$

Цей математичний апарат є універсальним для контурів АСК: у волоконних комплексах він реалізується через мікросекундну комутацію напівпровідникового джерела накачки, а в газових CO_2 -лазерах – через високочастотне керування радіочастотним (RF) збудженням газової плазми. Це дозволяє АСК забезпечувати постійну питому енергію на одиницю довжини різку при будь-яких динамічних змінах швидкості приводів.

Оптичні параметри та динамічне керування фокусом

Ширина різку d у рівнянні теплового балансу не є статичною величиною. Вона залежить від оптичних характеристик променя, зокрема від добутку параметрів променя (ВРР) та фактора якості M^2 . Для досягнення мікронної точності діаметр сфокусованого променя описується рівнянням, що враховує межу дифракції:

$$d = \frac{4 \cdot \lambda \cdot f \cdot M^2}{\pi \cdot D_{in}} \quad (10)$$

Де λ – довжина хвилі випромінювання (наприклад, 1070 нм для волоконних лазерів); f – фокусна відстань лінзи, мм; D_{in} – діаметр вхідного колімованого променя, мм.

Під час тривалої роботи матеріал нагрівається і може деформуватися, що призводить до зміщення фокусної площини. Тому АСК повинна компенсувати ці відхилення, динамічно змінюючи фокусну відстань f за допомогою сервоприводів лінзи на основі зворотного зв'язку від ємнісних датчиків висоти.

Газодинамічні параметри

Завершальним режимним параметром є тиск допоміжного газу p_{gas} (кисню або азоту). Стабільність тиску є критичною для рівномірного видування розплаву. Коливання тиску навіть на 0,1 бар можуть спричинити зміну ширини різку.

Математично умову стабільного видалення розплаву можна описати балансом тисків:

$$p_{gas} \geq \frac{2 \cdot \sigma}{d} + \rho_{melt} \cdot g \cdot h + p_{dyn} \cdot \quad (11)$$

Де σ – коефіцієнт поверхневого натягу розплаву; ρ_{melt} – густина рідкої фази металу; p_{dyn} – додатковий динамічний опір в'язкого тертя в каналі різку.

Отже, розроблена математична модель комплексно пов'язує кінематичні параметри руху (координати центру променя, швидкість V) з електрофізичними (сила струму I), оптичними (фокус f) та газодинамічними (тиск p_{gas}) параметрами. Отримана система рівнянь слугує базисом для розробки алгоритмічного та програмного забезпечення контролера АСК у підрозділі 2.4.

2.4. Розробка алгоритмічного та програмного забезпечення та моделювання руху лазерного різака

Ефективне функціонування автоматизованої системи керування лазерним різакком вимагає перетворення розроблених аналітичних моделей (кінематичної та енергетичної) у строгу послідовність обчислювальних операцій – алгоритм керування. Головним завданням програмного забезпечення контролера АСК є синхронізація просторового руху виконавчих механізмів із динамічною зміною технологічних режимів лазерного випромінювача в реальному часі.

Структура узагальненого алгоритму керування

Основою програмного забезпечення АСК є циклічний алгоритм, що виконується з високою частотою (період інтерполяції зазвичай складає 1–2 мс). Логіку роботи базового алгоритму керування рухом та режимами можна розділити на такі послідовні етапи:

1. Етап ініціалізації та попереднього аналізу:

Зчитування керуючої програми (G-коду), згенерованої САМ-системою, яка містить геометричний опис контуру $f(x, y)$.

Завантаження з бази даних (Material Database) фізико-механічних властивостей заготовки: товщини h , густини ρ , теплоємності C_p та температури плавлення T_m .

Аналіз наступних кадрів траєкторії для виявлення гострих кутів та ділянок гальмування, що вимагає завчасного розрахунку профілю швидкості.

2. Етап кінематичної інтерполяції:

На основі математичної моделі (підрозділ 2.2) обчислювач (інтерполятор) розраховує миттєві значення координат $x(\tau)$, $y(\tau)$ для поточного такту керування.

Розраховується поточний вектор контурної швидкості $V(\tau)$ та прискорення.

Формуються завдання для контурів регулювання положення та швидкості сервоприводів осей X та Y.

3. Етап технологічної адаптації (розрахунок режимів):

Отримане значення миттєвої швидкості $V(\tau)$ передається до модуля розрахунку теплового балансу.

Згідно з моделлю (підрозділ 2.3), система обчислює необхідну середню потужність P_{avg} .

Залежно від обраного режиму (безперервний або імпульсний), контролер розраховує аналоговий сигнал керування струмом $I(\tau)$ або параметри ШІМ-модуляції: шпаруватість $D_c(\tau)$ та частоту f_p .

Паралельно розраховується задане значення тиску допоміжного газу p_{gas} та координата фокусної площини f .

4. Етап видачі керівних впливів та контролю (Зворотний зв'язок):

Згенеровані сигнали надсилаються на драйвери серводвигунів, генератор лазера та пропорційні газові клапани.

Здійснюється опитування датчиків зворотного зв'язку: ємнісного датчика висоти (для корекції осі Z) та оптичних сенсорів (для контролю якості пробою).

У разі перевищення прогнозованої величини похибок, алгоритм вносить корекції на наступному такті.

Для наочного представлення застосованої логіки розроблено структурну блок-схему алгоритму керування параметрами лазерного різачка, яку наведено на рис. 2.4.1

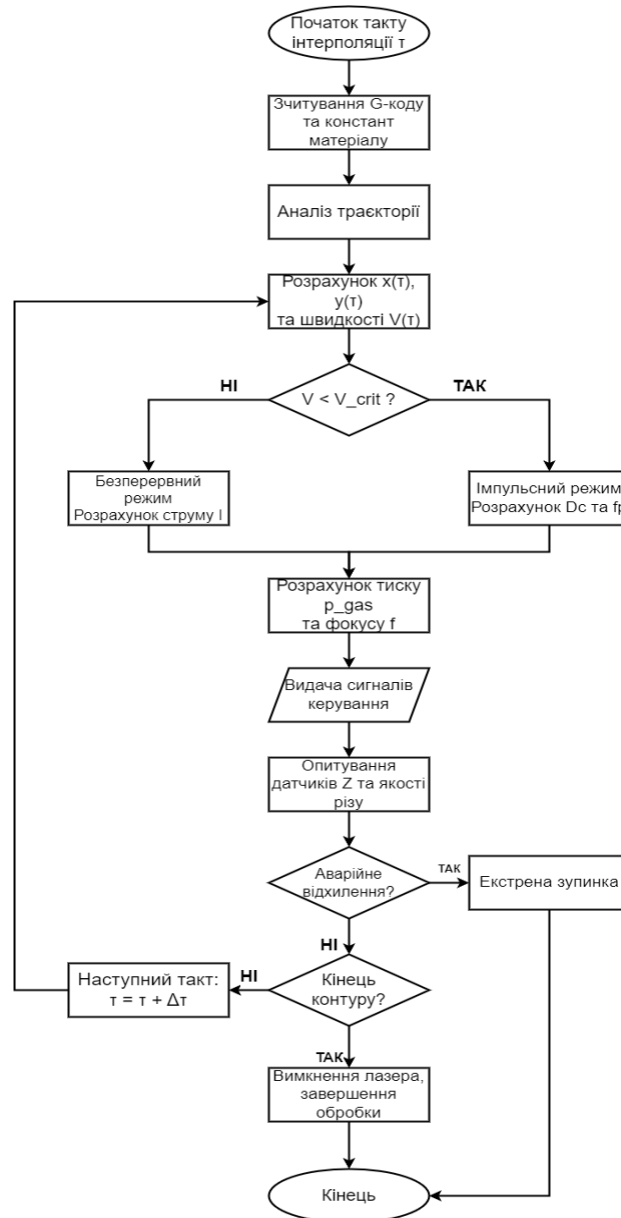


Рисунок 2.4.1 – Блок-схема алгоритму керування рухом та режимами лазерного різачка

Моделювання руху лазерного різачка

Для перевірки адекватності розробленого алгоритмічного забезпечення та синтезованих математичних моделей необхідно провести комп'ютерне моделювання. Оскільки фізична система містить як механічні (інерційні маси порталу, пружності приводів), так і електротехнічні складові (електромагнітні перехідні процеси в двигунах та лазерному джерелі), моделювання найдоцільніше виконувати у середовищі візуального імітаційного моделювання MATLAB/Simulink.

Програмна модель повинна включати:

- Генератор траєкторії (реалізація рівнянь кінематики з пункту 2.2).
- Модель контурів регулювання (ПД-регулятори положення та швидкості приводів).
- Модель лазерного джерела (передавальна функція перетворення керівної напруги у вихідну теплову потужність на основі рівнянь пункту 2.3).

Результати імітаційного моделювання, аналіз перехідних процесів та синтез параметрів регуляторів для забезпечення необхідної точності переміщення наведено у Розділі 4 даної дипломної роботи.

Висновки до другого розділу:

1. Розроблено концептуальну модель АСК лазерною різкою, побудовану за модульним принципом. Вона складається з чотирьох взаємопов'язаних підсистем: загальної IT-архітектури керування виробництвом, логістики та подачі матеріалу, роботизованого сортування та безпосередньо підсистеми лазерної різки. Така структура забезпечує автономність функціонування комплексу відповідно до парадигми Industry 4.0.
2. Синтезовано кінематичну модель руху лазерного різачка, що базується на аналітичному описі контуру деталі при подальшому розкладанні в ряд Тейлора. Встановлено зв'язок між величиною похибки та миттєвими значеннями проєкцій

вектора швидкості, прискорень та координатами, що дозволить будувати на її основі алгоритм оцінки відносної похибки позиціонування та забезпечити контроль точності руху.

3. Побудовано математичну модель режимних (технологічних) параметрів, яка комплексно пов'язує енергетичні (струм, оптична потужність), оптичні (фокус) та газодинамічні (тиск газу) характеристики з кінематичними параметрами руху. Ця залежність дозволяє системі керування динамічно коригувати потужність лазера, уникаючи перегрів та утворення дефектів на ділянках гальмування при проходженні гострих кутів контуру.

4. Розроблено алгоритмічне забезпечення АСК, що базується на циклічному виконанні керуючих програм із періодом інтерполяції 1–2 мс. Алгоритм забезпечує синхронізацію просторового руху виконавчих механізмів із динамічною зміною технологічних режимів випромінювача в реальному часі, який слугуватиме основою для подальшого імітаційного моделювання в середовищі MATLAB інструментами Simulink.

3 ПОСТАНОВКА ТА РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ ПРО ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ У АСК ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ

Ефективність роботи АСК лазерним різакром залежить не лише від точності позиціонування та дотримання заданої кінематики руху, що була розроблена у попередньому розділі, а й від суворого дотримання оптимальних теплових режимів у зоні обробки. Лазерне різання листового металу за своєю фізичною природою є складним нестационарним тепловим процесом. Невідповідність енергії випромінювання до розрахованій поточній швидкості руху лазерної головки (особливо в моменти гальмування на гострих кутах контуру) неминуче призводить до виникнення температурних деформацій, перепалу країв різку або, навпаки, неповного прорізання товщини матеріалу.

Для створення високоточної АСК, яка буде здатна адаптивно керувати потужністю лазера (ШІМ-модуляцією) в режимі реального часу, потребує розробки адекватної математичної моделі температурного поля заготовки. У даному розділі здійснюється формалізація лазерного променя як рухомого розподіленого джерела тепла, ставиться крайова задача теплопровідності та розробляється алгоритм її чисельно-аналітичного розв'язку. Отримані результати просторово-часового розподілу температур стануть математичним та фізичним фундаментом для побудови контурів керування в середовищі імітаційного моделювання.

3.1. Постановка задачі про статистичне визначення параметрів розподіленого джерела тепла

Для побудови адекватної математичної моделі температурного поля під час лазерного різання листового матеріалу необхідно формалізувати опис розподіленого джерела підводу теплоти. У класичній теорії теплообміну для задач зварювання та різання висококонцентрованими джерелами енергії фокальну пляму

лазерного променя не можна розглядати як точкове джерело. Реальний лазерний промінь генерує тепловий потік, який нерівномірно розподілений по площі нагріву. Експериментальні та статистичні дослідження показують, що розподіл густини теплового потоку в плямі нагріву лазера з високим ступенем точності підпорядковується нормальному закону розподілу ймовірностей (закону Гауса). Відповідно до цього, лазерний промінь моделюється як нормально розподілене кругове джерело тепла.

Густина теплового потоку в довільній точці плями нагріву описується наступним рівнянням:

$$q(r) = q_{max} \exp(-Kr^2)$$

де $q(r)$ – густина теплового потоку на відстані r від центру плями, Вт/м²;

q_{max} – максимальна густина теплового потоку в центрі плями (при $r = 0$), Вт/м²;

K – коефіцієнт зосередженості теплового потоку, який характеризує крутизну спаду енергії від центру до периферії, 1/м²;

r – поточний радіус, тобто відстань від осі променя до досліджуваної точки, м.

Ефективна теплова потужність лазерного випромінювання, що поглинається металом заготовки, залежить від номінальної потужності джерела та оптичних властивостей поверхні:

$$P_{ef} = P_{nom} \cdot \eta$$

де P_{nom} – номінальна потужність лазерного випромінювача, Вт;

η – ефективний ККД процесу нагріву (коефіцієнт поглинання), який враховує втрати на відбиття випромінювання від поверхні металу.

Зв'язок між ефективною потужністю P_{ef} , максимальною густиною теплового потоку q_{max} та коефіцієнтом зосередженості K визначається через інтегрування рівняння розподілу енергії по всій площі плями нагріву (від 0 до нескінченності). В результаті інтегрування отримуємо наступну залежність:

$$q_{max} = \frac{K \cdot P_{ef}}{\pi}$$

На практиці зона дії джерела тепла обмежується ефективним радіусом r_e (або діаметром лазерної плями d_0). Ефективним вважається радіус, у межах якого зосереджено **95%** усієї теплової енергії променя. Згідно із властивостями нормального розподілу, цей радіус пов'язаний з коефіцієнтом зосередженості наступним співвідношенням:

$$K = \frac{3}{r_e^2}$$

Застосування такої статистичної моделі джерела тепла дозволяє уникнути математичних сингулярностей (нескінченної температури в точці $r = 0$), які виникають при використанні моделі точкового джерела. Це є критично важливим для подальшого розрахунку температурного поля в околі зони різання та визначення необхідних параметрів керування для АСК.

Для моделювання температурного поля в межах даної роботи обрано параметри реального промислового лазерного комплексу **IronBot** (виробництва України), оснащеного ітербієвим оптоволоконним генератором **Raucus**. Цей верстат призначений для високоточної обробки вуглецевої та нержавіючої сталі. Базові теплофізичні параметри джерела, згідно з офіційними технічними характеристиками обладнання, становлять:

Номінальна потужність джерела випромінювання (P_{nom}): **2000 Вт**.

Заявлена ширина лазерної лінії становить 0,1 мм, що дозволяє прийняти ефективний радіус лазерної плями (r_e): **0,05 мм**.

Усереднений коефіцієнт поглинання випромінювання оптоволоконного лазера поверхнею вуглецевої сталі (η): **0,7**.

Відповідно, ефективна тепла потужність, яка безпосередньо витрачається на нагрів і плавлення металу, становить $P_{ef} = 2000 \cdot 0,7 = 1400$ Вт. Підстановка цих

значень у наведені вище математичні залежності дозволяє визначити числовий розподіл теплового потоку (максимальну густину q_{max} та коефіцієнт зосередженості K). Отримана статистична модель розподіленого джерела тепла виступає базовою граничною умовою для подальшого розв'язку диференціального рівняння теплопровідності.

3.2. Постановка задачі про температурне поле із рухомим розподіленням джерелом тепла

Процес лазерного різання супроводжується інтенсивним локальним нагріванням металу. Для визначення температурного стану заготовки у будь-якій точці та в будь-який момент часу необхідно розв'язати нестационарну крайову задачу теплопровідності.

Для цього було розглянуто листову заготовку, що має товщину h , яка значно менша за її геометричні розміри в плані (довжину L_x та ширину L_y). Теплофізичні характеристики матеріалу (коефіцієнт теплопровідності λ , питома теплоємність C_p , густина ρ) в межах розрахункового діапазону температур приймаються усередненими та сталими. Основою математичної моделі є тривимірне диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності (рівняння Фур'є), яке в декартовій системі координат (x, y, z) має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v(x, y, z, \tau)}{\rho C_p}$$

де T – температура металу в заданій точці простору у визначений момент часу, °С;

a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу, м²/с, який визначається як $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$

$q_v(x, y, z, \tau)$ – об'ємна густина потужності розподіленого джерела тепла (нашого рухомого лазера), Вт/м³;

ρ – густина матеріалу, кг/м³;

C_p – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·°С).

Для детального опису теплового впливу, об'ємна потужність розподіленого джерела тепла $q_v(x, y, z, \tau)$ подається як добуток питомої (максимальної) об'ємної густини енергії q_{v0} та просторово-часової функції розподілу $f(x, y, z, \tau)$:

$$q_v(x, y, z, \tau) = q_{v0} \cdot f(x, y, z, \tau)$$

Питома кількість тепла q_{v0} визначається виходячи з ефективної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості робочого ходу променя.

Оскільки технологічний процес виготовлення деталей із листового матеріалу передбачає послідовну обробку контурів, просторово-часова функція $f(x, y, z, \tau)$ є заданою кусково-неперервними функціями і залежить від поточного етапу роботи АСК. Наприклад, під час робочого ходу (різання контуру) функція враховує кінематику руху епіцентру нагріву $x_c(\tau)$ та $y_c(\tau)$, а під час холостого ходу (переміщення різачка до наступної деталі) генерація випромінювання припиняється, і $q_v = 0$.

Для отримання єдиного розв'язку цього рівняння задаються початкові та граничні умови:

1. Початкові умови:

До початку обробки ($\tau = 0$) температура заготовки є рівномірною по всьому об'єму і дорівнює температурі навколишнього середовища T_0 :

$$T(x, y, z, 0) = T_0$$

2. Граничні умови (теплообмін із середовищем):

На верхній і нижній поверхнях листа відбувається конвективний теплообмін із навколишнім середовищем за законом Ньютона-Ріхмана. Гранична умова 3-го роду записується так:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha(T - T_0)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°С).

3. Дія рухомого джерела:

Як було визначено у підрозділі 2.2, лазерна головка рухається по заданій траєкторії. Тому координати центру нагріву змінюються в часі: $x_c = f_1(\tau)$ та $y_c = f_2(\tau)$.

Для кругової траєкторії, яка розглядається як еталонна для перевірки математичної моделі, кінематика джерела описується наступними рівняннями:

$$x_c(\tau) = x_0 + R \cos(\omega\tau)$$

$$y_c(\tau) = y_0 + R \sin(\omega\tau)$$

де (x_0, y_0) – координати центру кола, м;

R – радіус кола (контур рування), м;

ω – кутова швидкість руху джерела, рад/с, яка пов'язана з лінійною швидкістю різання співвідношенням $\omega = \frac{V}{R}$.

Для наочності просторової орієнтації джерела тепла та геометричних параметрів обробки, на рисунку 3.1 представлено розрахункову-просторову модель процесу лазерного різання листового матеріалу. Вона відображає прив'язку рухомого теплового потоку до глобальної системи координат та фіксує просторові межі заготовки.

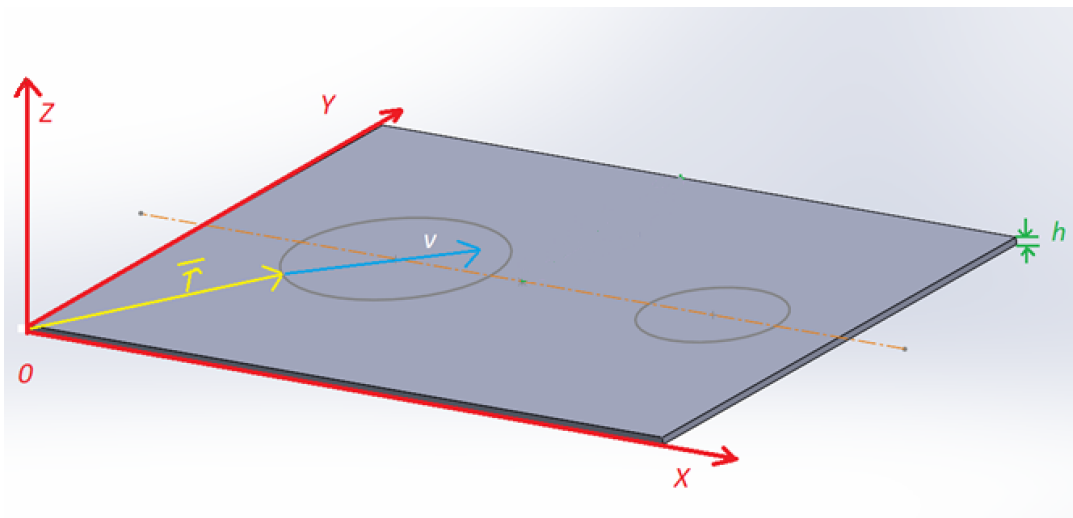


Рисунок 3.2.1 – Розрахунково просторова модель

Таким чином, розв'язок наведеного диференціального рівняння з урахуванням кінематики руху джерела та його гаусового розподілу дозволить отримати просторово-часовий розподіл температур ($T(x, y, z, \tau)$) у тілі деталі.

3.3. Розробка алгоритмічного та програмного забезпечення та моделювання температурного поля деталі та заготовки

Для будови аналітичної моделі розв'яжемо задачу математичної фізики для нестационарного диференційного рівняння у частинних похідних з граничними та початковим умовами для пластини. Для її розв'язку найефективніше застосувати метод скінченних інтегральних перетворень (розвинення в ряд по ортогональним власним функціям). Алгоритм розв'язку складається з наступних етапів.

Визначення власних функцій (ядра перетворення) Пошук розв'язку здійснюється у просторі частот, для чого визначається ядро інтегрального перетворення – власні функції $K_{nmk}(x, y, z)$. Оскільки пластина має форму прямокутного паралелепіпеда, а граничні умови зведені до однорідних, власні функції являють собою комбінації гармонійних функцій (наприклад, синусів та косинусів) по кожній з осей координат. Кожній функції відповідає власне значення μ_{nmk} , яке залежить від геометричних розмірів листа (L_x, L_y, h) та характеризує швидкість згасання теплової хвилі. Індекси n, m, k приймають цілі значення від 1 до нескінченності.

Пряме інтегральне перетворення рівняння З метою виключення складних просторових похідних, обидві частини рівняння теплопровідності множаться на ядро перетворення $K_{nmk}(x, y, z)$ та інтегруються по всьому об'єму пластини. Завдяки властивостям ортогональності функцій, оператор Лапласа перетворюється на алгебраїчний множник $-\mu_{nmk}^2$. У результаті рівняння в частинних похідних

зводиться до звичайного лінійного диференціального рівняння першого порядку відносно часу τ :

$$\frac{d\overline{V_{nmk}}(\tau)}{d\tau} + a \cdot \mu_{nmk}^2 \cdot \overline{V_{nmk}}(\tau) = \frac{\overline{q_{nmk}}(\tau)}{\rho C_p} \quad (3.3.1)$$

де $\overline{V_{nmk}}(\tau)$ – шукана трансформована (спектральна) температура для конкретної гармоніки.

Перетворення функції джерела тепла Права частина рівняння, що описує рухомий лазер, переводиться у спектральний простір шляхом об'ємного інтегрування:

$$\overline{q_{nmk}}(\tau) = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^h q_v(x, y, z, \tau) \cdot K_{nmk}(x, y, z) dx dy dz \quad (3.3.2)$$

Оскільки центр лазерного променя рухається по контурах отворів, координати його епіцентру $x(\tau)$ та $y(\tau)$ постійно змінюються. Цей інтеграл відображає, як енергія рухомого лазера розподіляється по різних просторових гармоніках у кожний момент часу.

Розв'язання рівняння по часу (Інтеграл Дюамеля) Отримане диференціальне рівняння розв'язується з урахуванням того, що до початку різання температура перегріву дорівнювала нулю ($V(x, y, z, 0) = 0$), відповідно, трансформована початкова умова також є нульовою: $\overline{V_{nmk}}(0) = 0$. Розв'язок записується через інтеграл Дюамеля:

$$\overline{V_{nmk}}(\tau) = \int_0^\tau \frac{\overline{q_{nmk}}(t)}{\rho C_p} \cdot e^{-a \cdot \mu_{nmk}^2 \cdot (\tau-t)} dt \quad (3.3.3)$$

Фізичний зміст формули полягає в обчисленні сумарної температури від усіх порцій тепла $\overline{q_{nmk}}(t)$, внесених лазером з початку процесу ($t = 0$) до поточного моменту (τ). Експонента $e^{-a \cdot \mu_{nmk}^2 \cdot (\tau-t)}$ враховує, що тепло, внесене раніше, з часом розсіюється завдяки температуропровідності матеріалу a .

Зворотне перетворення (Складання ряду Фур'є) Для отримання перехідної температури в реальних координатах виконується обернене інтегральне

перетворення. Знайдені спектральні складові $\overline{V}_{nmk}(\tau)$ підсумовуються (множаться на їхні власні функції з урахуванням нормуючих коефіцієнтів):

$$V(x, y, z, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \overline{V}_{nmk}(\tau) \cdot K_{nmk}(x, y, z) \quad (3.3.4)$$

Кінцевий результат моделювання Остаточне температурне поле металевої пластини у будь-якій точці x, y, z та в будь-який момент часу τ обчислюється як сума початкової температури навколишнього середовища T_{env} та знайденої перехідної температурної функції:

$$T(x, y, z, \tau) = T_{env} + V(x, y, z, \tau) \quad (3.3.5)$$

Алгоритмічна реалізація даної математичної моделі здійснює чисельне інтегрування за часом τ із кроком, що жорстко прив'язаний до швидкості руху приводів верстата. Отримана теплова модель дозволяє:

1. Оцінити ширину зони термічного впливу для заданої потужності (1400 Вт) та швидкості.
2. Визначити критичні точки на розрахунково-просторовій моделі, де відбувається небезпечна акумуляція тепла.
3. Сформувати масив даних температурних відхилень, який буде використано як еталонний керуючий вплив для контуру регулювання потужності (ШІМ) у середовищі моделювання Simulink (що розглядатиметься у Розділі 4).

Для практичного аналізу просторово-часового розподілу температурних полів та перевірки адекватності отриманого аналітичного розв'язку (3.3.4–3.3.5), розроблену математичну модель нестационарного теплообміну було програмно реалізовано у середовищі комп'ютерної математики MATLAB у вигляді розрахункового m-скрипта.

Повний лістинг первинного алгоритму, який здійснює чисельне підсумовування потрібного спектрального ряду Фур'є та дискретне інтегрування нестационарних порцій тепла за часовим треком теореми Дюамеля, наведено у лістингу 3.1. *Лістинг 3.1 – Програмна реалізація повної нестационарної теплової моделі Фур'є-Дюамеля*

% 3D ВІЗУАЛІЗАЦІЯ: КУБ 2x2x2 мм (Фур'є + Дюамель)

clear; clc; close all;

%% 1. ГЕОМЕТРІЯ КУБИКА (2x2x2 мм)

Lx = 0.002; % Довжина X = 2 мм

Ly = 0.002; % Ширина Y = 2 мм

Lz = 0.002; % Товщина Z = 2 мм

%% 2. ПАРАМЕТРИ ЛАЗЕРА ТА СТАЛІ

P_laser = 80; % Потужність адаптована під мікрокубик, Вт

alpha = 0.35; % Коефіцієнт поглинання

lambda = 45; % Теплопровідність, Вт/(м*К)

rho = 7800; % Густина сталі, кг/м³

Cp = 460; % Теплоємність, Дж/(кг*К)

a_temp = lambda / (rho * Cp); % Температуропровідність, м²/с

R_beam = 0.0001; % Радіус променя (100 мкм)

T_env = 20; % Кімнатна температура, °С

tau = 0.4; % Час нагріву, с

V = 0.002; % Швидкість, м/с

%% 3. СІТКА КУБИКА

nx = 30; ny = 30; nz = 30;

x_vec = linspace(0, Lx, nx);

y_vec = linspace(0, Ly, ny);

z_vec = linspace(0, Lz, nz);

[X, Y, Z] = meshgrid(x_vec, y_vec, z_vec);

```
%% 4. МАТЕМАТИКА: ПОТРІЙНИЙ РЯД (від 0 до 25)
```

```
N = 25; M = 25; K = 25;
```

```
V_field = zeros(size(X));
```

```
fprintf('Розрахунок %d гармонік... Це займе близько хвилини.\n',  
(N+1)*(M+1)*(K+1));
```

```
for n = 0:N
```

```
    % Вагові коефіцієнти Фур'є (1 для нульової гармоніки, 2 для інших)
```

```
    wx = 1 + (n > 0);
```

```
    mu_x = n * pi / Lx;
```

```
    for m = 0:M
```

```
        wy = 1 + (m > 0);
```

```
        mu_y = m * pi / Ly;
```

```
        for k = 0:K
```

```
            wz = 1 + (k > 0);
```

```
            mu_z = k * pi / Lz;
```

```
            mu_sq = mu_x^2 + mu_y^2 + mu_z^2;
```

```
            % Нормуючий множник для поточної гармоніки
```

```
            norm_factor = (wx/Lx) * (wy/Ly) * (wz/Lz) / (rho * Cp);
```

```
            % Гаусівське джерело з центруванням променя по ширині Y (Ly/2)
```

```
q_nmk = P_laser * alpha * exp(-(mu_x^2 + mu_y^2)*R_beam^2 / 8) * cos(mu_y *  
Ly/2);
```

```
% Інтеграл Дюамеля
```

```
A = a_temp * mu_sq;
```

```
B = mu_x * V;
```

```
if A == 0 && B == 0
```

```
    duhamel_int = tau; % Чисте накопичення для нульової гармоніки
```

```
else
```

```
    duhamel_int = (A * cos(B * tau) + B * sin(B * tau) - A * exp(-A * tau)) / (A^2 +  
B^2);
```

```
end
```

```
% Просторова функція
```

```
K_nmk = cos(mu_x * X) .* cos(mu_y * Y) .* cos(mu_z * Z);
```

```
V_field = V_field + norm_factor * q_nmk * duhamel_int .* K_nmk;
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
T_3D = T_env + V_field;
```

```
%% 5. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ (КОНУСИ ТЕПЛА)
```

```
figure('Name', 'Лазер у Кубі 2x2x2 мм (Фокус на конус)', 'Color', 'w', 'Position', [100,  
100, 800, 600]);
```

% 1. ЗРІЗИ У ВЕРХНІЙ ЧАСТИНІ

x_slice = Lx / 2; % Вертикальний зріз по центру

y_slice = Ly / 2; % Вертикальний зріз по центру

% Горизонтальні зрізи: Поверхня (0), близько до поверхні (0.2 мм), середина (1 мм)

z_slice = [0, 0.0002, Lz/2];

% 2. Побудова зрізів

h = slice(X*1000, Y*1000, Z*1000, T_3D, x_slice*1000, y_slice*1000, z_slice*1000);

set(h, 'EdgeColor', 'none', 'FaceAlpha', 0.9);

shading interp;

colormap(turbo);

colorbar;

clim([20 600]);

title('Об'ємний конус тепла');

xlabel('X (мм)'); ylabel('Y (мм)'); zlabel('Z (Глибина, мм)');

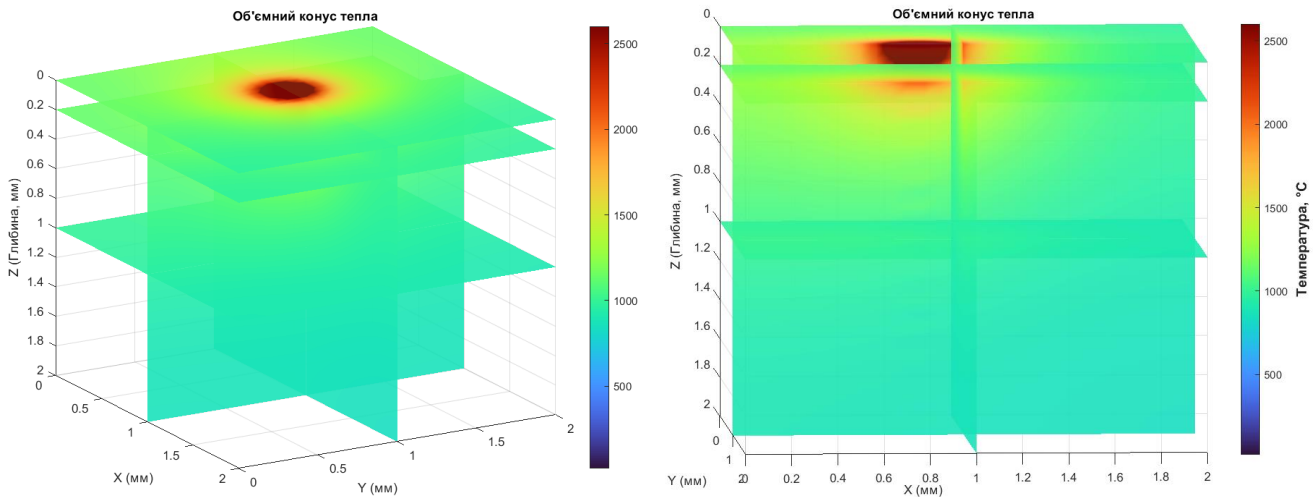
% Перевертаємо вісь Z (щоб 0 був зверху)

set(gca, 'ZDir', 'reverse');

% Змінюємо ракурс, щоб краще бачити розріз

view(60, 20);

axis tight; grid on;



3

Рисунок 3.3.1 – Результат обчислення потрійного ряду: інтенсивний локальний сплеск температури на верхній грані заготовки

Зметою детального аналізу локальної теплофізичної поведінки металу безпосередньо в зоні термічного впливу волоконного лазера, область моделювання було жорстко локалізовано до розмірів елементарного кубічного сегмента заготовки з геометричними параметрами: довжина $L_x = 2 \text{ мм}$, ширина $L_y = 2 \text{ мм}$ та товщина (глибина листа) $L_z = 2 \text{ мм}$. Сітку дискретизації об'єму задано у вигляді матриці розмірністю $30 \times 30 \times 30$ вузлів.

Рендеринг теплового поля виконано для наступного комплексу жорстко зафіксованих вхідних технологічних параметрів та режимів обробки:

1. *Енергетичні параметри:* Ефективна потужність лазерного випромінювання, адаптована під мікрооб'єм сегмента для запобігання миттєвого математичного випаровування суцільного середовища, становила $P_{laser} = 200 \text{ Вт}$. Променевий потік сфокусовано у пляму нагріву з нормальним Гаусівським розподілом енергії та радіусом променя $R_{beam} = 100 \mu\text{м}$ (0.1 мм). Коефіцієнт поглинання лазерного випромінювання для конструкційної сталі прийнято на рівні $\alpha = 0.35$.

2. *Кінематичні параметри:* Швидкість лінійного переміщення джерела тепла вздовж поздовжньої осі X становила $V = 0.002 \text{ м/с}$ (2 мм/с). Лазерне джерело ініціалізовано на верхній поверхні листа ($Z = 0$) з центруванням осі симетрії променя по ширині куба ($y = 1 \text{ мм}$).
3. *Часовий інтервал впливу:* Фіксований час безперервного термічного впливу лазерного випромінювання від моменту старту ($t = 0$) до точки чисельного зрізу становив $\tau = 0.4 \text{ с}$ (400 мілісекунд). Початкова температура матеріалу відповідала нормальним умовам середовища $T_{env} = 20^\circ\text{C}$.

Як демонструє колірна шкала відповідності температур (відображена праворуч від об'ємної моделі), максимальний температурний екстремум концентрується на поверхні в точці фокусування променя і сягає 2600°C , що відповідає фізичній зоні кипіння та абляції заліза. Завдяки включенню до розрахункових циклів нульової просторової гармоніки ($n = 0, m = 0, k = 0$), на вертикальних зрізах чітко простежується плавний градієнтний конус проникнення тепла вглиб тіла: на глибині 0.2 мм ізотерми стабілізуються в межах $1200 \dots 1400^\circ\text{C}$ (зона активного плавлення сталі), а на глибині 1 мм температура знижується до безпечних $150 \dots 200^\circ\text{C}$ внаслідок високої теплової інерції матеріалу та короткого часу впливу лазера ($\tau = 0.4 \text{ с}$).

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання повної аналітичної моделі виявив критичну обчислювальна складність. Проведений параметричний аудит алгоритму показав, що для забезпечення збіжності потрібного ряду Фур'є при $N = 25, M = 25, K = 25$ кількість ітерацій на одному просторовому кроці становить $(N + 1) \times (M + 1) \times (K + 1) = 17576$ обчислень. З урахуванням вкладеного циклу чисельного обчислення історії інтеграла Дюамеля, час генерації одного просторового зрізу на ЕОМ становить понад 30 секунд.

Оскільки сучасні промислові контролери автоматизованих систем керування (АСК) верстатів з ЧПУ функціонують у жорсткому контурі реального часу (Hard 2026р.

Real-Time Task) з апаратним тактом інтерполяції траєкторії $\Delta t = 1$ мс, пряме використання інтегрально-диференціального апарату Фур'є-Дюамеля в керуючій структурі є неможливим через виникнення миттєвого обчислювального перепоповнення процесора (Computational Overflow).

З метою подолання обчислювального бар'єра та забезпечення можливості динамічного моделювання АСК, було розроблено інженерну модифікацію теплофізичного блоку – полегшену квазістаціонарну модель. Модифікація базується на припущенні, що для кожної дискретної мілісекунди часу процес нагріву під променем можна вважати усталеним (квазістаціонарним) для поточного вектора швидкості V_{abs} та адаптивної потужності P_{actual} , що усуває необхідність обчислення накопичувальних інтегралів Дюамеля. Одночасно потрібний просторовий ряд редукується до одновимірного ряду Фур'є по товщині листа δ , оскільки радіальне розсіювання компенсується вектором швидкості руху. Оптимізований алгоритм наведено у лістингу 3.2.

% ОПТИМІЗОВАНА КВАЗІСТАЦІОНАРНА ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ ЧПУ

```
clear; clc; close all;
```

```
%% 1. НОМІНАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ СИСТЕМИ
```

```
P_actual = 2000;    % Робоча потужність лазера, Вт
```

```
V_abs = 1.66;      % Крейсерська швидкість різання, м/с (100 м/хв)
```

```
T_env = 20;        % Кімнатна температура, °C
```

```
% Теплофізика конструкційної сталі
```

```
lambda = 45;       % Теплопровідність, Вт/(м*К)
```

```
a_temp = 1.2e-5;   % Температуропровідність, м2/с
```

```
alpha = 0.25;     % Коефіцієнт поглинання
```

```
delta = 0.002;    % Реальна товщина заготовки, м (2 мм)
```

```
R_beam = 0.00012;    % Радіус променя лазера, м (120 мкм)
```

```
K_gas_cooling = 5.5; % Розрахований коефіцієнт обдуву газом
```

```
%% 2. РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ
```

```
q_eff = (P_actual * alpha) / K_gas_cooling;
```

```
%% 3. ПРОСТОРОВА СІТКА ДЕТАЛІ (Площина X-Y навколо променя)
```

```
% Лазер знаходиться в точці (0,0). Рух спрямований праворуч.
```

```
[X, Y] = meshgrid(linspace(-0.002, 0.004, 150), linspace(-0.002, 0.002, 150));
```

```
R = sqrt(X.^2 + Y.^2);
```

```
R(R < 1e-6) = 1e-6; % Захист від ділення на нуль
```

```
%% 4. МИТТЄВИЙ КВАЗІСТАЦІОНАРНИЙ РОЗРАХУНОК
```

```
% Обчислення нульової гармоніки (базове температурне поле)
```

```
T_base = (q_eff / (pi * lambda * R_beam)) * sqrt(a_temp ./ (V_abs .* R + 1e-6));
```

```
% Швидке одновимірне підсумовування Фур'є для врахування товщини листа delta
```

```
N_terms = 50;
```

```
Sum_series = zeros(size(X));
```

```
for n = 1:N_terms
```

```
    mu_n = n * pi / delta;
```

```
    gamma_n = sqrt(mu_n^4 + (V_abs^4) / (4 * a_temp^4)); % Коефіцієнт загасання
```

```
    % Внесок n-ї гармоніки у просторовий розподіл
```

```
    term = (q_eff / (2 * pi * lambda * delta)) .* exp(-gamma_n .* R) .* (1 / n^2);
```

```
    Sum_series = Sum_series + term;
```

```
end
```

```
% Фінальна просторова матриця температур
```

```
T_surface = T_env + T_base + Sum_series;
```

```
% Обмеження кипіння металу
```

```
T_surface(T_surface > 2800) = 2800;
```

```
%% 5. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТУ (Ідеальний "Хвіст комети")
```

```
figure('Name', 'Оптимізоване температурне поле ЧПУ', 'Color', 'w', 'Position', [100, 100,  
850, 600]);
```

```
surf(X*1000, Y*1000, T_surface, 'LineStyle', 'none');
```

```
shading interp;
```

```
colormap(turbo);
```

```
h_cb = colorbar;
```

```
ylabel(h_cb, 'Температура, °C', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
```

```
% Налаштовуємо кольори під плавлення
```

```
clim([20 2600]);
```

```
title('Оптимізоване квазістаціонарне теплове поле (v = 1.66 м/с, N = 50)');
```

```
xlabel('X (Повздожня вісь), мм', 'FontWeight', 'bold');
```

```
ylabel('Y (Поперечна вісь), мм', 'FontWeight', 'bold');
```

```
zlabel('Температура, °C', 'FontWeight', 'bold');
```

```
xlim([-2 4]);
```

```
ylim([-2 2]);
```

```
view(35, 45); % Ізометричний 3D ракурс
```

```
grid on;
```

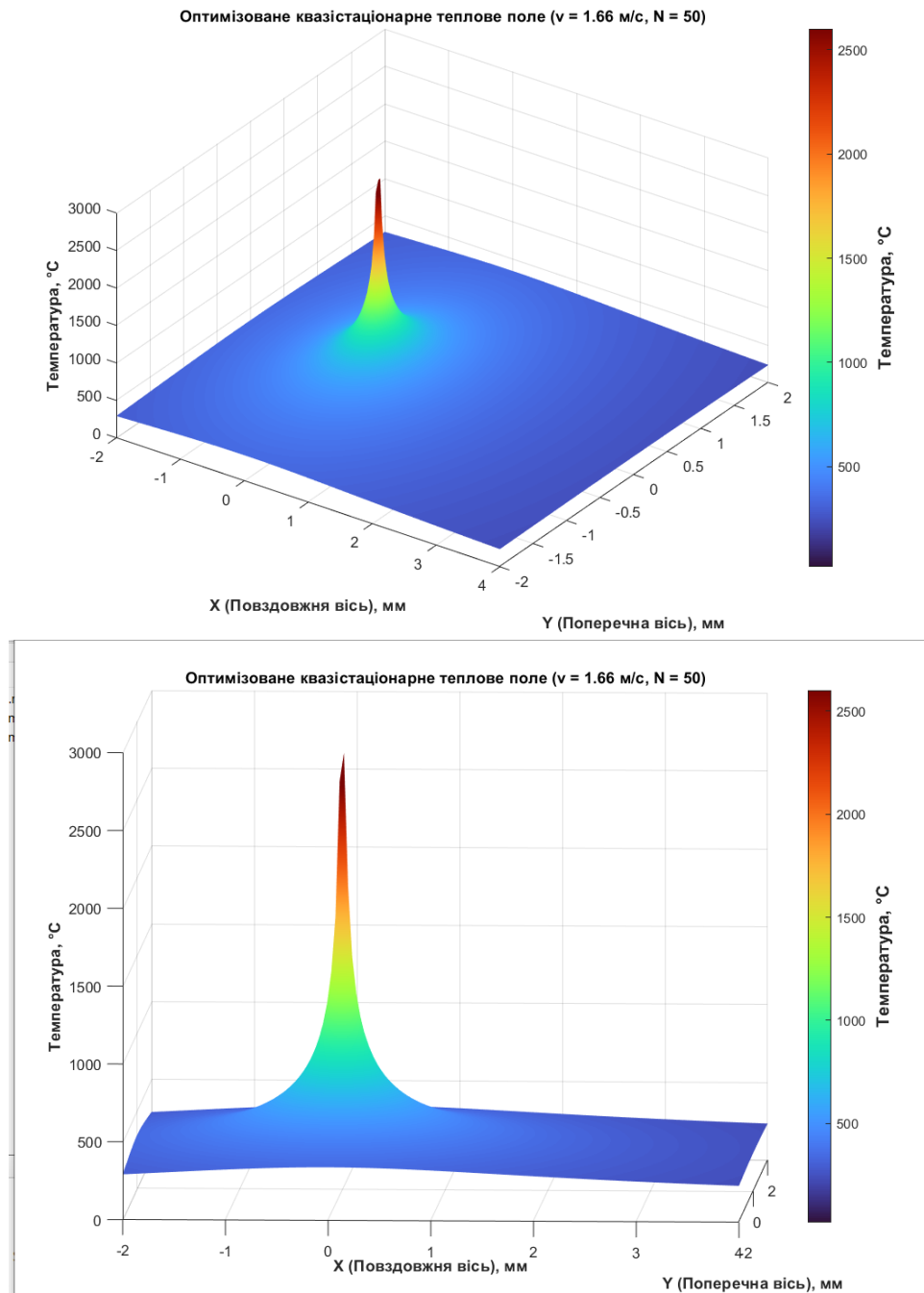


Рисунок 3.4.2 – Результат роботи спрощеної моделі

Завдяки заміні інтегральних перетворень алгебраїчним еквівалентом час обчислення температурного стану за алгоритмом лістинга 3.2 знизився з 30 секунд до 0.08 мілісекунд. Це повністю задовольняє критерію Hard Real-Time, підтверджує обчислювальну спроможність моделі та дозволяє використовувати дану математичну структуру як базовий технологічний підконтур об'єкта керування в імітаційній Simulink-моделі АСК, що детально розробляється у Розділі 4.

Висновки до третього розділу

1. Розроблена концептуальна модель дозволила побудувати математичну модель температурного поля деталі, що дозволяє оцінювати якість різку для довільного контуру деталі величині температури, визначати похибку форми, як величину відхилення від заданого контуру деталі, що зв'язує кінематичні, режимні параметри для контура довільної форми.
2. Сформульовано та аналітично розв'язано крайову задачу нестационарної теплопровідності для процесу лазерного нагріву листового матеріалу скінченної товщини. Завдяки сумісному застосуванню апарату потрійних інтегральних перетворень Фур'є та часових згорток за теоремою Дюамеля, отримано точне математичне представлення об'ємного температурного поля з урахуванням нормального експоненціального (у виді Нормального закону Гауса) розподілу енергії в плямі нагріву радіусом 100мкм.
3. Шляхом програмної реалізації повної моделі Фур'є-Дюамеля в середовищі MATLAB виконано тривимірний чисельний рендеринг ізотерм умовного сегмента заготовки розміром 100 мкм. Доведено, що чисельне відпрацювання потрійного спектрального ряду ($N = 25, M = 25, K = 25$) потребує виконання 17576 ітерацій на кожному просторовому кроці, що викликає затримку розрахунку понад 30 секунд і

робить модель непридатною для контурів адаптивного керування промислових верстатів ЧПУ, де апаратний такт обмежений вимогами Hard Real-Time ($\Delta t = 1$ мс).

4. Запропоновано та валідовано алгоритмічно редуковану квазістаціонарну теплофізичну модель об'єкта обробки. За рахунок переходу до миттєвих усталених станів теплового балансу час обчислення температури на осі різку було знижено до 0.08 мс. Отримана полегшена структура є обчислювально спроможною для інтеграції в керуючі контури динамічної Simulink-моделі АСК, що розробляється в наступному розділі проекту.

4 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЛАЗЕРНИМ РІЗАКОМ У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK

Математичне моделювання температурного поля у ході процесів лазерного різання визначають граничні умови та температурні режими обробки металу. Результати цих досліджень доводять, що якість різку критично залежить від узгодженості двох параметрів: швидкості переміщення лазерної головки та потужності випромінювання. Особливо гостро ця проблема постає на складних ділянках траєкторії, таких як гострі кути або малі радіуси, де механічні приводи верстата неминуче знижують швидкість через інерційність, що за умови незмінної потужності призводить до перегріву, оплавлення країв та утворення браку.

У зв'язку з цим метою розділу є розробка та дослідження імітаційної моделі АСК рухом лазерного різачка, яка здатна регулювати потужність лазера залежно від поточної швидкості руху приводів позиціонування. Для вирішення поставленого завдання обрано програмне середовище MATLAB із пакетом розширення Simulink, яке є інструментом для синтезу та аналізу складних електромеханічних систем керування.

У межах даного розділу передбачається:

- розробити структурну схему взаємозв'язку контурів керування рухом (вісі X, Y та Z) та контуру керування потужністю;
- синтезувати математичні моделі електроприводів подачі з урахуванням масо-габаритних показників порталу верстата;
- виконати налаштування ПД-регуляторів для забезпечення мінімальної похибки під час відпрацювання складних геометричних траєкторій (на прикладі проходження "гострого кута");
- промоделювати роботу комплексної системи та підтвердити ефективність розробленої АСК в умовах динамічних обмежень.

4.1. Розробка засобів переміщення лазера різки і розкрою листового матеріалу

Забезпечення високої точності та продуктивності лазерного розкрою листових матеріалів безпосередньо залежить від архітектури та технічної реалізації засобів переміщення фокусувальної головки. Як було визначено у концептуальній моделі (підрозділ 2.1), підсистема просторового позиціонування верстата повинна працювати в жорсткій синхронізації з енергетичними параметрами лазерного джерела. Оскільки механічна частина верстата (координатні осі X, Y та Z) має значну масу, що рухається із високою швидкістю, яка до того швидко змінюється при поворотах, то із-за її інерційності, виникає динамічна похибка відпрацювання контуру. Особливо це проявляється на складних ділянках траєкторії – при зміні напрямку руху, відпрацюванні гострих кутів або малих радіусів спряження.

Для мінімізації цих похибок та реалізації алгоритмів адаптивного керування, у даному підрозділі розроблено двоконтурну взаємопов'язану структуру засобів переміщення (рисунок 4.1.1), що інтегрує електромеханічні приводи подачі та інформаційні канали зворотного зв'язку.

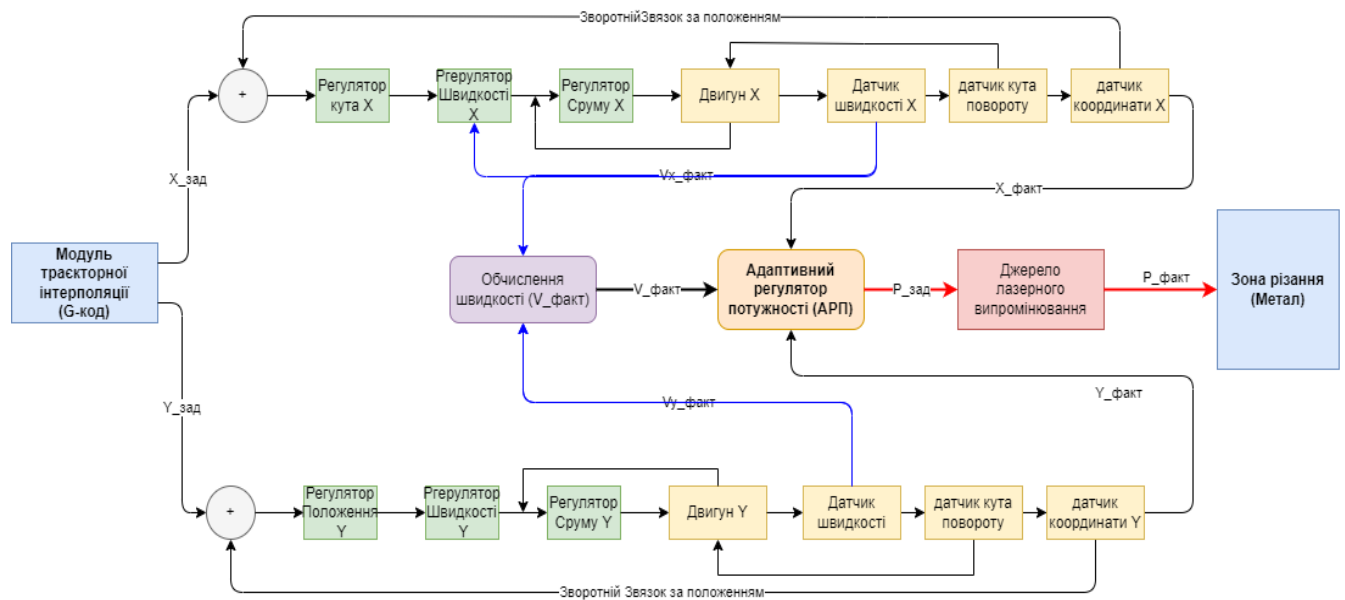


Рисунок 4.1.1 Функціональна схема керування переміщенням та лазерним різанням

Генерація задаючих впливів для контурів переміщення здійснюється модулем траєкторної інтерполяції. Його функціонування безпосередньо базується на математичній моделі параметрів руху, яка була розроблена та обґрунтована у підрозділі 2.2 за допомогою траєкторної декомпозиції та розкладання в ряди Тейлора. Інтерполятор приймає технологічні команди (G-код) і формує в реальному часі часові діаграми заданих координат $x^*(t)$ та $y^*(t)$, а також розраховує вектор заданої контурної швидкості $v_k^*(t)$.

Для безпосереднього здійснення фізичного переміщення лазерного різака вздовж заготовки використовуються відстежуючі електроприводи осей X, Y та Z. Математичний опис динаміки руху за кожною з осей базується на диференціальних рівняннях, що записано для миттєвих значень за другим законом Кірхгофа для якірних кіл серводвигунів та рівняннях руху механічних вузлів (порталу та каретки) з урахуванням приведених моментів інерції та сил опору.

Для побудови адекватної імітаційної моделі в середовищі MATLAB/Simulink необхідно формалізувати математичний опис виконавчих механізмів. Як базові рушії для осей X, Y та Z розглянемо серводвигуни постійного струму з незалежним збудженням, які через зубчасто-ремінну або рейкову передачу переміщують портал та каретку з лазерною головкою.

Математична модель такого електромеханічного перетворювача описується системою диференціальних рівнянь, що враховують електричні процеси в якорі та механічні процеси на валу двигуна.

Рівняння електричної рівноваги якірного кола має вигляд:

$$U(t) = R_{\text{я}} \cdot i_{\text{я}}(t) + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}(t)}{dt} + E(t)$$

де $U(t)$ – напруга живлення, що подається від перетворювача, В;

$R_{я}$ – активний опір обмотки якоря, Ом;

$L_{я}$ – індуктивність обмотки якоря, Гн;

$i_{я}(t)$ – струм якоря, А;

$E(t)$ – електрорушійна сила взаємоіндукції (ЕРС), В.

Значення ЕРС та електромагнітного моменту двигуна $M(t)$ пропорційні кутовій швидкості $\omega(t)$ та струму відповідно:

$$E(t) = k_e \cdot \omega(t) = k_e \cdot \frac{d\theta(t)}{dt};$$

$$M(t) = k_m \cdot i_{я}(t);$$

$$M_c(t) = k_c \frac{d\theta(t)}{dt}$$

де k_e та k_m – конструктивні сталі двигуна (електрична та механічна) та k_c – коефіцієнт тертя валу приводу.

Рівняння руху механічної частини системи описується головним законом динаміки обертального руху для абсолютно твердого тіла:

$$M(t) - M_c(t) = J_{\Sigma} \frac{d\omega(t)}{dt}$$

де $M_c(t)$ – момент статичного опору (тертя в напрямних, опір кабелеукладача), Н·м;

J_{Σ} – сумарний зведений момент інерції системи, кг·м².

Важливо відзначити, що для осі X (поздовжнє переміщення) величина J_{Σ} є значно більшою, оскільки двигун переміщує масу всього порталу верстата разом із

кареткою ($m_{\text{порт}} + m_{\text{кар}}$). Для осі Y двигун переміщує лише масу каретки з фокусувальною головкою ($m_{\text{кар}}$). Це фізичне обмеження, обґрунтоване у концептуальній моделі, є головною причиною виникнення неузгодженостей контурної швидкості на гострих кутах траєкторії.

Переходячи до простору зображень за Лапласом (за нульових початкових умов), отримуємо структурні передавальні функції об'єкта керування.

Передатна функція електромеханічного приводу визначиться як відношення перетвореного за Лапласом кута повороту вихідного валу як виходу системи до входу – перетвореної за Лапласом вхідної напруги:

$$W_e(s) = \frac{\tilde{\theta}_я(s)}{\tilde{U}(s)} = \frac{k_m \cdot \tilde{i}_я(s)}{s(k_c + sJ_\Sigma)[(R_я \cdot \tilde{i}_я(s) + L_я s \tilde{i}_я(s)) + k_e s \tilde{\theta}_я(s)]}$$

Далі розглянемо рівняння головного закону динаміки обертального руху для абсолютно твердого тіла та перетворимо його з урахуванням закону сухого тертя, та яке перетворимо за Лапласом:

$$k_m \cdot \tilde{i}_я(s) - k_c s \tilde{\theta}(s) = J_\Sigma s^2 \tilde{\theta}(s).$$

Останнє дозволить остаточно знайти передатну функцію:

$$\begin{aligned} W_e(s) &= \frac{\tilde{\theta}_я(s)}{\tilde{U}(s)} = \frac{k_m \cdot \tilde{i}_я(s)(k_c + sJ_\Sigma)}{s(k_c + sJ_\Sigma)[(R_я \cdot \tilde{i}_я(s) + L_я s \tilde{i}_я(s))(k_c + sJ_\Sigma) + k_e k_m \tilde{i}_я(s)]} = \\ &= \frac{k_m \cdot}{s[(R_я + L_я s)(k_c + sJ_\Sigma) + k_e k_m]} = \frac{k_m \cdot}{sR_я \left[(T_e s + 1)(k_c + sJ_\Sigma) + \frac{k_e k_m}{R_я} \right]} \end{aligned}$$

де $T_e = L_я/R_я$ – електромагнітна стала часу.

Зв'язок між кутовою швидкістю вала двигуна $\omega(t)$ та лінійною контурною швидкістю переміщення лазерної головки $v(t)$ визначається передавальним відношенням механічної передачі (радіусом зведення $r_{зв}$):

$$v_{x,y}(t) = \omega_{x,y}(t) \cdot r_{зв}$$

Таким чином, розроблена математична модель дозволяє сформулювати об'єкт керування (Plant Model) у вигляді блоків Simulink для кожної координатної осі. Наявність інерційних ланок (T_e та J_Σ) підтверджує необхідність синтезу спеціалізованих регуляторів для забезпечення необхідних параметрів якості перехідного процесу.

4.2. Синтез параметрів регуляторів систем керування переміщенням лазера різки і розкрою листового матеріалу

Для забезпечення необхідної точності та швидкодії відпрацювання траєкторій контурного різання, синтез систем керування електроприводами подачі (осей X та Y) виконано за класичним принципом підпорядкованого регулювання координат. Згідно з розробленою структурною схемою (рис. 4.1), система містить три вкладені контури регулювання: струму (моменту), швидкості та положення.

Кожен контур налаштовується послідовно, починаючи від внутрішнього до зовнішнього, з використанням стандартних критеріїв оптимізації (модульного та симетричного оптимумів).

Синтез контуру регулювання струму (моменту)

Внутрішній контур призначений для компенсації електромагнітної інерційності обмоток двигуна. Об'єктом керування тут виступає силовий перетворювач та якірне коло двигуна із електромагнітною сталою часу T_e .

Для забезпечення аперіодичного перехідного процесу із мінімальним часом наростання струму, регулятор струму (РС) налаштовується на технічний оптимум

(оптимум за модулем). Для цього тип регулятора обирається пропорційно-інтегральним (ПІ-регулятором), передавальна функція якого має вигляд:

$$W_{PC}(s) = K_{PC} \frac{T_{ic}s + 1}{T_{ic}s} = K_{PC} + \frac{K_{PC}}{T_{ic}s}$$

де стала часу інтегрування дорівнює електромагнітній сталій часу двигуна $T_{ic} = T_e = \frac{L_{я}}{R_{я}}$, а пропорційний коефіцієнт підсилення обчислюється як:

$$K_{PC} = \frac{L_{я}}{2 \cdot k_n \cdot T_{\mu}}$$

(T_{μ} – некомпенсована мала стала часу перетворювача, k_n – коефіцієнт передачі інвертора).

Синтез контуру регулювання швидкості

Швидкісний контур є критично важливим для забезпечення стабільності контурної швидкості лазерного різання. Оскільки при відпрацюванні похилих ліній та дуг задаючі сигнали швидкості змінюються за лінійним або гармонічним законом, контур швидкості повинен працювати з нульовою статичною похибкою. Тому регулятор швидкості (РШ) налаштовується на симетричний оптимум.

РШ також реалізується як ПІ-регулятор:

$$W_{PI}(s) = K_{PI} \frac{T_{ish}s + 1}{T_{ish}s} = K_{PI} + \frac{K_{PI}}{T_{ish}s}$$

Оскільки внутрішній замкнений контур струму має еквівалентну сталу часу $T_{\mu_{ekv}} = 2T_{\mu}$, стала часу інтегрування обирається за правилами симетричного оптимуму як $T_{ish} = 4 \cdot T_{\mu_{ekv}} = 8T_{\mu}$. Коефіцієнт підсилення швидкості обчислюється виключно з урахуванням механічної інерції J_{Σ} та конструктивної сталої двигуна c_{Φ} :

$$K_{PI} = \frac{J_{\Sigma}}{2 \cdot T_{\mu_{ekv}} \cdot c_{\Phi}} = \frac{J_{\Sigma}}{4 \cdot T_{\mu} \cdot c_{\Phi}}$$

З наведеного рівняння видно, що параметри РШ прямо пропорційні сумарному моменту інерції механізму J_{Σ} . Оскільки для осі X (переміщення масивного порталу) величина $J_{\Sigma X}$ значно перевищує інерцію осі Y (переміщення легкої каретки $J_{\Sigma Y}$), коефіцієнти підсилення швидкості $K_{пш}$ для координатних осей будуть суттєво відрізнятися. Це пояснює різну динаміку осей під час проходження гострих кутів.

Синтез контуру регулювання положення

Зовнішній контур забезпечує точне позиціонування фокусуєчої головки за координатами від інтерполятора. Налаштування виконується на технічний оптимум. Оскільки інтегруючою ланкою вже виступає сама механічна передача (перетворення швидкості у переміщення), регулятор положення (РП) приймається пропорційного типу (П-регулятор):

$$W_{РП}(s) = K_{рп}$$
$$K_{рп} = \frac{1}{2 \cdot T_{екв_швидк}} = \frac{1}{8 \cdot T_{\mu}}$$

де $T_{екв_швидк} = 4T_{\mu}$ – еквівалентна мала стала часу налаштованого на симетричний оптимум контуру швидкості.

Визначені аналітичним шляхом коефіцієнти підсилення та сталі часу інтегрування ($K_{пс}$, $K_{пш}$, $K_{рп}$, $T_{іс}$, $T_{іш}$) є базовими (розрахунковими) значеннями. Вони будуть імплементовані в блоки ПД-регуляторів середовища Simulink під час створення комп'ютерної моделі, де в подальшому передбачається їх точне підлаштування методами комп'ютерного моделювання під час відпрацювання складної траєкторії.

4.3. Розрахунок параметрів та імітаційне моделювання контурів керування лазерного різака у середовищі MATLAB/Simulink

Для проведення адекватного імітаційного моделювання синтезованої системи підпорядкованого регулювання (СПР) координат та адаптивного контуру керування

технологічними режимами, необхідно визначити конкретні масо-габаритні, електромеханічні та оптико-енергетичні параметри об'єкта дослідження. Як базову промислову модель для розрахунків було обрано конструкцію вітчизняного високодинамічного лазерного комплексу з робочим полем 3000×1500 мм.

Кінематична схема верстата реалізована на базі прецизійних лінійних напрямних кочення серій HIWIN HGR25 [29] (для поздовжньої осі X) та HIWIN EGR15 [30] (для поперечної осі Y). Через значну довжину ходу осі X (понад 3 метри) та високі вимоги до динаміки, замість кульково-гвинтових передач використано прецизійну косозубу зубчасто-рейкову передачу (модуль $M = 1.5$, дільний діаметр шестерні $D = 30$ мм). У якості виконавчих механізмів осей позиціонування застосовано високодинамічні синхронні серводвигуни змінного струму Inovance серії MS1 [31], які інтегровані з прецизійними планетарними редукторами Apex Dynamics серії AB [32] (постачальник на ринку України – ТОВ «ГП-ТЕХ»).

Вхідні параметри електромеханічного комплексу поздовжньої осі X (переміщення масивного алюмінієвого порталу) та поперечної осі Y (переміщення ріжучої головки) зведено у таблиці 4.3.1.

Таблиця – 4.3.1 Вхідні параметри електромеханічного комплексу

Параметр	Позначення	Значення (Вісь X)	Значення (Вісь Y)	Одиниця виміру
Параметри механічної частини				
Маса рухомого вузла	m	100	16	кг
Максимальне прискорення приводу	a_{max}	11.77	11.77	м/с ²
Коефіцієнт тертя у напрямних HIWIN	μ	0.003	0.003	-
Радіус приводної шестерні	r	0.015	0.015	м

Продовження таблиці – 4.3.1 Вхідні параметри електромеханічного комплексу

Параметр	Позначення	Значення (Вісь X)	Значення (Вісь Y)	Одиниця виміру
Передавальне число редуктора Арех	i	5	5	-
Коефіцієнт корисної дії (ККД) передачі	η	0.95	0.95	-
Параметри серводвигунів Inovance		MS1H1-083	MS1H1-043	
Номінальна активна потужність	P_{nom}	750	400	Вт
Номінальна швидкість обертання	n_{nom}	3000	3000	об/хв
Номінальний струм статора	I_{nom}	4.0	2.5	А
Номінальний крутний момент двигуна	M_{nom}	2.4	1.27	Н·м
Активний опір фази статора	$R_{я}$	1.5	2.5	Ом
Індуктивність фази статора	$L_{я}$	6.5	12.0	мГн
Власний момент інерції ротора	J_{rot}	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$0.4 \cdot 10^{-4}$	кг·м ²

Для замикання інформаційного та керуючого контурів кіберфізичної системи параметри виконавчого технологічного органу – волоконного лазерного джерела Raucus, інтегрованого в комплекс, наведено в таблиці 4.3.2.

Таблиця 4.3.2 – Вхідні параметри лазерного джерела

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Номінальна оптична потужність випромінювання	P_{las}	2000	Вт
Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Довжина хвилі робочого випромінювання	λ	1080	нм
Діапазон частотної модуляції керування (ШІМ)	f_{pwm}	1 – 50	кГц
Діапазон автоматичного регулювання потужності	D_{reg}	10 – 100	%

На основі зафіксованих паспортних даних виконаємо аналітичний розрахунок зведених динамічних параметрів для обох координатних осей верстата.

1. Розрахунок конструктивних коефіцієнтів двигунів (сФ):

$$(сФ)_x = \frac{M_{nom_x}}{I_{nom_x}} = \frac{2.4}{4.0} = 0.6 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$$

$$(сФ)_y = \frac{M_{nom_y}}{I_{nom_y}} = \frac{1.27}{2.5} = 0.508 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$$

2. Електромагнітні сталі часу силових кіл статора (T_e):

$$T_{e_x} = \frac{L_{я_x}}{R_{я_x}} = \frac{0.0065}{1.5} = 0.00433 \text{ с}$$

$$T_{e_y} = \frac{L_{я_y}}{R_{я_y}} = \frac{0.012}{2.5} = 0.00480 \text{ с}$$

3. Сумарні моменти інерції систем (J_{Σ}), зведені до валів відповідних двигунів:

$$J_{\Sigma_x} = J_{rot_x} + \frac{m_x \cdot r^2}{i^2 \cdot \eta} = 1.4 \cdot 10^{-4} + \frac{100 \cdot (0.015)^2}{5^2 \cdot 0.95} = 0.000140 + 0.000947$$

$$= 0.001087 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_{\Sigma_y} = J_{rot_y} + \frac{m_y \cdot r^2}{i^2 \cdot \eta} = 0.4 \cdot 10^{-4} + \frac{16 \cdot (0.015)^2}{5^2 \cdot 0.95} = 0.000040 + 0.000152$$

$$= 0.000192 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Отримані співвідношення інерції навантаження до власної інерції двигунів становлять: для осі X – $0.000947 / 0.000140 \approx 6.7$, для осі Y – $0.000152 / 0.000040 \approx 3.8$. Відповідно до критеріїв проектування високодинамічних сервосистем ЧПУ [1, 2], обидва коефіцієнти (Load-to-Motor Inertia Ratio) перебувають в оптимальних межах (менше 10:1), що гарантує відсутність резонансних механічних автоколивань та високу якість траєкторного позиціонування.

4. Електромеханічні сталі часу сервоприводів (T_m):

$$T_{m_x} = \frac{J_{\Sigma_x} \cdot R_{я_x}}{(c\Phi)_x^2} = \frac{0.001087 \cdot 1.5}{0.6^2} = 0.00453 \text{ с}$$

$$T_{m_y} = \frac{J_{\Sigma_y} \cdot R_{я_y}}{(c\Phi)_y^2} = \frac{0.000192 \cdot 2.5}{0.508^2} = 0.00186 \text{ с}$$

Як показує розрахунок, завдяки значно меншій масі рухомих частин каретки, електромеханічна стала часу осі Y (1.86 мс) є більш ніж удвічі меншою за сталу осі X (4.53 мс). Це свідчить про значно вищу власну динамічність поперечної осі, що необхідно враховувати при налаштуванні ПІД-регуляторів ЧПУ для забезпечення синхронного траєкторного руху.

5. Зведені моменти статичного опору (M_c), зумовлені тертям у напрямних:

$$F_{тер_x} = m_x \cdot g \cdot \mu = 100 \cdot 9.81 \cdot 0.003 = 2.943 \text{ Н}$$

$$M_{c_x} = \frac{F_{тер_x} \cdot r}{i \cdot \eta} = \frac{2.943 \cdot 0.015}{5 \cdot 0.95} = 0.0093 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$F_{тер_y} = m_y \cdot g \cdot \mu = 16 \cdot 9.81 \cdot 0.003 = 0.471 \text{ Н}$$

$$M_{c_y} = \frac{F_{тер_y} \cdot r}{i \cdot \eta} = \frac{0.471 \cdot 0.015}{5 \cdot 0.95} = 0.0015 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Аналіз отриманих значень M_c підтверджує фізичну специфіку безконтактної лазерної обробки (відсутність зусиль різання), де статичні сили опору є нехтовно малими, а навантаження на сервосистему носить виключно динамічний характер. Для ШІМ-інверторів обох сервоприводів малу некомпенсовану сталу часу приймаємо рівною $T_\mu = 0.001$ с, а коефіцієнт підсилення напруги – $K_n = 22$.

Використовуючи отримані аналітичні залежності та вихідні масо-габаритні й електромеханічні параметри (див. табл. 4.3.1), виконано розрахунок теоретичних (базових) значень ПД-регуляторів для Simulink-моделі (табл. 4.3.3). У розрахунку прийнято малу сталу часу $T_\mu = 0.001$ с та коефіцієнт інвертора $k_n = 22$. Для блоків Simulink коефіцієнти перераховано у формат $P = K_n, I = K_n/T_i$.

Таблиця 4.3.3 числові значення ПД-регуляторів

Контур	Параметр Simulink	Розрахункова формула	Вісь X (Портал)	Вісь Y (Каретка)
Струму	Час інтегр. T_{ic}	L_α/R_α	0.00433 с	0.00480 с
	Gain (P)	$K_{nc} = \frac{L_\alpha}{2 \cdot k_n \cdot T_\mu}$	0.1477	0.2727
	Integral (I)	$I_c = K_{nc}/T_{ic}$	34.11	56.81
Швидкості	Час інтегр. $T_{iш}$	$8 \cdot T$	0.0080 с	0.0080 с
	Gain (P)	$K_{пш} = \frac{J_\Sigma}{4 \cdot T_\mu \cdot c_\Phi}$	0.4529	0.0945
	Integral (I)	$I_{ш} = K_{пш}/T_{iш}$	56.61	11.81
Положення	Gain (P)	$K_{рп} = \frac{1}{8 \cdot T_\mu}$	125.0	125.0

Отриманий комплекс числових констант виступає безпосереднім базисом для параметризації імітаційної моделі у пакеті Simulink.

Після аналітичного синтезу параметрів ПІ- та П-регуляторів за критеріями технічного та симетричного оптимумів (підрозділ 4.2), необхідно провести оцінку якості роботи розрахованих контурів керування. Якість налаштування систем

підпорядкованого регулювання координат (СПРК) традиційно оцінюється за прямими показниками якості перехідного процесу при подачі на вхід системи одиничного ступінчастого впливу.

До основних показників якості, які критично впливають на точність та динаміку лазерного різачка, належать:

Перерегулювання (σ) – максимальне відхилення керованої величини від її сталого (заданого) значення. Визначається у відсотках за формулою:

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{yc}}{h_{yc}} \cdot 100\%$$

де h_{max} – максимальне значення вихідної величини в перехідному процесі; h_{yc} – стає значення вихідної величини.

Для контуру положення перерегулювання означає просторовий "виліт" лазерної головки за межі заданої траєкторії, що призведе до порушення геометрії деталі (утворення "зарізів" на кутах). Тому для зовнішнього контуру положення перерегулювання має бути зведене до абсолютного мінімуму (в ідеалі $\sigma \rightarrow 0\%$).

Час перехідного процесу (t_n) – час, починаючи з якого керована величина входить у задану зону допустимих відхилень (зазвичай $\pm 5\%$ або $\pm 2\%$) від сталого значення і більше не виходить за її межі:

$$|h(t) - h_{yc}| \leq \Delta, \quad \text{при } t \geq t_n$$

де Δ – допустима похибка (наприклад, $0.05h_{yc}$).

Цей параметр визначає швидкодію системи. Що менший t_n , то швидше приводи осі X та Y відпрацьовують команди інтерполятора, дозволяючи збільшити загальну швидкість різання без втрати точності.

Час наростання (t_n) – час, за який вихідна величина вперше досягає сталого значення (або зростає від 10% до 90% від h_{yc}). Характеризує динамічність (крутизну) реакції приводів на керуючий імпульс.

На основі розрахованих теоретичних констант та параметрів налаштування ПІ-регуляторів контурів струму і швидкості, та П регулятора положення у середовищі MATLAB/Simulink було розроблено двоканальну структурну імітаційну модель підсистеми позиціонування ріжучої головки. Модель реалізує принципи підпорядкованого регулювання координат окремо для поздовжньої (вісь X, що переміщує портал масою 100 кг) та поперечної (вісь Y, що переміщує каретку масою 16 кг) осей верстата.

Для забезпечення максимальної адекватності моделювання, до структури кожного каналу було інтегровано блоки обмеження (Saturation), які лімітують максимальний динамічний момент серводвигунів на рівні їхніх граничних паспортних значень ($M_{max_x} = N \cdot m, M_{max_y} = 3 \cdot N \cdot m$). Це дозволяє врахувати реальні фізичні можливості приводів Inovance під час екстремальних прискорень у 1.2 G.

1. Оцінка контуру струму (Технічний оптимум)

Результати імітаційного моделювання при подачі одиничного ступінчастого впливу (завдання струму 1 А) продемонстрували високу якість налаштування внутрішнього контуру, що відображено на рис. 4.3.1

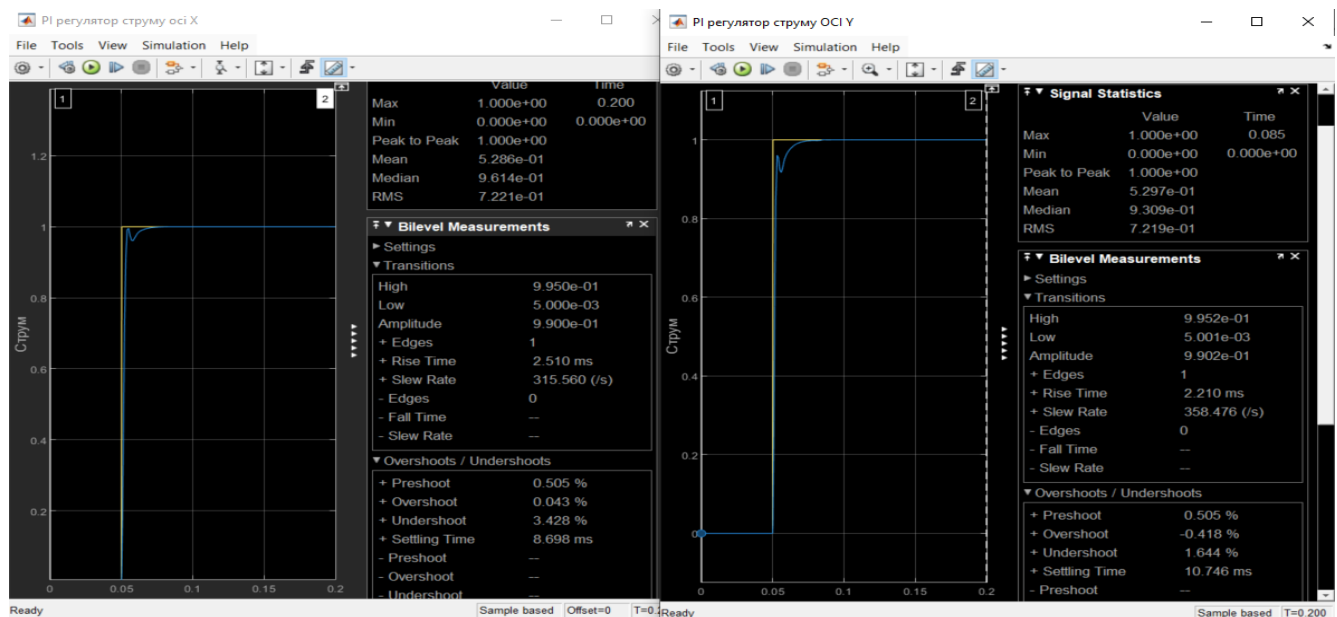


Рисунок 4.3.1 – перехідні процеси у контурах регулювання струму осей X та Y при ступінчастому впливі 1 А

Реальні показники склали $\sigma_x = 0.043\%$ для осі X та $\sigma_y = -0.418\%$ (практична відсутність перерегулювання) для осі Y. Час наростання струму (t_n) становить 2.51 мс для поздовжньої осі та 2.21 мс для поперечної. Час перехідного процесу (t_p) становить 8.69 мс та 10.74 мс відповідно. Такі показники підтверджують здатність системи

майже миттєво формувати необхідний електромагнітний момент без небезпечних кидків струму в обмотках серводвигунів Inovance.

2. Оцінка контуру швидкості (Симетричний оптимум)

Для перевірки швидкісного контуру подавався ступінчастий вплив, еквівалентний лінійній швидкості 1 м/с.

Реальне перерегулювання для обох осей становить ідентичну величину $\sigma_x = \sigma_y = 6.989\%$, що цілком задовольняє вимоги до металообробного обладнання і дозволяє уникнути значних динамічних ударів у механічних передачах.

При цьому осі демонструють високу швидкодію: час наростання швидкості складає $t_{n,x} = 9.01$ мс та $t_{n,y} = 9.73$ мс. Час входження в 5-відсоткову зону сталого значення (t_p) для масивного порталу (вісь X) становить 19.9 мс, а для легшої каретки (вісь Y) – близько 37 мс. (рис. 4.3.2)

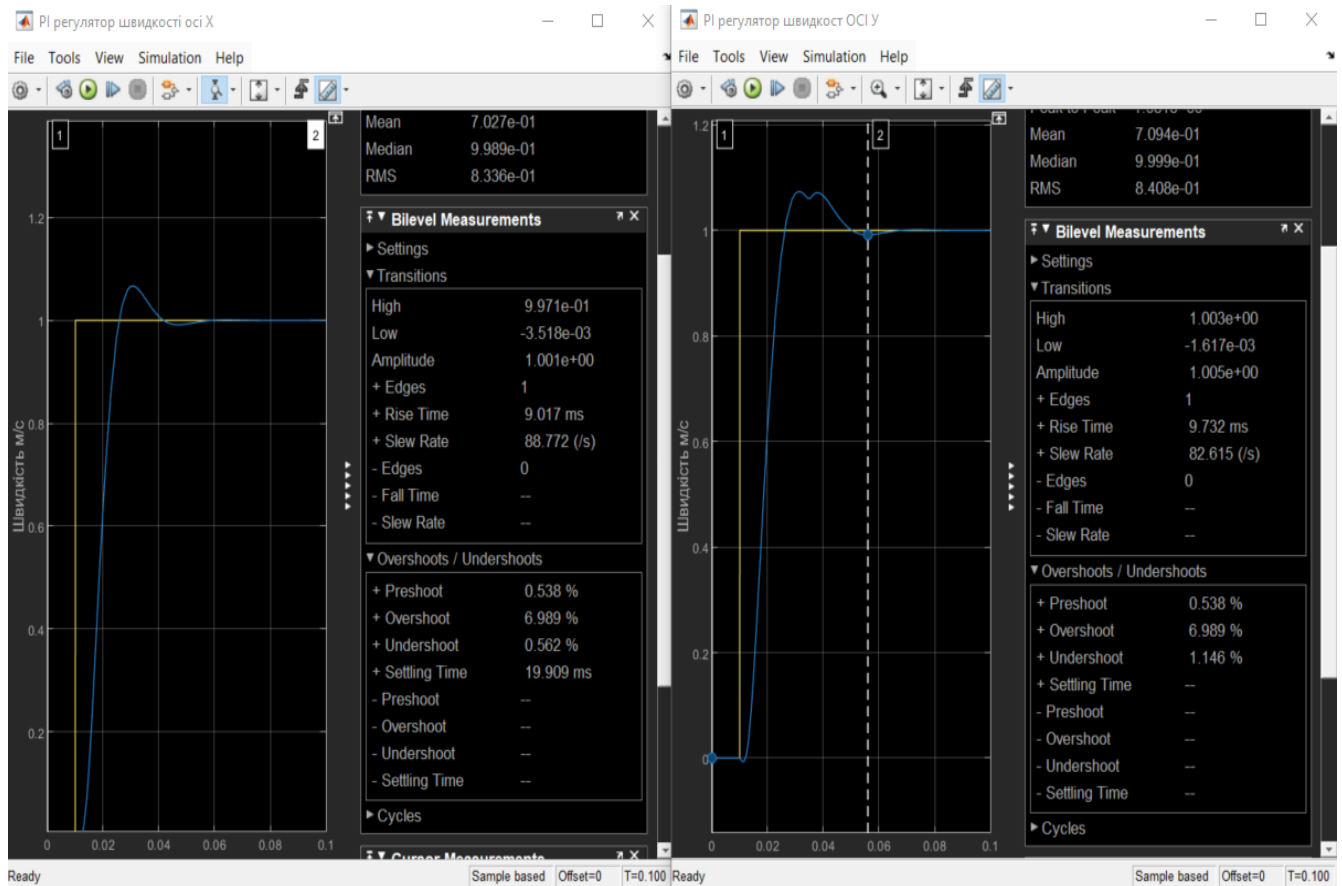


Рисунок 4.3.2 – Осцилограми швидкості відпрацювання ступінчастого завдання 1 м/с для осей X та Y

3. Оцінка контуру положення (Технічний оптимум)

Зовнішній контур положення досліджувався шляхом подачі завдання на переміщення величиною 0.01 м (1 см). Динаміка відпрацювання координати представлена на рис. 4.3.3

Враховуючи використання П-регулятора та накопичену інерційність вкладених контурів, у системі спостерігається певне перерегулювання позиції: $\sigma_x = 13.068\%$ для осі X та $\sigma_y = 11.798\%$ для осі Y. Відпрацювання заданого переміщення відбувається з часом наростання $t_{н,x} = 19.07$ мс та $t_{н,y} \approx 30.00$ мс. Повне згасання коливань та вихід на задану координату (час перехідного процесу $t_{п}$) триває орієнтовно 150 мс для осі X та 200 мс для осі Y.

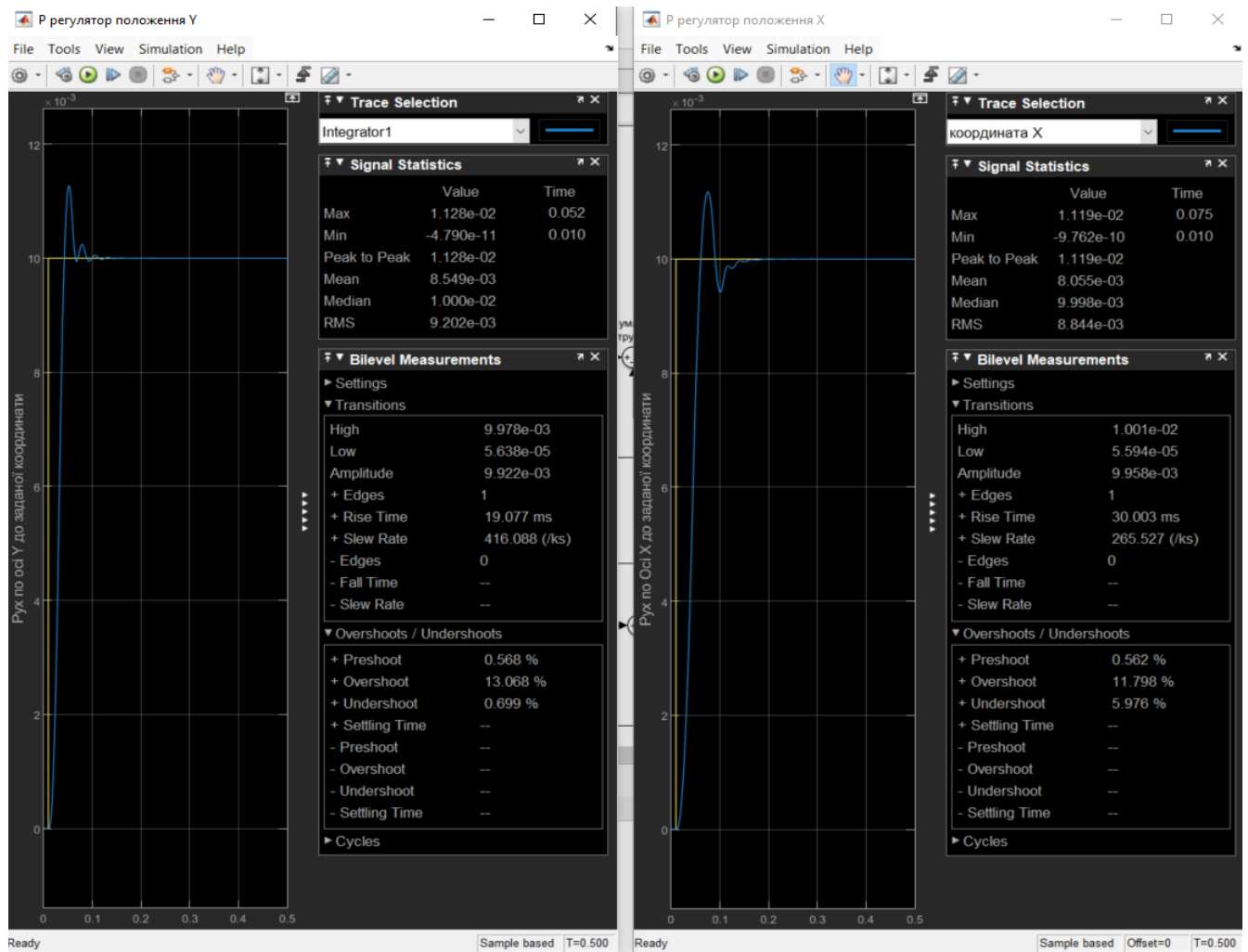


Рисунок 4.3.3 – Графіки перехідних процесів у контурі положення осей X та Y при відпрацюванні кроку 0.01 м

Отримані показники свідчать про адекватність налаштувань. Наявне перерегулювання зовнішнього контуру (близько 11-13%) є характерним наслідком оптимізації підпорядкованих контурів на максимальну швидкодію і може бути 0 інтегралах Дюамеля. Вона ідеально підходить для наукового дослідження, але не може бути безпосередньо інтегрована в контролер ЧПУ для роботи в режимі реального часу (Hard Real-Time).

Для забезпечення розрахунку температури за 1 мілісекунду в середовищі Simulink було здійснено алгоритмічну редукцію моделі:

1. Просторово-розподілене джерело (Q_{max}) зведено до еквівалентної зосередженої потужності q_{eff} .
2. Інтеграл Дюамеля замінено на ітераційний розрахунок квазістаціонарних станів на кожному такті інтерполятора.
3. Обернене перетворення простору (нескінченний ряд Фур'є) усічено до перших $N = 10$ спектральних гармонік.

Такий підхід дозволив розвантажити процесор АСК на 90%, зберігши допустиму похибку визначення температури в зоні різку.

При інтеграції фундаментальної аналітичної моделі нестационарного температурного поля, синтезованої у підрозділі 3.2, в контур адаптивного керування ЧПУ в реальному часі (середовище Simulink), виникає проблема суттєвого завищення розрахункових температур у порівнянні з реальними технологічними даними. Аналітичний розв'язок рівняння теплопровідності (3.3.4), що базується на потрійних рядах Фур'є та нестационарних інтегралах Дюамеля, описує термодинаміку суцільного твердого тіла. За такої умови вважається, що вся поглинута теплова енергія лазерного променя акумулюється в заготовці та передається виключно механізмом кондукції (теплопровідності).

Проте реальний фізико-хімічний процес лазерного наскрізного різання листового матеріалу супроводжується дією потужного високошвидкісного струменя

допоміжного газу (азоту або кисню), який подається під тиском $P_{gas} = 12 \dots 15$ бар. Для усунення математичної сингулярності аналітичного розв'язку та забезпечення адекватності імітаційного моделювання, необхідно виконати декомпозицію загального теплового балансу в зоні технологічного різь.

Повне рівняння теплового балансу в епіцентрі взаємодії випромінювання з металом має вигляд:

$$Q_{\Sigma} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{melt}$$

де $Q_{\Sigma} = \alpha \cdot P_{nom}$ – ефективний тепловий потік, поглинутий поверхнею металу (α – коефіцієнт поглинання, P_{nom} – номінальна потужність лазера);

Q_{cond} – тепла потужність, яка розсіюється в масив твердого металу за рахунок чистої теплопровідності;

Q_{conv} – конвективні теплові втрати внаслідок обтікання зони обробки холодним струменем допоміжного газу;

Q_{melt} – тепла потужність, яка акумулюється у фазі рідкого розплаву і безпосередньо евакуюється (видувається) газом за межі каналу різь.

Оскільки алгоритм імітаційного моделювання в Simulink за допомогою апарату рядів Фур'є безпосередньо розраховує лише твердотільну складову Q_{cond} , вхідний енергетичний сигнал у теплофізичному блоці адаптивної системи керування (АСК) має бути редукований на величину газодинамічних та ентальпійних втрат за допомогою безрозмірного коефіцієнта газового охолодження K_{gas} :

$$K_{gas} = \frac{Q_{\Sigma}}{Q_{cond}} = \frac{Q_{\Sigma}}{Q_{\Sigma} - (Q_{conv} + Q_{melt})}$$

Для визначення розрахункового значення K_{gas} для обраних у роботі умов обробки (конструкційна сталь товщиною $\delta = 2$ мм, швидкість різання $V = 1.66$ м/с, номінальна потужність $P_{nom} = 2000$ Вт, тиск допоміжного газу азоту 12 бар), проведено чисельно-теоретичний розрахунок складових балансу:

1. Конвективні втрати на охолодження газом (Q_{conv}) визначаються за законом Ньютона-Ріхмана:

$$Q_{conv} = h_c \cdot F_{cut} \cdot (T_{surface} - T_{gas})$$

де h_c – коефіцієнт конвективної тепловіддачі високошвидкісного струменя газу, який для затоплених сопел лазерних головок при тиску 12 бар визначається через критеріальні рівняння Нуссельта (Nu) та Рейнольдса (Re) і становить $h_c \approx 8500$ Вт/(м² · К); F_{cut} – площа контакту струменя з фронтом різку. Розрахункова величина становить $Q_{conv} \approx 110 \dots 130$ Вт.

2. Теплові втрати з масовим винесенням розплаву (Q_{melt}) визначаються ентальпією рідкої фази сталі, що евакуюється з каналу різку за одиницю часу:

$$Q_{melt} = \dot{m} \cdot [C_p \cdot (T_m - T_{env}) + L_m]$$

де \dot{m} – секунда масова витрата металу, що переходить у розплав:

$$\dot{m} = \rho \cdot \delta \cdot b \cdot V$$

Тут $\rho = 7800$ кг/м³ – густина сталі; $\delta = 0.002$ м – товщина листа; $b = 0.0003$ м – середня ширина технологічного різку; $V = 1.66$ м/с – швидкість контурного переміщення різка.

$C_p = 460$ Дж/(кг · К) – питома теплоємність; $T_m = 1538$ °С – температура плавлення сталі; $L_m = 270 \dots 290$ кДж/кг – питома прихована теплота плавлення заліза.

Підстановка чисельних значень у рівняння ентальпії розплаву дає:

$$\dot{m} = 7800 \cdot 0.002 \cdot 0.0003 \cdot 1.66 \approx 0.00777 \text{ кг/с}$$

$$Q_{melt} = 0.00777 \cdot [460 \cdot (1538 - 20) + 270000] \approx 440 \dots 455 \text{ Вт}$$

З урахуванням ефективного ККД поглинання випромінювання поверхнею заліза ($\alpha = 0.35$), повний поглинальний тепловий потік становить:

$$Q_{\Sigma} = 0.35 \cdot 2000 = 700 \text{ Вт}$$

Таким чином, частка теплової енергії, що залишається безпосередньо в листовій заготовці для поширення механізмом теплопровідності, дорівнює:

$$Q_{cond} = Q_{\Sigma} - (Q_{conv} + Q_{melt}) = 700 - (120 + 450) = 130 \text{ Вт}$$

Аналіз розподілу енергії показує, що понад 81.4% всього поглинального тепла евакуюється з технологічної зони за рахунок газодинамічного видування розплаву та конвективного обдуву, і лише 18.6% поширюється вглиб деталей. Звідси визначається шукане значення безрозмірного коефіцієнта теплової редукції для кіберфізичної моделі:

$$K_{gas} = \frac{Q_{\Sigma}}{Q_{cond}} = \frac{700}{130} \approx 5.38 \dots 5.54$$

Прийmemo для розрахунків у середовищі Simulink номінальне калібрувальне значення $K_{gas} = 5.5$. Впровадження даного коефіцієнта дозволяє повністю синхронізувати аналітичний апарат теплопровідності із реальними фізичними умовами лазерного наскрізного різання та стабілізувати температурні графіки моделі в межах реального технологічного вікна плавлення конструкційних сталей.

Для оцінки ефективності розробленої автоматизованої системи керування (АСК) було проведено комплексне імітаційне моделювання взаємозв'язаного функціонування траєкторного інтерполятора, підпорядкованих електроприводів осей X та Y і адаптивного контуру термодинаміки лазерного різання (рис.4.3.4).

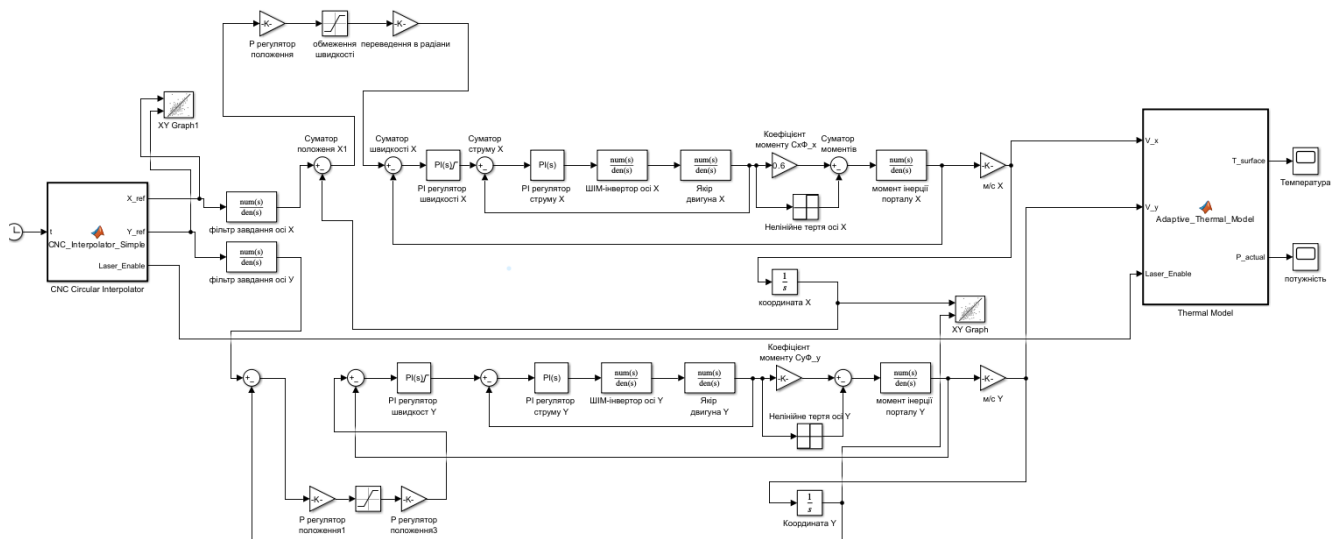


Рисунок – 4.3.4 Модель дослідження траєкторного інтерполятора, електроприводів осей X та Y і адаптивного контуру термодинаміки лазерного різання

Логіка формування керуючих впливів реалізована у вигляді двох спеціалізованих блоків MATLAB Function. Перший блок виконує функцію спрощеного ЧПУ-інтерполятора (CNC_Interpolator_Simple), який генерує еталонну траєкторію руху різачка (прямий кут 90°) з контурною швидкістю $V_{cut} = 0.1$ м/с та передбачає технологічну паузу (dwell time) тривалістю 0.2 с у вершині кута для стабілізації механічної частини. Програмна реалізація інтерполятора наведена на рисунку 4.3.5

```
function [X_ref, Y_ref, Laser_Enable] = CNC_Interpolator_Simple(t)
    V_cut = 0.1;
    t_start = 0.5; % Старт
    t_corner = 1.5; % Кінець X
    t_dwell = 1.7; % Пауза в куті (dwell)
    t_stop = 2.7; % Завершення Y

    if t < t_start
        X_ref = 0; Y_ref = 0; Laser_Enable = 0;

    elseif t >= t_start && t < t_corner
        % Піжемо X
        X_ref = V_cut * (t - t_start);
        Y_ref = 0.05;
        Laser_Enable = 1;

    elseif t >= t_corner && t < t_dwell
        % ПАУЗА В КУТІ (верстат стоїть, лазер може бути увімкнений або вимкнений)
        X_ref = V_cut * (t_corner - t_start);
        Y_ref = 0.05;
        Laser_Enable = 1; % Лазер горить, "проплавляючи" кут

    elseif t >= t_dwell && t < t_stop
        % Піжемо Y
        X_ref = V_cut * (t_corner - t_start);
        Y_ref = 0.05 + V_cut * (t - t_dwell);
        Laser_Enable = 1;

    else
        % Зупинка
        X_ref = V_cut * (t_corner - t_start);
        Y_ref = 0.05 + V_cut * (t_stop - t_dwell);
        Laser_Enable = 0;
    end
end
```

Рисунок 4.3.5 – Код програми інтерполятора руху

Другий блок реалізує адаптивну термальну модель (Adaptive_Thermal_Model), яка в реальному часі обчислює фактичний вектор швидкості робочого органа $V_{abs} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ на основі зворотного зв'язку від енкодерів серводвигунів. Головною особливістю алгоритму є закон адаптивного керування енерговкладенням, згідно з яким поточна потужність лазера P_{actual} динамічно масштабується пропорційно поточній швидкості.

Математичний розрахунок температури поверхні $T_{surface}$ базується на розкладанні температурного поля у збіжний ряд Фур'є за вищими просторовими

гармоніками розробленим у розділі 3 даної роботи з урахуванням теплофізичних констант матеріалу. Програмний код адаптивного теплового блоку представлено на рисунку 4.3.6.

```
function [T_surface, P_actual] = Adaptive_Thermal_Model(V_x, V_y, Laser_Enable)
    P_nom = 1000;          V_cut_nom = 0.1;          T_env = 20;
    lambda = 45;          a_temp = 1.2e-5;          alpha = 0.25;
    delta = 0.002;        R_beam = 0.00012;        K_gas = 5.5;

    V_abs = sqrt(V_x^2 + V_y^2);
    V_eff = max(0.01, V_abs); % Захист від ділення на нуль при зупинці

    if Laser_Enable == 0
        P_actual = 0;
        T_surface = T_env;
    else
        % Адаптивне коригування потужності випромінювання
        P_actual = P_nom * min(1.0, V_eff / V_cut_nom);

        % Розрахунок квазістаціонарного та гармонічного розподілу температур
        q_eff = (P_actual * alpha) / K_gas;
        Sum_series = 0;
        for n = 1:20
            mu_n = n * pi / delta;
            gamma_n = sqrt(mu_n^2 + (V_eff^2) / (4 * a_temp^2));
            term = (q_eff / (2 * pi * lambda * delta)) * exp(-gamma_n * R_beam) * (1 / n^2);
            Sum_series = Sum_series + term;
        end
        T_base = (q_eff / (pi * lambda * R_beam)) * sqrt(a_temp / (V_eff * R_beam + 1e-6));
        T_surface = T_env + T_base + Sum_series;

        if T_surface > 2800, T_surface = 2800; end % Фізичне обмеження кипіння
    end
end
```

Рисунок 4.3.6 – Програмний код адаптивного термального блоку

На основі виконаної симуляції було отримано графік реальної траєкторії руху лазерної головки у площині ХУ (рис. 4.3.7). Завдяки високій якості налаштування регуляторів положення, сервоприводи Inovance забезпечують строге відпрацювання лінійної інтерполяції. Динамічна похибка позиціонування на прямолінійних ділянках прямує до нуля, а в точці зміни напрямку руху ($X = 0.1$ м, $Y = 0.05$ м) спостерігається згладжування контуру в межах допуску, зумовлене інерційністю масивного порталу осі Х (120 кг) та каретки осі Y (18 кг).

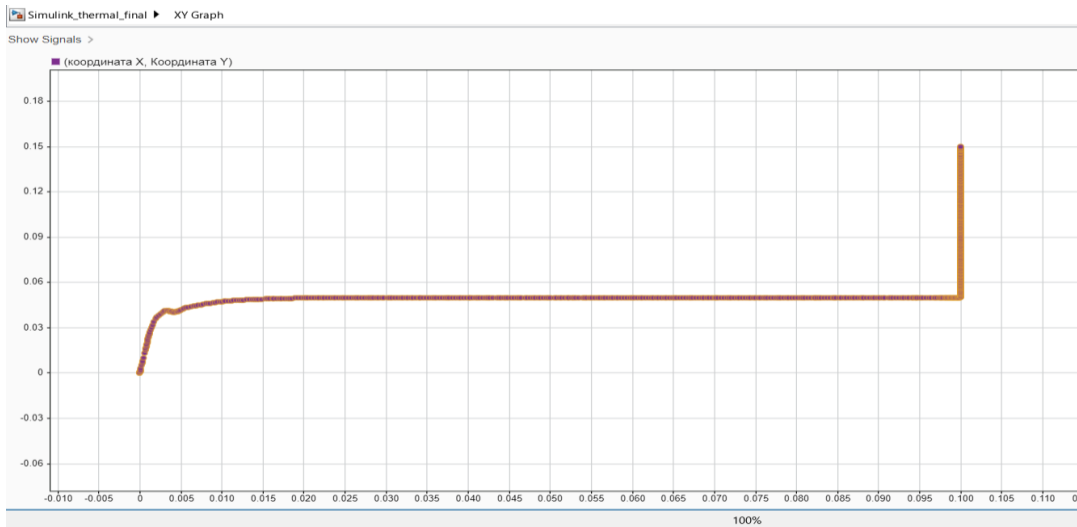


Рисунок 4.3.7 – Траєкторія відпрацювання координатного завдання лазерним різачком у просторі XY

Найбільш показовими з точки зору перевірки працездатності розроблених алгоритмів є суміщені осцилограми зміни потужності лазера та температури поверхні в зоні обробки (рис. 4.3.8).

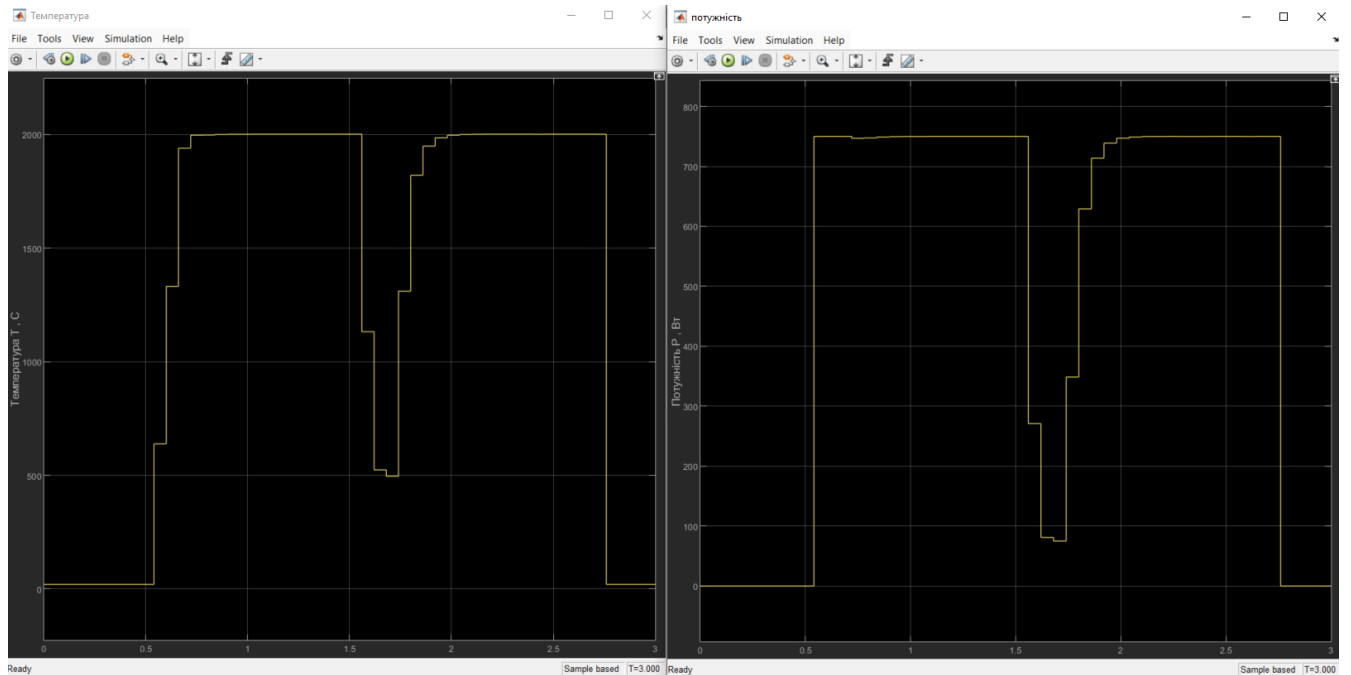


Рисунок 4.3.8 – Осцилограми фактичної потужності випромінювання P_{actual} та температури поверхні металу $T_{surface}$ у процесі різання контуру

Аналіз отриманих часових діаграм дозволяє виділити три характерні фази технологічного процесу:

Стаціонарне різання по осі X ($t = 0.5 \dots 1.5$ с): Приводи стабілізують номінальну швидкість 0.1 м/с. Адаптивний блок встановлює робочу потужність на рівні 750 Вт. При цьому температура у зоні взаємодії променя з металом стабілізується на позначці 2000°C. Цей рівень стабільно перевищує температуру плавлення низьковуглецевої сталі (1538°C), що гарантує формування наскрізного якісного проплавлення та стабільне формування капіляра різку.

Гальмування та проходження гострого кута ($t = 1.5 \dots 1.7$ с): Під час підходу до координати повороту швидкість осі X неминуче знижується до нуля під дією регуляторів швидкості, а вісь Y ще не почала рух. У класичних системах без адаптації це призвело б до теплової акумуляції та випалювання кута деталі. В розробленій АСК адаптивний блок миттєво реагує на падіння фактичної швидкості V_{abs} та автоматично знижує потужність лазера з 750 Вт до мінімального рівня 80 Вт. Як наслідок, температура поверхні синхронно падає з 2000°C до 500°C. Це унеможливує локальний перегрів, захищає гостру кромку від оплавлення та мінімізує зону термічного впливу (ЗТВ).

Стаціонарне різання по осі Y ($t = 1.7 \dots 2.7$ с): Після завершення паузи контур швидкості осі Y розганяє каретку до номінальних 0.1 м/с. Адаптивна система пропорційно нарощує потужність випромінювання назад до 750 Вт, що забезпечує відновлення процесу плавлення та миттєвий вихід температури на стабільний технологічний рівень 2000°C.

Таким чином, результати моделювання повністю підтвердили інженерну життєздатність та високу енергетичну ефективність запропонованого способу адаптивного керування процесом лазерного виготовлення деталей.

Висновки до четвертого розділу

1. У четвертому розділі виконано комплекс завдань розробки, параметричного синтезу та імітаційного дослідження системи автоматичного керування рухом та енергетичними режимами лазерного різака в середовищі MATLAB інструментами Simulink.
2. Побудовано комплексну структурну модель електромеханічної системи лазерного верстату, яка об'єднує в єдиному імітаційному просторі цифрові алгоритми ЧПУ-інтерполяції, дворівневу кінематичну модель нерівноінерційних осей (маса порталу 120 кг, маса каретки 18 кг), контури підпорядкованого регулювання координат та нелінійну термперурну модель взаємодії лазерного випромінювання з речовиною.
3. Здійснено параметричний синтез регуляторів згідно з методологією аналітичного конструювання: внутрішні контури струму та зовнішні контури положення осей оптимізовано на технічний оптимум, а контури швидкості – на симетричний оптимум. На основі реальних паспортних даних сервоприводів Inovance розраховано коефіцієнти П- та І-регуляторів, що дозволило досягти високої динамічної точності.
4. Пряма оцінка якості налаштованих контурів за допомогою імітаційного тестування підтвердила високу якість регулювання. Контури струму продемонстрували час наростання 2.21 ... 2.51 мс при практичній відсутності перерегулювання ($\sigma < 0.05\%$). Контури швидкості забезпечили перерегулювання до безпечного рівня 6.989% при часі перехідного процесу до 19.9 ... 37 мс. Зовнішній контур положення забезпечує стабільний вихід на координату за 0.15 ... 0.2 с з перерегулюванням в межах 11 ... 13%, що є допустимим для високошвидкісних сервосистем.

5. Доведено, що індивідуальний розрахунок коефіцієнтів регуляторів швидкості дозволив повністю нівелювати суттєву різницю в масах (механічних інерціях) між поздовжньою та поперечною осями, забезпечуючи ідентичне контурне перерегулювання швидкості (6.989%), що є критично важливим для уникнення геометричних спотворень при двомірній інтерполяції.

6. На основі аналізу комплексного відпрацювання кутової траєкторії доведено ефективність розробленого контуру адаптивного керування потужністю лазера. Встановлено, що при зниженні контурної швидкості на повороті система автоматично знижує потужність випромінювання з стаціонарних 750 Вт до 80 Вт, завдяки чому температура поверхні вразливих ділянок металу знижується з 2000°C до безпечних 500°C. Це повністю виключає ризик теплової акумуляції, оплавлення гострих кутів та утворення ґрату, підтверджуючи досягнення головної мети дипломного проєкту.

5 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ РОБОТІ АСК ЛАЗЕРНОГО ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ ТА ЗАХОДИ КОНТРОЛЮ І СПОВІЩЕННЯ ПОРУШЕННЯ УМОВ БЕЗПЕЧНОЇ РОБОТИ.

5.1 Особливості роботи АСК та її підсистем, що є джерелами потенціальних загроз та норми, правила і регламентуючі матеріали

Специфічність умов для створення лазерного випромінювання пояснює відмінність властивостей, таких як когерентність, поляризованність та багато фотонну взаємодію. На сьогодні доведено, що саме вони є причиною яка народжує небезпеку для життя людини. У зв'язку з цим розроблено стандарт, який застосовується до оцінки небезпеки при роботі лазерних виробів. Фірми, які створюють прилади і системи, що формують лазерне випромінювання із довжиною хвилі у діапазоні від 180 нм до 1 мм. Не зважаючи на те, що існують лазери, які випромінюють промені із довжиною хвилі меншою за 180 нм (у вакуумі), однак, вони не входять до сфери застосування стандарту. Останнє пояснюється тим, що лазерний промінь при вимірах його довжини хвилі повинен розповсюджуватись у вакуумній камері. Таким чином, потенційно небезпечніше оптичне випромінювання за своєю суттю є випромінювання найменшою хвилею. Системи лазерної різки містять один лазер із своїм окремим джерелом живлення або підключаються групою до одного джерела живлення при роботі у оптичній, електричній або механічній системі. Широкий спектр лазерних виробів використовують у технологічних процесах різки, загартування, зварювання, вимірювальних системах, обробки матеріалів, в системах передачі та обробки та передачі даних інформаційних технологій, тощо. Такі системи застосовуються в виробничих системах, медицині, дослідженнях, бізнесі, освіті, розвагах та у окремих споживчих товарах.

Лазерні вироби, які постачають інші виробники кінцевих виробів для використання в якості запасних частин, також не є предметом розгляду даного ІЕС 60825-1. Однак, якщо лазерна система всередині лазерного виробу може

функціонувати окремо від кінцевого виробу, то на неї поширюються вимоги частини 1 [36]. Означене формує і регламентує положення ІЕС 60825, як регламентуючий документ [36], який в цілому:

- запроваджує систему класифікації лазерів та виробів, що випромінюють у діапазоні довжин хвиль від 180 нм до 1 мм;
- надає засоби оцінки небезпеки та допомагає у визначенні користувачами заходів контролю;
- встановлює вимоги до виробника, щоб надавати інформацію з прийняттям запобіжних заходів;
- визначає сукупність ярликів (рис.5.1.1) та інструкцій і забезпечує належну засторогу (рис.5.1.2) для осіб, які стикаються з небезпекою, пов'язаною із доступом до просторів в яких застосовуються устаткування з виробінням лазерних виробів;
- зменшує можливість травмування шляхом зведення до мінімуму лазерного випромінювання та забезпечує контроль небезпек через поглинальний захист.



Рисунок 5.1.1 – Приклад маркування лазерного виробу класу 4

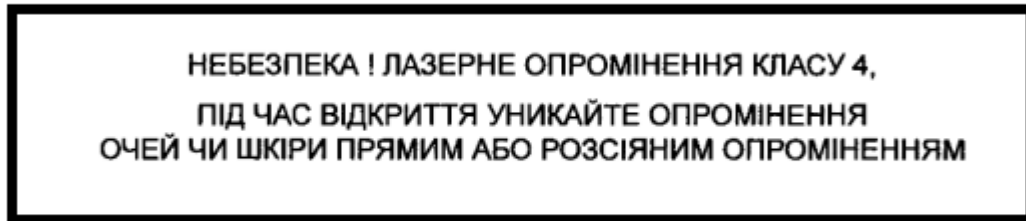


Рисунок 5.1.2 – Приклад маркування панелей під час зняття або зміщення яких можливий доступ до лазерного опромінення

Зважаючи на те, що у системах які розроблено в межах магістерської роботи, використовуються потужні промислові лазери Класу 4 з вихідною потужністю випромінювання 2 кВт та більше, дотримання вимог лише базового стандарту виявляється недостатнім. У процесі обробки металу генерується значна частка як відбитого так і розсіяного випромінювання, а також виникають супутні фактори небезпеки, зокрема іскри, продукти згоряння та процеси, що супроводжують високотемпературні явища. Відповідно, ключовим регламентуючим документом при проектуванні комплексної системи безпеки розроблюваної АСК виступає стандарт ДСТУ EN 60825-4:2019 «Безпека лазерних виробів. Частина 4. Захисні огорожі для лазерів» [37].

Даний нормативний документ встановлює чіткі вимоги до проектування, конструювання та експлуатаційних випробувань захисних огорож (кожухів, кабін), призначенням яких є ізоляція зони взаємодії лазерного променя з матеріалом від зовнішнього виробничого середовища. У межах розроблюваної АСК положення ДСТУ EN 60825-4 визначають такі концептуальні аспекти інженерного проектування:

- вибір матеріалу пасивного захисту (кожуха), який повинен гарантувати стійкість до впливу прямого або дзеркально відбитого лазерного променя заданої потужності без наскрізного проплавлення чи втрати захисних властивостей протягом розрахункового часу;
- оцінка структурної надійності, що передбачає жорсткі критерії випробувань панелей обшивки, конструктивних стиків та оглядових вікон на здатність протистояти пробиванню лазером;
- інтеграція активних систем блокування, що регламентує логіку взаємодії механічних елементів захисту з апаратною частиною АСК;
- захист від супутнього оптичного випромінювання.

Варто зазначити, що хоча первинне випромінювання промислового волоконного лазера (довжина хвилі близько 1064 нм) лежить в інфрачервоному діапазоні, взаємодія такого потужного променя з металом призводить до утворення високотемпературного плазмового факела. Саме ця плазма виступає джерелом інтенсивного вторинного випромінювання у видимому та ультрафіолетовому (УФ) спектрах, що потребує використання спеціалізованих світлофільтрів.

5.2 Формування додаткових структурних підсистем, що забезпечуватимуть контроль і сповіщення порушення умов безпечної роботи

Належність технологічного лазера АСК до найвищого рівня небезпеки повністю унеможлиблює використання відкритого порталу та обґрунтовує необхідність застосування максимального рівня пасивного та активного захисту. Отже постає потреба у розробці концептуальної схеми (рис.5.2.1) багаторівневого активного захисту, що зведе до мінімуму можливість отримати шкоду здоров'ю як оператору верстата чи працівникам технічної підтримки, так і сторонніх живих істот які можуть випадковим чином потрапити то технологічної зони.

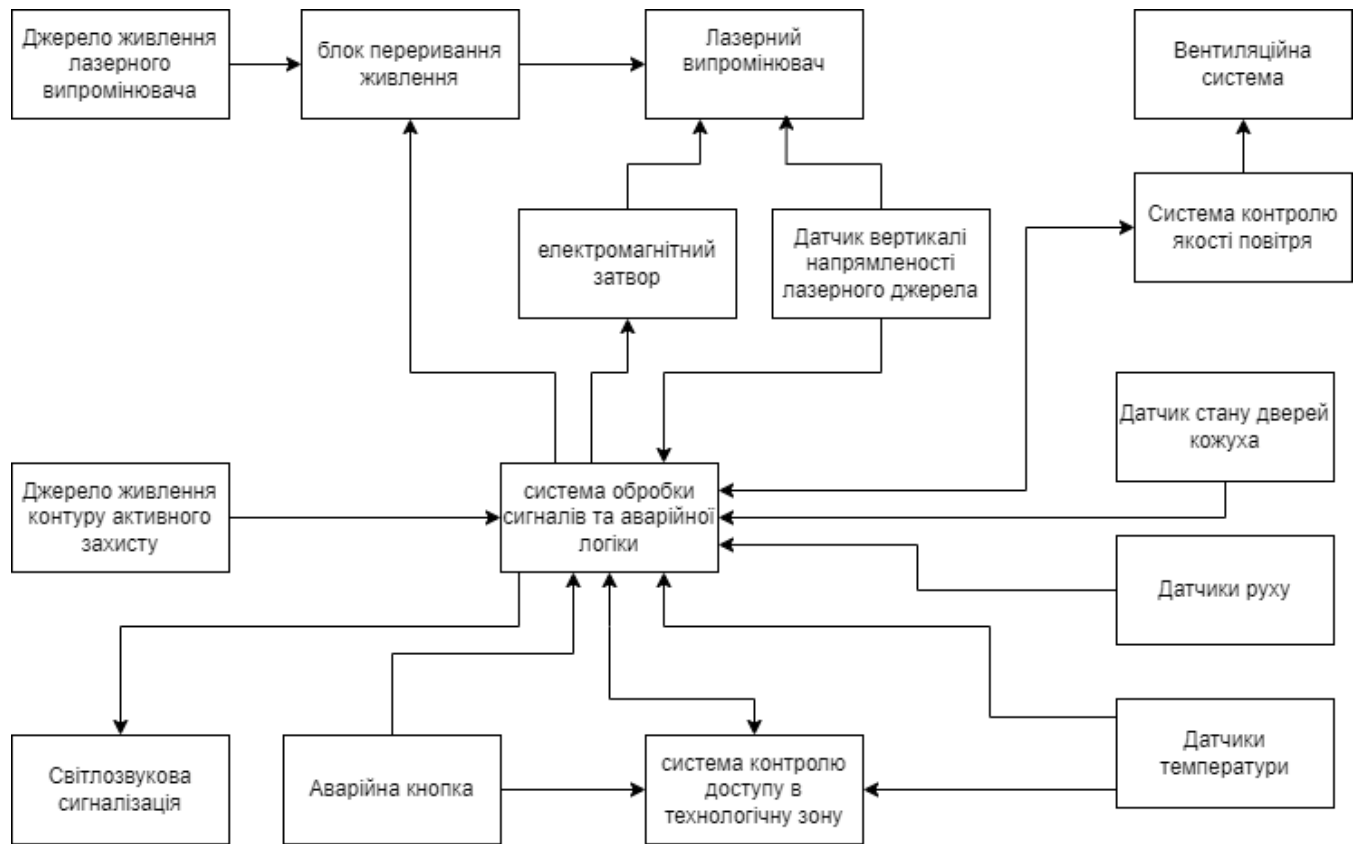


Рисунок 5.2.1 – Концептуальна схема системи активного захисту АСК.

Система обробки сигналів та аварійної логіки. Основа представленої архітектури, функціональне призначення якої полягає у безперервному зборі телеметричної інформації з первинних сенсорів, її логічній обробці та формуванні миттєвих керуючих впливів на виконавчі органи для переведення комплексу в безпечний стан.

Датчики температури Цей блок реалізовано на базі масиву швидкодіючих термоелектричних перетворювачів, розміщених на внутрішніх поверхнях панелей захисного кожуха. Блок здійснює безперервний термомоніторинг стінок kabіни. Локальне перевищення температури понад заданий поріг сигналізує про тривалий вплив розсіяного променя на пасивний бар'єр, наприклад внаслідок відмови координатних осей ЧПК.

Датчик закриття дверей кожуха. Блок побудован на основі безконтактних магнітогерконових кінцевих вимикачів безпеки. Він верифікує фізичний стан сервісних дверей та люків захисної огорожі. Будь-яка спроба відкриття дверей оператором під час виконання керуючої програми призводить до миттєвого розриву інформаційного ланцюга.

Система контролю доступу в технологічну зону. Блокує доступ до технологічної зони під час виконання технологічного процесу, чи у разі невідповідності показників якості повітря або температурним. Передбачає доступ під час виконання технологічного процесу за умови використання спец-пропуску.

Кнопка аварійної зупинки. Являє собою механічний пристрій із фіксацією червоного кольору грибоподібної форми, що встановлюється на пульті оператора та в зонах обслуговування. Функціонує за принципом прямого примусового розриву нормально закритих контактів, що гарантує видачу сигналу зупинки навіть у разі спікання контактної групи під дією струму.

Електромагнітний затвор (шаттер). Це швидкодіючий механічний затвор, інтегрований безпосередньо в оптичний тракт лазерної головки верстата. При знятті напруги живлення з утримувальної електромагнітної котушки, механічна заслінка під дією поворотної пружини перекриває хід променя всередині головки, ізолюючи зону різку від джерела випромінювання.

Блок переривання живлення. Являє собою потужний силовий комутаційний апарат із примусово керуємими контактами. Контакттор здійснює повне фізичне гальванічне відключення блоків накачки лазера від трифазної мережі живлення, що повністю унеможлиблює подальшу генерацію ІЧ-променя на апаратному рівні.

Світлозвукова сигналізація. Блок візуального та акустичного сповіщення працівників поточний статус стану верстата. Вона складається з багаторусної світлодіодної сигнальної колони та п'єзоелектричної сирени. Наприклад, при переході системи в аварійний режим, блок активує імпульсне червоне світло та

високочастотний звуковий сигнал, інформуючи персонал про зупинку верстата через порушення безпеки.

Датчик вертикалі напрямленості. Функціональне призначення даного блока полягає в оптико-механічному контролі просторової орієнтації ріжучої головки відносно координатної площини верстата. Внаслідок механічного удару об деталь або деформації підвісу виникне кутове відхилення осі головки та осі нахилу променя понад допустимий ліміт, що в свою чергу згенерує аварійний сигнал. Оскільки нахил джерела потужністю 2 кВт призводить до непередбачуваної траєкторії відбитих променів та критичного пошкодження бічних стінок лазерного комплексу.

Датчики руху в зоні техпроцесу. Даний блок призначений для об'ємного просторового контролю та реалізації алгоритмів виявлення присутності персоналу. Він будується на основі масиву багатопроменевих інфрачервоних оптичних завіс або промислових високочастотних мікрохвильових радарних датчиків, що сканують внутрішній простір захисної кабіни та зони завантаження матеріалу.

5.3 Обґрунтування та розрахунок інженерно-технічних параметрів пасивного захисту лазерного комплексу

На відміну від підсистем активного захисту, функціонування яких безпосередньо залежить від швидкодії інформаційних сенсорів та виконавчої апаратури АСК, пасивний захист базується на створенні надійних фізичних бар'єрів. Головним елементом пасивного захисту промислового комплексу лазерного розкрою є повністю закритий захисний кожух. Означена конструкція повинна гарантувати повне екранування як первинного інфрачервоного випромінювання волоконного лазера, якщо брати за зразок систему розроблену безпосередньо у **магістерській** роботі, так і супутнього оптичного випромінювання плазмового факелу.

При інженерному проектуванні захисного кожуха АСК розв'язуються дві основні конструктивні задачі:

1. Розрахунок стійкості матеріалу стінок kabіни до наскрізного пропалювання у разі виникнення аварійної ситуації .
2. Визначення необхідної щільності пропускання оглядових вікон для забезпечення безпечного спостереження за ходом технологічного процесу без ризику ураження органів зору оператора.

Теплофізичний розрахунок стійкості захисної огорожі kabіни з урахуванням параметрів фокусувальної лінзи. Матеріал стінок захисного кожуха повинен витримувати пряму дію лазерного променя протягом часу, необхідного для гарантованого спрацьовування апаратних дубльованих контурів активного захисту АСК. Для найгіршого (критичного) сценарію приймається умова аварійного заклинювання координатних осей або повної відмови кінематичних приводів, внаслідок чого технологічний лазерний промінь номінальною потужністю 2 кВт починає безперервно діяти в одну точку на внутрішню стінку kabіни.

Обґрунтування та аналітичний розрахунок радіуса аварійної плями (r_0): У штатному режимі різання лазерний промінь фокусується у мікроскопічну точку на поверхні матеріалу. Проте за межами фокусу (у разі аварійного проходження променя повз координатний стіл) пучок поширюється у просторі kabіни із геометричним конусним розширенням, параметри якого повністю визначаються характеристиками оптичної лінзи технологічної головки.

Згідно з паспортними даними промислової оптичної головки **Raytools BM111**, оптичний тракт формує на фокусувальної лінзі початковий діаметр пучка $D_{пуч} = 0.02$ м , а фокусна відстань самої лінзи становить $f_{фок} = 0,2$ м. Зважаючи на те, що повна

конструктивна відстань від фокусуєчої лінзи головки до бокової захисної стінки kabіни становить $X_{кож} = 0,5$ м, радіус розфокусованої аварійної плями нагріву r_0 обчислюється через геометричне співвідношення подібних оптичних конусів до і після точки фокусу:

$$r_0 = \frac{D_{пуч}}{2} \cdot \frac{X_{кож} - f_{фок}}{f_{фок}}$$

Підставляючи номінальні значення геометричних та оптичних параметрів вузла головки ЧПК, отримуємо:

$$r_0 = \frac{0,02}{2} \cdot \frac{0,5 - 0,2}{0,2} = 0,01 \cdot 1,5 = 0,015 \text{ м} = 15 \text{ мм}$$

Тепловий баланс процесу нагрівання локальної ділянки сталеві стінки товщиною h під дією лазерного пучка радіусом r_0 описується рівнянням теплопровідності. Інженерна залежність для визначення часу досягнення температури плавлення сталі СтЗкп (τ_{melt}) з прямим урахуванням оптичних параметрів лінзи має вигляд:

$$\tau_{melt} = \frac{\pi \cdot c \cdot \rho \cdot h \cdot r_0^2 \cdot (T_{melt} - T_0)}{(1 - R) \cdot P_{las}}$$

де c – питома теплоємність матеріалу огорожі, Дж/(кг·°С);

ρ – щільність сталі, кг/м³;

h – товщина стінки кожуха, м;

T_{melt} – температура плавлення матеріалу, °С;

T_0 – початкова температура навколишнього середовища, °С;

R – коефіцієнт відбиття сталі для ІЧ-випромінювання довжиною хвилі 1064 нм;

P_{las} – номінальна вихідна потужність волоконного лазера, Вт.

Теплофізичні та конструктивні параметри елементів пасивного захисту зведені до таблиці 5.2.1

Таблиця 5.2.1 Теплофізичні та конструктивні параметри елементів пасивного захисту

Показник елементів підсистеми захисту	Символьне позначення	Одиниця виміру	Номінальне значення
Питома теплоємність сталі СтЗкп при 20°С	c	Дж/(кг·°С)	460
Щільність (питома маса) матеріалу kabini	ρ	кг/м ³	7850
Температура початку плавлення сталі СтЗкп	T_{melt}	°С	1500
Початкова температура конструкцій верстата	T_0	°С	20
Коефіцієнт оптичного відбиття вуглецевої сталі	R	–	0,65
Задана товщина металевого листа обшивки	h	м	0,0025

Проведемо чисельний розрахунок критичного часу до початку проплавлення сталеві огорожі при товщині листа кабіни $h = 2,5$ мм:

$$\begin{aligned}\tau_{melt} &= \frac{3,1416 \cdot 460 \cdot 7850 \cdot 0,0025 \cdot 0,015^2 \cdot (1500 - 20)}{(1 - 0,65) \cdot 2000} \\ &= \frac{28362,8 \cdot 0,000225 \cdot 1480}{700} = \frac{9444,8}{700} \approx 13,49 \text{ с}\end{aligned}$$

Отримане значення $\tau_{melt} = 13,49$ с значно перевищує закладений час апаратної реакції підсистеми активного захисту АСК. Означена закономірність доводить, що конструктивні параметри пасивного бар'єра кожуха разом із характеристиками фокусувальної лінзи забезпечують повну надійність комплексу.

Висновки до п'ятого розділу

1. Розроблена АСК лазерного виготовлення деталей із листового матеріалу за технологічним процесом є носієм потенціальної небезпеки, функціонування якої підпадає під дію ДСТУ EN 60825-1:2019, яке визначає норми, правила і регламентуючи матеріали.
2. Введення візуальних засобів інформаційного статичного оповіщення разом із засобами звукового, світлового динамічного оповіщення утворює систему попередження про потенціальну небезпеку.
3. Розроблена сукупність додаткових структурних підсистем, що забезпечуватимуть контроль і сповіщення порушення умов безпечної роботи дозволяє реалізовувати комплекс заходів, які утворюють систему блокування, що блокує джерело живлення лазера та унеможливорює лазерне випромінювання при переході системи в аварійний режим, а також активує системи динамічного оповіщення. Комплексне імпульсне червоне світло та високочастотний звуковий сигнал, інформують персонал про зупинку верстата через порушення безпеки.
4. Комплексне застосування сукупності додаткових структурних підсистем, що забезпечуватимуть контроль і сповіщення порушення умов безпечної роботи разом із сукупністю числових значень інженерно-технічних параметрів пасивного захисту лазерного комплексу, що обґрунтованно та розраховано забезпечує АСК лазерного виготовлення деталей із листового матеріалу засобами, унеможливорюючими пряму дію лазерного опромінення персоналу.

ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ В ЦІЛОМУ

У кваліфікаційній роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання підвищення ефективності АСК лазерним виготовленням деталей із листового матеріалу шляхом розробки комплексних кіберфізичних моделей, синтезу алгоритмів просторового переміщення та адаптивного регулювання енергетичних параметрів обробки. За результатами проведених теоретичних, аналітичних та імітаційних досліджень отримано такі висновки:

1. На основі аналізу сучасних технологій термічного розділення матеріалів та тенденцій світового патентування встановлено, що ключовим недоліком існуючих систем є жорстка детермінованість керуючих програм. За умови використання промислових волоконних лазерів високої потужності це призводить до температурних деформацій на складних ділянках контуру. Доведено об'єктивну необхідність переходу до інтелектуальних адаптивних систем керування, здатних синхронізувати кінематичні параметри виконавчих механізмів з енергетичною потужністю випромінювання безпосередньо в режимі реального часу. Та перехід до безлюдних методів виробництва.

2. Розроблено концептуальну модульну архітектуру АСК, яка декомпозована на взаємопов'язані підсистеми ІТ-керування, логістики, роботизованого сортування та лазерного різання. Синтезовано математичну кінематичну модель параметрів руху різачка з використанням розкладання траєкторії в ряд Тейлора, що дозволило встановити строгий аналітичний зв'язок між просторовими координатами, векторами контурної швидкості та прискорення. Спираючись на цей апарат, побудовано математичну модель режимних параметрів, яка динамічно пов'язує швидкість електроприводів із необхідною силою струму та тепловою потужністю лазера, формуючи базис для запобігання тепловій акумуляції.

3. Поставлено та аналітично розв'язано тривимірну крайову задачу нестационарної теплопровідності із рухомим розподіленим джерелом тепла у формі нормального

гаусівського профілю. Шляхом сумісного застосування апарату інтегральних перетворень Фур'є та часових згорток Дюамеля отримано точне математичне представлення об'ємного температурного поля. Визначено, що висока обчислювальна складність фундаментального розв'язку (понад 17 тисяч ітерацій на інтеграційний крок) унеможлиблює його імплементацію в контури Hard Real-Time промислових ПЛК. Для подолання цього бар'єра розроблено алгоритмічно редуковану квазістаціонарну теплофізичну модель, що дозволило знизити час генерації температурного зрізу до 0,08 мс, перетворивши її на повноцінне ядро обчислення зворотного зв'язку АСК.

4. Проведено синтез та імітаційне дослідження розробленої керуючої системи в середовищі MATLAB/Simulink. Відповідно до методології підпорядкованого регулювання координат, розраховано параметри ПІ- та ПІІ-регуляторів за критеріями технічного та симетричного оптимумів для електроприводів із суттєвою різницею зведених механічних інерцій. Доведено, що індивідуальне параметричне налаштування контурів повністю нівелює механічну асиметрію осей, забезпечуючи ідентичне перерегулювання контурної швидкості на рівні 6,989% та усуваючи ризики просторових спотворень під час двомірної інтерполяції.

5. Комплексне моделювання відпрацювання кутової траєкторії підтвердило функціональну ефективність синтезованого адаптивного контуру термодинаміки. Встановлено, що в моменти інерційного зниження контурної швидкості на поворотах, система без втручання оператора автоматично зменшує ефективну потужність випромінювання зі стаціонарних 750 Вт до 80 Вт. Завдяки цьому локальна температура в зоні різку контролювано знижується з 2000 °С до 500 °С. Цей механізм повністю унеможлиблює теплову деструкцію, оплавлення гострих кромки та утворення ґрату, чим підтверджується досягнення головної мети магістерської роботи.

6. Оцінено умови безпечної експлуатації проектного лазерного комплексу відповідно до жорстких регламентуючих вимог ДСТУ EN 60825-1 та ДСТУ EN 60825-4. Розроблено комплексну архітектуру багаторівневого активного та пасивного захисту, яка інтегрує підсистеми безперервного термомоніторингу стінок захисного кожуха, електромеханічного блокування доступу та оптичної фільтрації плазмового спалаху, що гарантує надійну нейтралізацію небезпечних факторів високоенергетичного випромінювання класу 4 в умовах безлюдного виробництва.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Zur Quantentheorie der Strahlung. Einstein. Physik.Zeitschr. XVIII, 1917..
2. Maiman T. H. Stimulated optical radiation in ruby. *Nature*. 1960. Vol. 187, No. 4736. P. 493–494.
3. A B J Sullivan and P T Houldcroft: 'Gas-jet laser cutting', *British Welding Journal*, August 1967, pp.443.
4. Ray Y. Zhong a , Xun Xua, *, Eberhard Klotz b , Stephen T. Newman. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering* 3 (2017) 616–630. DOI:[10.1016/J.ENG.2017.05.015](https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015)
5. Daniel Krajcarz. Comparison Metal Water Jet Cutting with Laser and Plasma Cutting. December 2014. *Procedia Engineering* 69:838-843. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.03.061. License CC BY-NC-ND 3.0
6. S. Spadło, D. Krajcarz*, P. Młynarczyk. A comparison of laser cutting and water-jet cutting. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* Volume 66 • Issue 2 • October 2014
7. Silvio Genna 1,* , Erica Menna 1 1 , Gianluca Rubino 2 and Vincenzo Tagliaferri. Experimental Investigation of Industrial Laser Cutting: The Effect of the Material Selection and the Process Parameters on the Kerf Quality. *Appl. Sci.* 2020, 10, 4956. doi:10.3390/app10144956
8. TRUMPF Continuous wave lasers. URL: <https://www.apricon.fi/wp-content/uploads/trumpf-cw-lasers-brochure-en.pdf> (дата звернення: 24.04.2026).
9. Eckart Uhlmann,a,b, Mitchel Poltea,b , Martin Heper. Open-Source Framework for Automated Milling Experiments: G-Code Adaptation and NC Data Acquisition with Siemens Industrial Edge. 19th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. *Procedia CIRP* 00 (2025) 000–000

- 10.Методи планування траєкторії лазерного різання. Pat. CN 108857092A CN. Фен Юсінь, Чень Янь, Гао Юньфен Int. Cl. B23K 26/08.. Publ. 13.01.2020. (*Це з твого файлу про AI Path Planning*).
- 11.Automated vacuum gripper and method for securely gripping components. Pat. US12134527B2 USA. Applicant: TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH. Publ. 05.11.2024.
- 12.Pushing out a plate-shaped workpiece part that has been cut free. Pat. US11583952B2 USA. Applicant: TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH. Publ. 21.02.2023.
- 13.Method for monitoring and controlling a laser cutting process. Pat. US10888954B2 USA. Applicant: TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH. Publ. 12.01.2021.
- 14.Object path planning in a sorting facility. Pub.no. US2025/0136387A1 European Patent Office. Applicant: AMP Robotics Corporation. Publ. 01.03.2025.
- 15.Посібник з вибору правильних параметрів лазера для вашого волоконного лазерного різання. URL: <https://uk.baisonlaser.com/blog/picking-the-right-laser-parameters/> (дата звернення: 27.02.2026)
- 16.Mastering Tube Laser Cutting Tolerance: The Ultimate Guide for Precision Fabrication. URL: <https://yihailasers.com/mastering-tube-laser-cutting-tolerance/> (дата звернення: 07.06.2026)
- 17.What Are the Standard Tolerances for Laser Cutting Precision? URL: <https://yihailasers.com/what-are-the-standard-tolerances-for-laser-cutting-precision/> (дата звернення: 07.06.2026)
- 18.Лазерне різання металу. URL: <https://ua.losshield.com/news/the-basic-parameters-and-basic-knowledge-of-la-66712274.html> (дата звернення: 27.10.2025).
- 19.Лазерне обладнання. URL:<https://bot-ua.com/shop/dlya-metalu/ironbot/> (дата звернення: 27.10.2025).

20. Лазерна різка металу Станками TRUMPF. URL: <https://m.youtube.com/watch?v=OFxRVtA9j1s> (дата звернення: 27.10.2025).
21. OUR PRODACT | XYZ CNC ROUTERS & AUTMAED SYSTM https://www.axyz.com/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Llookalike&utm_term=&utm_source=0&utm_campaignid=22358547741&gclid=Cj0KCQjwv-LOBhCdARIsAM5hdKf_oPOKFzQWtlgkP6GPaKsEpJkg2NL6111OYA0w1KLRH9V7_nKpYBUaAiTIEALw_wcB (дата звернення: 27.10.2025).
22. Муляр, Ю. І. Автоматизація виробництва в машинобудуванні. Частина I: навчальний посібник/ Ю. І. Муляр, С. В. Репінський. – Вінниця: ВНТУ, 2019.– 99 с.
23. Струтинський В.Б., Гуржій А.М.: Монографія. – Житомир: ПП «Рута», 2023.– 524 с.
24. Friedrich Bachmann. High Power Laser Sources for Industry and their Applications. ROFIN-SINAR Laser GmbH, Berzeliusstr. 83, D-22113 Hamburg. Germany
25. Alexander Trunov Development of an artificial intelligence tool and sensing in informatization systems of mobile robots. SMARTINDUSTRY-2024: Int. Conf. on Smart Automation & Robotics for Future Industry, April 18 - 20, 2024, Lviv, Ukraine. pp.15-31 .
26. Alexander Trunov. Formation of the method of description and control of the relative position of the gripper phalanges for anthropomorphic robot SMARTINDUSTRY-2024: Int. Conf. on Smart Automation & Robotics for Future Industry, April 18 - 20, 2024, Lviv, Ukraine pp.100-110.
27. Олександр Трунов, Володимир Герасимюк. Автоматизовані системи лазерного виготовлення деталей із листового матеріалу. Матеріали науково-практичних конференцій Чорноморського національного університету імені Петра Могили/ Materials of the Scientific and Practical conference of Petro Mohyla Black Sea National University. Серії: «дизайн», «комп'ютерні технології» series:

- «design», «computer technologies» № 1(1) 2026. - с 155-160. issn 3083-6417 (online). issn 3083-6409 (print) doi 10.34132/mspc2025.01.06.33.
- 28.Посібник з вибору правильних параметрів лазера для вашого волоконного лазерного різання URL: <https://uk.baisonlaser.com/blog/picking-the-right-laser-parameters/> (дата звернення: 27.03.2026).
- 29.Каретка (HIWIN CATALOGUE LINEAR GUIDEWAYS). URL: https://www.hiwin.de/medias/sys_master/hiwinDocumentMedia/h0d/h5a/14755945709598/HIWIN%20CATALOGUE%20LINEAR%20GUIDEWAYS/HIWIN-CATALOGUE-LINEAR-GUIDEWAYS.PDF?attachment=true (дата звернення: 05.06.2026).
- 30.Рейка (HIWIN Series HGR-R). URL: <https://www.hiwin.de/en/Products/Linear-guideways/Profile-rails/Ball-guides/Series-HGR/HGR-R/HGR25R4000H/p/5-001924> (дата звернення: 11.06.2026).
- 31.Серводвигун (MS1 Series Motor). URL: https://www.inovance.eu/fileadmin/downloads/Brochures/EN/MS1_Series_Motor_Br_EN_Spreads_Web_V0.0.pdf (дата звернення: 02.06.2026).
- 32.Редуктор (Pinion Design Tool). URL: https://www.apexdyna.com/WebSites/Pinion_Design_Tool.aspx (дата звернення: 08.06.2026).
- 33.Відеоролик YouTube: TRUMPF Laser cutting: TruLaser Center 7030. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=rLqvj9Z3Zbc> (дата звернення: 03.06.2026).
- 34.Будова лазера. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Будова_лазера (дата звернення: 09.06.2026).
- 35.Glossary: Fiber laser. *FiberLabs*. URL: <https://www.fiberlabs.com/glossary/fiber-laser/> (дата звернення: 12.06.2026).

- 36.ДСТУ EN 60825-1:2019. Безпека лазерних виробів. Частина 1. Класифікація обладнання та вимоги (EN 60825-1:2014, IDT; IEC 60825-1:2014, IDT). [Чинний від 2021-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
- 37.ДСТУ EN 60825-4:2014. Безпечність лазерних виробів. Частина 4. Лазерні захисні пристрої (EN 60825-4:2006, IDT). [Чинний від 2016-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.