

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)  
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та  
робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

перший (бакалаврський)  
(рівень вищої освіти)  
Розробка електронної складової системи автоматизації для лазерного  
граверу на основі CO<sub>2</sub>  
(тема)

Виконав студент 3 (прискороного) курсу,  
групи АКТАКТАКІТу-21-1  
Фарига Руслан Миколайович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальності 151 Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва напрямку)

Тип програми Освітньо-професійна  
Освітня програма Автоматизація та  
комп'ютерно- інтегровані технології  
(назва)

Керівник ас. каф. КІТАР Нікітін Д.О.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАР

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Невлюдов І. Ш.  
(прізвище, ініціали)

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

19.06.2024



Фариґа Р.М.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ  
Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський)  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна  
Освітня програма \_\_\_\_\_ Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав.кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові \_\_\_\_\_ Фарига Руслану Миколайовичу  
(шифр і назва)

1. Тема роботи: \_\_\_\_\_ Розробка електронної складової системи автоматизації  
для лазерного граверу на основі CO<sub>2</sub>

Затверджена наказом університету від \_\_\_\_\_ 20.05.2024 №477Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 19.06.2024р.

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Розмір робочої області 1220×610×300 мм;

3.2 Матеріали для обробки листового деревина та термопласти; 3.3 Можливість працювати з векторними та растровими зображеннями.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз технології лазерної обробки матеріалів; 4.3 Аналіз типів лазерів; 4.4 Огляд лазерних трубок; 4.5 Розробка блок-схема верстата; 4.6 Вибір основних вузлів електричної частини лазерного ЧПУ верстата; 4.7 Визначення параметрів рідинної системи охолодження; 4.8 Розрахунок радіатора; 4.9 Розрахунок водяного насоса; 4.10 Розробка програмної частини верстату; 4.11 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(\*.ppt) формату А4 –15 сторінок.

6. Консультанти розділів роботи

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

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технології лазерної обробки матеріалів	08.04.2024-09.05.2024	виконано
2	Аналіз типів лазерів	09.04.2024-12.04.2024	виконано
3	Огляд лазерних трубок	12.04.2024-17.04.2024	виконано
4	Розробка блок-схема верстата	19.04.2024-22.04.2024	виконано
5	Вибір основних вузлів електричної частини лазерного ЧПУ верстата	22.04.2024-27.04.2024	виконано
6	Визначення параметрів рідинної системи охолодження	07.05.2024-14.05.2024	виконано
7	Розрахунок радіатора	16.05.2024-22.05.2024	виконано
8	Розрахунок водяного насосу	22.05.2024-28.05.2024	виконано
9	Розробка програмної частини верстату	30.05.2024-12.06.2024	виконано

Дата видачі завдання 8 квітня 2024р.

Студент Фарига Р.М.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи Нікітін Д.О.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 69 с., 8 табл., 26 рис., 11 джерел.

ЛАЗЕРНА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ, ТИПИ ЛАЗЕРІВ, ЛАЗЕРНА ТРУБКА, ЧПУ ВЕРСТАТ, БЛОК-СХЕМА ВЕРСТАТА, ПАРАМЕТРИ РІДИННОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ, СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ, РАДІАТОР, ВОДЯНИЙ НАСОС.

Мета роботи – розробка електронної складової системи автоматизації для лазерного граверу на основі CO<sub>2</sub>.

Об'єкт роботи – технологія лазерної обробки матеріалів.

Предмет роботи – електронна частина лазерного ЧПУ верстата.

В даній кваліфікаційній роботі проведено аналіз технології лазерної обробки матеріалів та типів лазерів. Проведено огляд лазерних трубок.

Розроблено блок-схему верстата, вибрано основні вузли електричної частини лазерного ЧПУ верстата.

Проведено визначення параметрів рідинної системи охолодження, розрахунок радіатора та водяного насосу. Розроблено програмну частину верстату.

## ABSTRACT

Explanatory note: 68 pages, 8 table, 26 figures, 11 sources.

LASER PROCESSING OF MATERIALS, TYPES OF LASERS, LASER TUBE, CNC MACHINE, MACHINE BLOCK DIAGRAM, LIQUID COOLING SYSTEM PARAMETERS, COOLING SYSTEM, RADIATOR, WATER PUMP.

The purpose of the work is to develop a 3D model of a mechanical laser CNC machine with a low manufacturing cost.

The object of the work is the technology of laser processing of materials.

The subject of the work is the mechanical part of the laser CNC machine.

In this qualification work, an analysis of the technology of laser processing of materials and types of lasers was carried out. An inspection of the laser tubes was carried out.

The block diagram of the machine tool was developed, the main nodes of the electrical part of the laser CNC machine tool were selected.

The parameters of the liquid cooling system were determined, the radiator and water pump were calculated. The software part of the machine has been developed.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз технічного завдання.....	11
1.1 Аналіз технології лазерної обробки матеріалів .....	11
1.2 Аналіз типів лазерів .....	16
1.2.1 Твердотільні кристалічні лазери .....	17
1.2.2 Твердотільні напівпровідникові лазери.....	19
1.2.3 Газові лазери.....	21
1.3 Огляд лазерних трубок .....	23
1.4 Результати аналізу технічного завдання.....	27
2 Розробка електричної частини лазерного чпу верстата .....	28
2.1 Розробка блок-схема верстата .....	28
2.2 Вибір основних вузлів електричної частини лазерного ЧПУ верстата.	30
3 Розрахунок системи охолодження лазерної трубки .....	42
3.1 Визначення параметрів рідинної системи охолодження .....	42
3.2 Розрахунок радіатора.....	42
3.3 Розрахунок водяного насосу .....	45
4 Розробка програмної частини лазерного верстата.....	54
4.1 Розробка програми .....	54
4.2 Охорона праці.....	59
Висновки .....	65
Перелік джерел посилання .....	66
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	68

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВДТ – відеодисплейний термінал;

ЕМП – електромагнітне поле;

ТДР – тимчасовий допустимий рівень;

LASER – light amplification by stimulated emission of radiation.

## ВСТУП

Лазерне опромінення використовується у багатьох сферах людської діяльності: машинобудуванні, навігації, медицині, військовій справі. Приладобудування не є винятком, технологія лазерного різання, маркування, гравіювання, сварки набувають все більшої популярності. Ці технології мають безліч переваг перед класичними методами формоутворення такими як фрезерування, штамповка і перед більш сучасними технологіями: гідроабразивна та плазмова різка.

До цих переваг слід віднести простоту автоматизації верстата, відсутність вимог до високої жорсткості конструкції верстата, велика швидкість обробки, мала товщина різку, відсутність безпосереднього контакту інструменту і заготовки, можливість роботи із різними матеріалами включаючи крихкі, тверді, еластичні ті інші. Безумовно тип матеріалу, що обробляється залежить від типу лазерного модулю верстата.

Досить часто при створенні дослідних зразків приладів або лабораторних макетів на нашій кафедрі виникає необхідність у виготовленні конструкційних елементів, наприклад корпусів, шасі мобільних роботів із листових пластиків, композитів або фанери. Саме для виготовлення деталей з наведених матеріалів найчастіше використовуються ЧПУ верстати з CO<sub>2</sub> лазерними трубками. Вони мають невисоку собівартість, велику продуктивність та точність обробки.

Таким чином тема бакалаврської кваліфікаційної роботи «Розробка електронної складової системи автоматизації для лазерного граверу на основі CO<sub>2</sub>» є актуальною.

Об'єктом роботи є технологія лазерної обробки матеріалів.

Предметом роботи є електронна частина лазерного ЧПУ верстата.

Метою роботи є розробка електронної складової ЧПУ верстата з невисокою вартістю виготовлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз технології лазерної обробки матеріалів;
- провести аналіз типів лазерів;
- провести огляд лазерних трубок;
- розробити блок-схема верстата;
- провести вибір основних вузлів електричної частини лазерного ЧПУ верстата;
- провести визначення параметрів рідинної системи охолодження;
- провести розрахунок радіатора;
- провести розрахунок водяного насосу;
- провести розробка програмної частини лазерного верстата.

Дана кваліфікаційна робота була виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1], а також, керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [2] та методичними вказівками [3].

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

## 1.1 Аналіз технології лазерної обробки матеріалів

Одним із основних питань при розробці електронної частини лазерного ЧПУ верстата є вибір лазерного модулю, так як різні лазери вимагають різне супутнє обладнання для їх роботи. Таким чином спочатку необхідно визначити яким саме чином працює лазер, які їх види існують і що саме необхідно для їх бездефектної роботи.

Лазером (LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) називається пристрій, що генерує когерентні електромагнітні хвилі за рахунок вимушеного випромінювання світла активним середовищем, що знаходиться в резонаторі. Перший лазер було розроблено у 1960 році американським фізиком Теодором Харолдом Майманом [4].

В основі роботи лазерів лежать фундаментальні процеси, що відбуваються при взаємодії електромагнітних хвиль із речовиною, а саме процеси спонтанного та вимушеного (індукованого) випромінювання та процес поглинання.

Внутрішня енергія частинок може набувати певних дискретних значень, що відповідають енергетичним станам або енергетичним рівням. Найнижчий енергетичний рівень із найменшою енергією частки – основний, інші енергетичні рівні із вищою енергією частки – збуджені. Перехід частинки з рівня до рівня можуть бути випромінювальними або поглинальними.

Перехід частинок (молекул, атомів, іонів та атомних ядер) з вищого енергетичного рівня  $E_2$  на рівень  $E_1$  може відбуватися мимовільно і зветься спонтанним випромінюванням. Такий перехід супроводжується випромінюванням фотонів внаслідок прискорення таким чином:

$$E = h\nu, \quad (1.1)$$

де  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·сек – постійна Планка;

$\nu$  – частота випромінювання.

Отже, спонтанне випромінювання супроводжується виділенням кванта енергії:

$$h = E_2 - E_1. \quad (1.2)$$

Частинки, що перебувають у збудженому енергетичному стані, можуть перейти на нижчий (зазвичай нормальний, основний) енергетичний стан під дією зовнішнього електромагнітного поля. Електромагнітне поле як би «зміщує» атом із збудженого енергетичного рівня вниз, на основний або менш збуджений. Таке випромінювання під впливом електромагнітної хвилі зветься індукованим (вимушеним) випромінюванням. Явище вимушеного випромінювання зводиться до збільшення інтенсивності електромагнітної хвилі, що проходить скрізь речовину.

Головна властивість індукованого випромінювання: частота, поляризація, напрямок поширення кванта енергії вимушеного випромінювання збігаються з відповідними характеристиками зовнішнього поля, тобто вимушене випромінювання когерентно із світлом, що його викликало.

Під впливом зовнішнього електромагнітного поля частинка може переходити з нижнього на більш високий рівень, поглинувши квант енергії. Такий перехід має назву резонансного поглинання.

Поглинання фотонів зменшує інтенсивність світла через середовище. На рисунку 1.1 схематично представлені два конкуруючих один з одним процеси: поглинання та вимушеного випромінювання. Перший процес

зменшує кількість фотонів, що проходять через середовище. Другий процес збільшує кількість фотонів, що проходять через середовище.

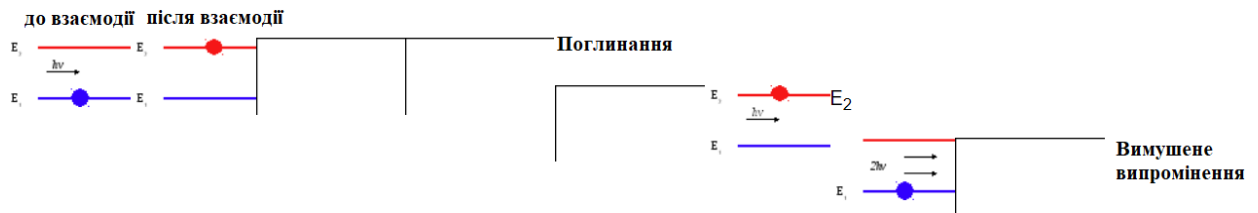


Рисунок 1.1 – Процеси поглинання та вимушеного випромінювання фотонів

Середовище називається активним або середовищем з інверсною населеністю коли процеси вимушеного випромінювання переважають над процесами поглинання світла. У такому середовищі зростання інтенсивності  $I$  світла зі збільшенням товщини активного середовища відбувається швидше за рахунок лавиноподібного наростання числа фотонів.

Для отримання активного середовища необхідно створити в середовищі незвичайний, нерівноважний стан (інверсний стан): кількість атомів (молекул, іонів) на збудженому рівні має бути більшою, ніж на нижньому рівні. Такий розподіл атомів за рівнями є "перевернутим", "інверсним" порівняно із звичайним. Зазвичай верхніх рівнях атомів менше, ніж нижніх.

Процес переведення середовища в інверсний стан називається накачуванням посилюючого середовища. Є кілька способів, за допомогою яких можна реалізувати цей процес на практиці, наприклад, за допомогою деяких видів ламп, що дають досить інтенсивну світлову хвилю, або за допомогою електричного розряду в активному середовищі.

Накачування здійснюється за трьох- або чотирьохрівневою схемою лазера. Наприклад, типовим і найбільш використовуваним лазером на нейтральних атомах є гелій-неоновий лазер, в якому посилюючою середовищем служить високочастотного плазма газового розряду, отримана в суміші гелію з неонам.

Під дією електричного розряду частина атомів лазерного середовища іонізується і утворюється плазма, що містить електрони з великою кінетичною енергією, які, стикаючись з іншими атомами, переводять їх з основного стану  $E_1$  на збуджений рівень  $E_3$ , що довго живе. При зіткненнях збуджених атомів з незбудженими атомами останні також порушуються і переходять на один із верхніх рівнів. Перехід атомів з цього рівня на один з нижніх рівнів  $E_2$  супроводжується лазерним випромінюванням.

Ефект посилення світла в лазерах збільшується за рахунок багаторазового проходження світла, що посилюється, через один і той же шар активного середовища. Це може бути досягнуто, якщо шар активного середовища (кювета з газом або кристал) помістити між двома дзеркалами, встановленими паралельно один одному. Одне дзеркало – непрозоре з високим коефіцієнтом відбиття (близько 100 %) та друге напівпрозоре дзеркало, через яке проходить випромінювання (рис. 1.2).

Щоб змусити активне середовище випромінювати, треба перевести якомога більше атомів у збуджений стан, для цього можна використовувати газовий розряд. Як це робиться в газорозрядних трубках, які використовуються для реклами. Отже, фотон А, який рухається паралельно до осі кювети або кристала, народжує лавину фотонів, що летять у тому ж напрямку [5].

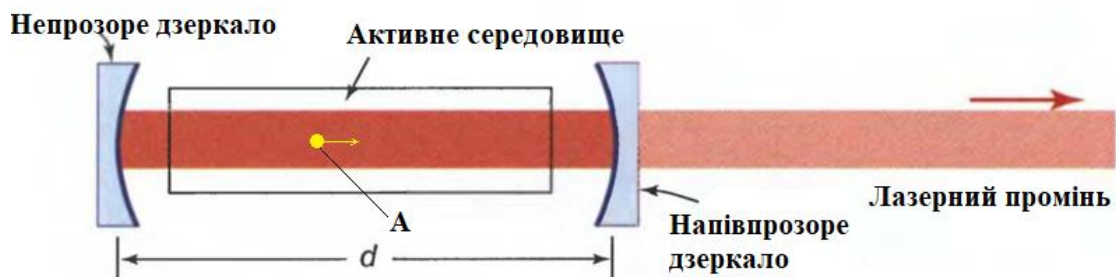


Рисунок 1.2 – принцип роботи лазера

Частина цієї лавини проходить через напівпрозоре дзеркало назовні, а частина відбивається і наростає в активному середовищі. Коли лавина

фотонів дійде до непрозорого дзеркала, вона частково поглинається і після відбивається від дзеркала.

Посилений потік фотонів рухатиметься так само, як і початковий «затравочний» фотон. Потік фотонів, багаторазово посилений і з генератора крізь напівпрозоре дзеркало, створює пучок променів світла величезної інтенсивності з малим розбіжністю по кутах, тобто. гостронаправлений. Таким чином, дзеркала здійснюють позитивний зворотний зв'язок: випромінювання одного атома збільшує ймовірність випромінювання інших.

Лазер, як і будь-який генератор, складається з наступних основних елементів: джерела енергії (І), регулятора (Р), коливальної системи (КС) та зворотного зв'язку (ЗЗ), який з'єднує коливальну систему та регулятор (рис.1.3). Джерело енергії постачає її у вигляді зручному для переробки її у лазерне випромінювання. Як коливальний пристрій служать електронні переходи між енергетичними рівнями активного середовища. Регулятором є система збудження енергетичних рівнів. Позитивний зворотний зв'язок забезпечує підкачування енергії в коливальну систему потрібної фази коливань.

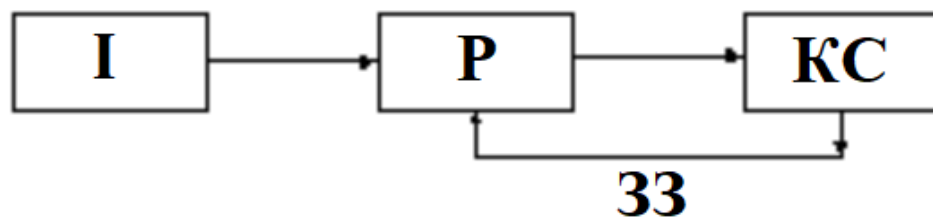


Рисунок 1.3 – Принцип роботи лазеру

Основними параметрами лазерного випромінювання є наступні:

- мала кутова розбіжність дозволяє фокусувати випромінювання лінзами та увігнутими дзеркалами аж до 1 мкм та створювати значні щільності потужності на опромінених ділянках;

- монохроматичність характеризує довжину хвилі  $\lambda$  і спектральну ширину випромінювання  $\Delta\lambda$ . Її мірою є відношення  $\Delta\lambda$  до середнього

значення  $\lambda$ . Для лазерів монохроматичність випромінювання висока і становить близько  $10^{-5}$ ;

– когерентність та поляризованість – ці характеристики важливі у діагностичних дослідженнях. Лазерне випромінювання має високу когерентність за рахунок явища вимушеного випромінювання. Випромінювання, створюване окремими точками активного середовища, має зрушення фази, що відповідають поширенню однієї плоскої електромагнітної хвилі, так що з лазера виходить електромагнітна хвиля з постійною фазою та амплітудою;

– висока інтенсивність лазерного випромінювання дозволяє сконцентрувати у малому обсязі значну енергію, яка дозволяє виконувати операції різання та маркування різноманітних матеріалів в залежності від потужності лазера, його довжини хвилі та режиму роботи (імпульсний, постійний).

## 1.2 Аналіз типів лазерів

Для подальшої розробки електричної та програмної частини лазерного ЧПУ верстата необхідно обрати тип лазерного модулю. Лазерну генерація може бути досягнуто в широкому спектрі речовин:

- тверде тіло (кристали, скло, волокна, порошки);
- гази (атомарні, молекулярні, з ексимерів);
- плазма (далекій УФ та рентгенівський діапазон);
- рідини (розчини органічних барвників).

Розміри лазерів варіюються від нанометрів до сотні метрів. Плазмові та рідинні лазери майже не використовуються у виробництві тому їх аналіз вирішено не проводити. Необхідно розглянути основні типи лазерних модулів, що використовуються у сучасних верстатів. Надалі твердотілі лазери умовно буде поділено на кристалічні та напівпровідникові. Безумовно

напівпровідникові лазери є також напівпровідниковими, але вони мають інший принцип роботи [6].

### 1.2.1 Твердотільні кристалічні лазери

Матеріали для твердотільних лазерів використовуються наступні: рубін, олександрит, алюмоітрієвий гранат, легований іонами неодиму, скло, леговане неодимом та ін.). Для отримання ефекту лазерної генерації активне середовище на основі згаданих матеріалів необхідно просто помістити в оптичний резонатор. Як основа для твердотільних лазерів використовуються в основному близько десятка кристалічних сполук: оксиди, гранати, фториди, ванати, з яких найпоширенішими є: сапфір ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), алюмоітрієвий гранат ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , коротко АІГ), гадолиний-галієвий гранат ( $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ , коротко ГГГ), ітрій-літієвий фторид (коротко ІЛФ) та ванадат ітрію ( $\text{YVO}_4$ ). Серед скляних основ можна виділити сполуки на основі кварцу (некристалічний  $\text{SiO}_2$  або кварцове скло), фосфатовмісні сполуки, які використовуються в потужних імпульсних лазерів.

На відміну від лазерів на основі скла, лазери на кристалічній основі мають вузьку спектральну лінію, нижчий рівень легування, підвищену стійкість до опромінення (ультрафіолет у спектрі газорозрядної лампи призводить до потемніння), і вищу теплопровідність. З іншого боку лазери на скляній основі мають також безперечні переваги: вони ізотропні, їх легко виготовити в потрібному розмірі і формі, поверхня легко піддається обробці, а однорідне легування домішками не становить особливих труднощів. Оскільки скла – погані провідники тепла, вони переважно використовуються в потужних лазерах, які працюють в імпульсному режимі з малим заповненням (тобто з великою шпаруватістю імпульсів).

Іонізовані домішки, що є активним середовищем кристалічних лазерів, найчастіше відносяться до рідкісноземельних та перехідних металів. Іноді трапляються лазери з іонами актинідів. Домішкові іони розподіляються

зазвичай по всій твердотільній основі і поводяться як незалежні джерела випромінювання. Концентрація домішок зазвичай становить близько 1 %, але є і лазери, що містять від 0,01 % до 50 % домішки (все залежить від матеріалу-господаря, домішки та призначення). Щоб уникнути появи дефектів або механічних напруженостей активного середовища намагаються вибирати такі поєднання, щоб розміри атома домішки і атомів матеріалу-господаря, що заміщуються, приблизно збігалися.

Виходить безліч активних середовищ досить широко, найбільшого поширення набули такі поєднання [7]:

- Nd<sup>3+</sup>: YVO<sub>4</sub>;
- Nd<sup>3+</sup>: YAG;
- Yb<sup>3+</sup>: YAG;
- Ti<sup>3+</sup>: сапфир;
- Er<sup>3+</sup>: кварцеве волокно;
- Er<sup>3+</sup>: YAG;
- Ho<sup>3+</sup>: YAG;
- Tm<sup>3+</sup>: YAG;
- оптоволокно, леговане тулієм.

Зазвичай твердотільні лазери являють собою комплекс із самого лазеру та сканатору – системи відхилення лазерного променя по двох або трьох координатах, в залежності від типу сканатору (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Твердотільний лазер

Твердотільні лазери дозволяють отримати високу потужність, строк служби але їх вартість є надзвичайно високою, особливо для лабораторного верстата. Разом із тим більшість таких лазерів мають відносно невелику робочу область.

### 1.2.2 Твердотільні напівпровідникові лазери

Напівпровідникові лазери – це лазери з підсилювальним середовищем на основі напівпровідникового активного середовища, в якому генерація відбувається, як правило, за рахунок вимушеного випромінювання фотонів при міжзонних переходах електронів в умовах високої концентрації носіїв у зоні провідності. Формально, напівпровідникові лазери є твердотільних лазерів, проте їх прийнято виділяти в окрему групу, так як вони мають інший принцип роботи.

Без накачування більшість електронів перебувають у валентній зоні. Пучок накачування з фотонами з енергією трохи більший за ширину забороненої зони збуджує електрони і переводить їх у більш високоенергетичний стан у зоні провідності, звідки вони швидко релаксують у стан поблизу дна зони провідності. У той же час дірки, що генеруються у валентній зоні, переміщуються до її верхньої частини. Електрони із зони провідності рекомбінують з цими дірками, випускаючи фотони з енергією, що дорівнює рівній ширині забороненої зони. Цей процес може також стимулюватися вхідними фотонами з енергією. Кількісний опис ґрунтується на розподілі Фермі-Дірака для електронів в обох зонах.

Більшість напівпровідникових лазерів є лазерними діодами з накачуванням електричним струмом, і з контактом між n-легованими та p-легованими напівпровідниковими матеріалами. Є також напівпровідникові лазери з оптичним накачуванням, де носії генеруються за рахунок поглинання збуджувального їх світла, і квантово-каскадні лазери, де використовуються внутрішньозонні переходи.

Основні матеріали для напівпровідникових лазерів:

- GaAs (арсенід галію);
- AlGaAs (арсенід галію-алюмінію);
- GaP (фосфід галію);
- InGaP (фосфід галію-індія);
- GaN (нітрид галію);
- InGaAs (арсенід галію-індія);
- GaInNAs (арсенід-нітрид галію індія);
- InP (фосфід Індія);
- GaInP (фосфід галію-індія).

Наведені напівпровідники є прямозонними. Напівпровідники з непрямою забороненою зоною, такі як кремній, не мають сильного та ефективного світлового випромінювання. Оскільки енергія фотона лазерного діода близька до енергії забороненої зони, напівпровідникові композиції з різними енергіями забороненої зони дозволяють отримати випромінювання з різними довжинами хвиль. Для трьох-і чотирикомпонентних провідників енергія забороненої зони може безперервно суттєво змінюватись у деякому діапазоні.  $\text{AlGaAs} = \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , наприклад, підвищення вмісту алюмінію (зростання  $x$ ) призводить до розширення забороненої зони.

Крім вищезгаданих неорганічних напівпровідників, можуть використовуватися органічні напівпровідникові з'єднання для напівпровідникових лазерів. Відповідна технологія бурхливо розвивається, оскільки перспективи дешевого та масового виробництва таких лазерів дуже привабливі. До цих пір були продемонстровані органічні напівпровідникові лазери тільки з оптичним накачуванням, оскільки з різних причин важко досягти високої ефективності за рахунок електричного накачування.

Сучасні напівпровідникові лазери мають безліч переваг. Вони малогабаритні, таким чином весь модуль можна розташувати на каретці

лазерного верстата і для його функціонування достатньо лише підведення напруги (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Напівпровідниковий лазер

Крім того напівпровідникові лазери мають невеликі габарити і масу, що дозволяє забезпечити велику швидкість і прискорення переміщення каретки. Напівпровідникові лазери мають відносно невелику вартість. Але разом із тим напівпровідникові лазери мають невелику потужність – до 60 Вт, але потужність більшості з них знаходиться у діапазоні 0,5-7 Вт. Ще одним недоліком є невеликий строк роботи таких лазерів.

### 1.2.3 Газові лазери

Випромінювання атомарних та іонних газових лазерів, наприклад He-Ne, Ar<sup>+</sup> і Kr<sup>+</sup>-лазерів, зазвичай є різнобарвними променями. Такі лазери, у минулому будучи основними лазерними джерелами, здебільшого виходять із використання через малого ККД. Зокрема, потужність випромінювання Kr<sup>+</sup>-лазера – близько сотень міліватів; спектр випромінювання простягається від  $\lambda = 350$  нм у ближній УФ області до 676 нм (червоний колір). Працюючи на кількох спектральних лініях одночасно, може випромінювати «білий лазерний колір». Різноманітні гази, що складаються з атомів одного виду, а також їх іонів можуть служити активним середовищем і працювати на незліченній безлічі довжин хвиль в ближньому ІЧ і видимому діапазоні.

Незважаючи на це, атомні та іонні лазери сьогодні використовуються переважно в спеціалізованих додатках: у твердотільних лазерів з лазернодіодним накачуванням продуктивність вища, вони простіші в налаштуванні і надійніші.

Лазери на молекулах газу (напр. CO<sub>2</sub>-лазери, що випромінює на довжинах  $\lambda = 9,6$  мкм і  $\lambda = 10,6$  мкм (середній ІЧ-діапазон) здатні випромінювати тисячі ват потужності в безперервному режимі. При цьому їхній повний ККД становить приблизно 10 %. Вони використовуються для різання, зварювання, скайбування, гравірування та маркування. У далекому ІЧ-діапазоні найбільш поширений лазер на метанолі, який випромінює на довжинах  $\lambda = 119$  мкм і  $\lambda = 124$  мкм, а також на міриадах інших частот. Зазначимо, що для молекулярного газу легко отримати випромінювання у всіх ІЧ діапазоні. Навіть звичайна молекула води в ІЧ-діапазоні може мати велику кількість ліній лазерного випромінювання.

Ексимерні лазери використовуються в ультрафіолетовій частині спектру. Поняття «ексимер» (скорочення від «збуджений димер» (англ. excited dimer)) – короткоживуча молекула, що містить два збуджені атоми. Якщо два атоми неоднакові, використовується термін «ексиплекс». Галогеніди благородних газів, такі як ХеСl, формують ексиплекси, оскільки хімічна поведінка збудженого атома благородного газу подібна до поведінки атома лугу, яка легко вступає в реакцію з галогеном. Коли ексиплекс повертається у свій основний стан, його компоненти дисоціюють і окремі атоми відштовхуються, тобто молекула розпадається. Таким чином, нижній рівень лазера виявляється незаселеним, забезпечуючи таким чином інверсію заселеностей. Приклади ексимерних та ексиплексних лазерів: F<sub>2</sub> (153 нм), ArF (193 нм), KrF (248 нм), ХеСl (308 нм), ХеF (351 нм). Лазерні імпульси ХеСl можна отримати, пропускаючи через суміш Хе і Сl<sub>2</sub> газовий розряд. Короткохвильове випромінювання зазвичай не глибоко проникає в матеріали, що дозволяє використовувати їх для тонкого різання, при якій не

виділяється тепло. Це їх якість плюс велика потужність лазерних імпульсів обумовлює широке їх застосування в мікролітографії, мікромеханіці, фотохімії та хірургії (особливо хірургії ока). Стандартне виробництво напівпровідникових схем використовується випромінювання таких лазерів довжиною  $\lambda = 193$  нм (далекій УФ діапазон).

Газові лазерні трубки (рис. 1.6) мають безліч переваг для розробки лазерного ЧПУ верстата для користування у освітній лабораторії. Верстат передбачається використовувати для різки та маркування листових матеріалів із дерева та похідних матеріалів, а також термопластів.



Рисунок 1.6 – Газова лазерна трубка

Лазерні трубки мають великий строк служби, в середньому 10000 годин, велику для даних матеріалів потужність у діапазоні 50-200 Вт та середню вартість. Але разом із тим лазерні газові трубки є достатньо крихкі та легко руйнуються при механічних впливах. Вирішено у розробці використовувати саме цей тип лазерних модулів.

### 1.3 Огляд лазерних трубок

Загальний принцип роботи сучасних лазерних трубок дуже схожий. Трубки, безумовно відрізняються типом активної речовини, газу. В залежності від типу газу залежить довжина хвилі лазерного променя, що

генерується, та типом джерела накачки – типом енергії, яка необхідна для генерації первинних фотонів. Найбільш поширені типи газів, що використовуються наведені в таблиці 1.1.

Серед наведених саме у ЧПУ верстатах найпоширенішими є аргонові лазери, COIL лазери, лазери на монооксиді вуглецю та вуглекислотні лазери. Аргонові лазери коштують набагато більше за інші, а COIL лазери мають досить складну систему накачки для генерації первинних фотонів. Тому вибір лазерної трубки для верстата, що розробляється варто зупинити на вуглекислотних та монооксидних лазерах. Обидва з них мають один тип накачки, а саме електричний розряд. І дуже близькі значення довжини хвилі лазерного променя, що генерується. Проте CO<sub>2</sub> лазери є більш поширеними на території України і їх легше знайти у випадку необхідної заміни [6].

Таблиця 1.1 – Типи робочого тіла газових лазерів

Робоче тіло	Довжина хвилі	Джерело накачки
1	2	3
Гелій-неоновий лазер	632,8 нм (543,5; 593,9; 611,8 нм, 1,1523; 1,52; 3,3913 мкм)	Електричний розряд
Аргоновий лазер	488,0; 514,5 нм, (351; 465,8; 472,7; 528,7 нм)	Електричний розряд
Криптоновий лазер	416; 530,9; 568,2; 647,1; 676,4; 752,5; 799,3 нм	Електричний розряд
Ксеноновий лазер	Безліч спектральних ліній.	Електричний розряд
Азотний лазер	337,1 нм (316; 357 нм)	Електричний розряд
Лазер на фтористому водні	2,7—2,9 мкм (Фтористий водень) 3,6—4,2 мкм (фторид дейтерія)	Хімічна реакція горіння етилену

## Продовження таблиці 1.1

1	2	3
Хімічний лазер на кисні та йоді (COIL)	1,315 мкм	Хімічна реакція в полум'ї кисню та йоду
Вуглекислотний лазер (CO <sub>2</sub> )	10,6 мкм, (9,6 мкм)	Електричний розряд, хімічна реакція
Лазер на монооксиде вуглецю (CO)	2,5-4,2 мкм, 4,8-8,3 мкм	Електричний розряд, хімічна реакція
Ексімерний лазер	193 нм (ArF), 248 нм (KrF), 308 нм (XeCl), 353 нм (XeF)	Рекомбінація ексімерних молекул при електричному розряді

Будова вуглекислотних лазерів є доволі проста (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Схематичне зображення CO<sub>2</sub> лазерної трубки

Для генерації первинних фотонів використовується два електроди: катод та анод, до яких під'єднується високовольтне джерело живлення. Ємність, в якій знаходиться активний газ та навколишня оболонка виготовляються із скла або металу. Навколо ємності із газом знаходиться зовнішній кожух, в якому циркулює охолоджуюча рідина, як правило це звичайна вода. Цей процес необхідний для відведення зайвої температури від лазерної трубки.

Виробників лазерних трубок на ринку України представлено доволі багато, тому необхідно звернути увагу на особливості різних трубок.

Лазерні трубки відрізняються:

– потужністю, цей параметр змінюється у діапазоні від 40 Вт до 200 Вт.

Вимогам технічного завдання відповідає потужність від 80 Вт до 100 Вт, яка дозволить на високих швидкостях працювати із деревиною та похідним матеріалом;

– охолодженням, контур охолодження може проходити через наконечник трубки та охолоджувати вихідну лінзу, а може обмежитися лише охолодженням газорозрядної трубки;

– оптичною системою, оптична система лазерної трубки також має обмежений ресурс. І у випадку лазерної трубки із змінною активною речовиною також потрібна заміна системи дзеркал;

– газовою сумішшю, не зважаючи на те що всі трубки є вуглекислотними, активна речовина насправді є сумішшю газів. Зазвичай це трьохкомпонентна суміш (вуглекислий газ, гелій та азот), але іноді використовується п'ятикомпонентна (додається водень та ксенон);

– електродами, найчастіше виробники лазерних трубок CO<sub>2</sub> використовують вольфрам. Однак деякі заводи застосовують інші спеціальні сплави, склад яких не розкривають. Взагалі, якість електродів впливає на те, яку силу струму можна буде регулярно подавати з розпалювання на лазерну трубку без ризику завдати пошкодження.

На території України найбільше поширення мають вуглекислотні трубки виробників Reci, Yongli та EFR Lasea. Reci має термін служби заявлений заводом до 10 000 робочих годин, Yongli – до 10 000 робочих годин, EFR Lasea серія F – до 6 000 робочих годин. Це все виробники лазерного обладнання з Китаю. Європейські трубки та трубки із Сполучених штатів Америки не мають високої популярності через набагато вищу ціну.

#### 1.4 Результати аналізу технічного завдання

В результаті проведеного аналізу прийнято рішення у якості лазерного модулю обрати газову лазерну трубку, а саме CO<sub>2</sub> лазер. Цей вибір обумовлено відносно невеликою вартістю модулю і разом із тим достатньою потужністю для роботи із вказаними у технічному завданні матеріалами, до яких відносяться дерева та похідні матеріали (фанера, МДФ, тощо), а також термопластичні листові матеріали.

Потужність лазерного модулю вирішено для верстата, що буде розроблятися, вирішено обрати від 80 Вт до 100 Вт. Це дозволить на великій швидкості виконувати операції як маркування так і різання наведених вище матеріалів.

Вибір лазерного модулю є вкрай важливим через те, що подальша розробка електронної та програмної частин повністю залежить від обраного лазера.

## 2 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТИНИ ЛАЗЕРНОГО ЧПУ ВЕРСТАТА

### 2.1 Розробка блок-схема верстата

У якості лазерного модулю у попередньому розділі було обрано  $\text{CO}_2$  лазерну трубку. Для її функціонування необхідна велика кількість додаткових компонентів.

Для створення первинних фотонів у газовій трубці необхідна так звана система накачки. У випадку  $\text{CO}_2$  лазерної трубки у якості системи накачки використовується високовольтні блоки живлення. Який одночасно використовується як джерело енергії і як регулятор потужності лазерного променя. Це дає змогу, наприклад, виконувати градієнтне декоративне маркування. Високовольтний блок живлення використовується лише для лазерної трубки. Всі інші компоненти заживлюються окремо від низьковольтного блока живлення.

Для відведення тепла від лазерної трубки обов'язково використовувати водяну систему охолодження, так званий «чиллер». Під час роботи лазерної трубки обов'язково необхідна постійна циркуляція рідини скрізь спеціальний канал лазерної трубки. Чиллер вмикається перед початком роботи лазера і вимикається після завершення роботи. Таким чином доцільно підключити чиллер напряму до блока живлення верстата, який буде заживлювати плату керування та інші компоненти.

Через те що при розробці механічної частини лазерного верстата (друга частина комплексної атестаційної роботи) обрано кінематичну схему із нерухомою трубкою, для переміщення лазерного променя в робочому просторі верстата необхідна система відхилення променя. Це система дзеркал та кронштейнів для них [7].

Для забезпечення руху системи дзеркал і механічних компонентів необхідні двигуни. Для точного переміщення доцільно використовувати крокові двигуни, які можуть забезпечити високу точність, швидкість, момент та утримання в статичному стані. Але для використання крокових двигунів необхідно використати драйвери, що дозволять працювати у мікрокроковому режимі. Для керування переміщенням і регуляції напруги високовольтним блоком живлення і як наслідок потужністю лазерного променя необхідно використовувати систему керування [8].

Необов'язковими системами лазерного ЧПУ верстата є кінцеві вимикачі та система обдуву зони обробки. Кінцеві вимикачі необхідні для точного визначення початку координат робочої зони. За відсутності цих датчиків при увімкненні крокових двигунів вважається що вони знаходяться на початку координат. Але це не дуже зручно при виникненні нештатних ситуацій, які вимагають вимкнення процесу обробки і продовження роботи.

Система обдуву зони обробки необхідна для призупинення процесу тління заготовки. Обдув може виконуватися навколишнім повітрям, що є не дуже ефективним. Або газами, що зупиняють процес горіння, наприклад  $\text{CO}_2$ .

Як вже згадувалося високовольтний блок живлення можна використовувати лише для лазерної трубки, всі інші компоненти живляться окремим низьковольтним джерелом. Розроблена блок-схема електричної частини лазерного верстата представлена на рисунку 2.1.

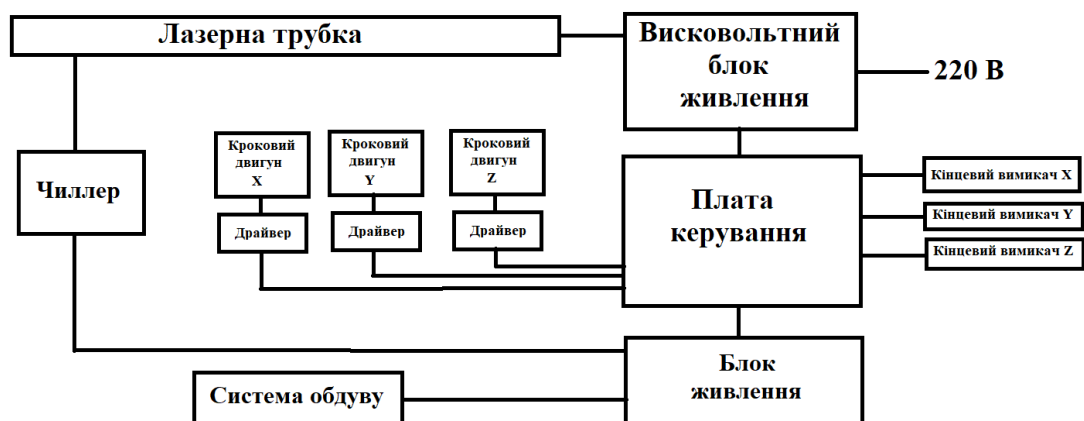


Рисунок 2.1 – Блок-схема електричної частини верстата

## 2.2 Вибір основних вузлів електричної частини лазерного ЧПУ верстата

Як було вказано у попередньому розділі, основним елементом відповідно до якого слід обирати всі інші компоненти є лазерний модуль. Тому і починати вибір слід саме з лазерної трубки [9]. Відповідно до аналізу лазерних модулів у попередньому розділі, обрано лазерну трубку RECI W1 75-90 Вт, представлену на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Лазерна трубка RECI W1 75-90 Вт

Номінальна потужність трубки 75 ват, пікова – 90 ват. Ресурс робочого часу становить 10 000 годин. Виріб належить до покоління 4.0. Це умовна градація, запроваджена компанією Beijing Reci Laser Technology. Трубка має наступні характеристики, представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики RECI W1 75-90 Вт

Параметр	Значення
1	2
Номінальна потужність, Вт:	75
Максимальна потужність, Вт:	90
Оброблювані матеріали:	Неметали

Продовження таблиці 2.1

1	2
Термін служби, год:	10000
Робочий струм, ма:	22
Максимальний робочий струм, ма:	26
Напруга розпалювання, кВ:	19
Каталізатор:	Є
Довжина хвилі, мкм:	10,6
Довжина, мм:	1250
Діаметр, мм:	80
Охолодження:	Рідина
Температура експлуатації, С:	10 - 40
Швидкість водообміну, л/хв:	2 - 5
Режим випромінювання:	Імпульсний
Мода випромінювання:	Багатомодове
Газова суміш:	CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> -He
Габаритні розміри без упаковки, мм:	1100 × 80 × 80
Габаритні розміри в упаковці, м:	1,24 × 0,24 × 0,24
Об'єм, м <sup>3</sup> :	0.08
Вага нетто, кг:	2,8
Виробник:	Beijing Reci Laser Technology
Країна виробник:	КНР
Гарантія, міс:	6 місяців

Дане покоління відрізняється від конкурентів:

- додаткова ізоляція аноду;
- напівпрозоре дзеркало виконане з матеріалу GaAs;
- відсутністю юстирувальних гвинтів на зеркалах;
- формою електрода катода;

- відсутністю примусового охолодження зеркал;
- гвинтовим підключенням дротів;
- високою вихідною потужністю;
- великим терміном служби: до 10000 годин;
- захисним ковпаком, виготовленим із силікону.

Трубка має діаметр 80 мм та довжину 1100 мм. Виробник забезпечив її сумісність з блоками високої напруги з робочим струмом 22 мА та напругою для розпалювання 19 кВ. Правильний вибір блоку високої напруги забезпечує максимальний термін служби, який може досягати 10000 годин за умови дотримання вимог виробника.

Дана трубка повністю відповідає потребам верстата і має відносно невелику ціну. Вартість трубки складає приблизно 16000 грн.

Блок живлення необхідно обирати відповідно до лазерної трубки. Він має забезпечувати необхідну вихідну напругу та потужність. Відповідно до обраного лазерного модулю обрано високовольтний блок живлення Yongli YL-U1 (80-130 Вт), представлений на рисунку 2.3, він має запас потужності і якісну систему охолодження [10].



Рисунок 2.3 – Yongli YL-U1 (80-130 Вт)

Блок має сталевий корпус, що виконує функцію пасивного радіатора, відводячи тепло від електронних компонентів. Як активне охолодження використовують 2 вентилятори, які примусово охолоджують трансформатори та електронні компоненти.

Для підключення у блоку є дві клеми: перша – триконтактна клема (АС-АС-G) – для підключення електроживлення 220 В та заземлення, а друга – шестиконтактна (TLH-TLL-PG-IN-5V) – для підключення до системи керування. Схему підключення наведено на рисунку 2.4, а перелік контактів представлено в таблиці 2.2.

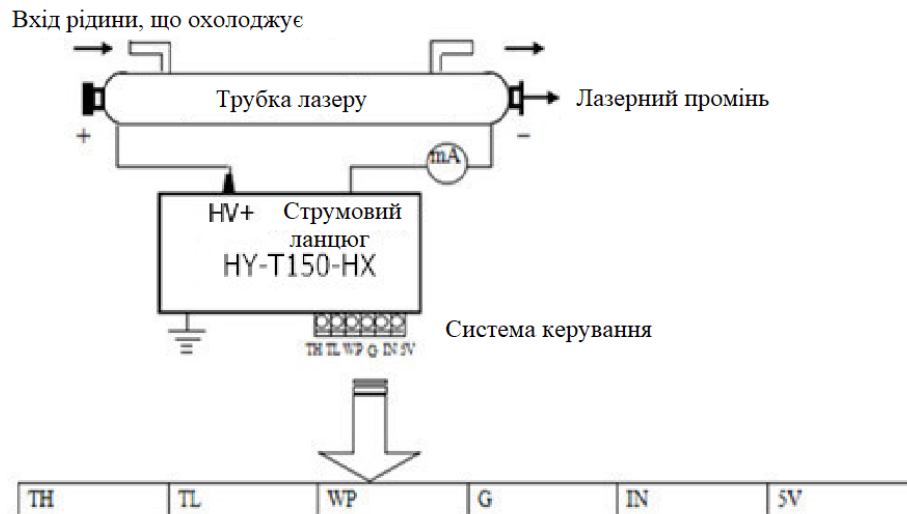


Рисунок 2.4 – Схему підключення високовольтного блоку живлення

Таблиця 2.2 – Перелік контактів

Найменування	Значення	Опис
TH	input signal	No laser TTL low level ( $\geq 3$ В), laser in high ( $\geq 0,3$ В)
TL	input signal	No laser TTL low level ( $\geq 3$ В), laser in high ( $\geq 0,3$ В)
WP	Protection interface	Short-circuit not in use
G	Signal ground	Ground
IN	input signal	Laser power control terminal
5V	Output power supply	5 В input

Вартість високовольтного блока живлення складає 8000 грн.

Для охолодження лазерної трубки існує достатньо багато різноманітних систем – чіллерів, але всі вони мають достатньо високу вартість. Середня вартість системи охолодження для обраної лазерної трубки складає приблизно 18000 грн. Тому вирішено розрахувати власну систему водяного охолодження. Данні розрахунків буде наведено у четвертому розділі роботи.

Як вже було зазначено, вирішено розробляти лазерний ЧПУ верстат із нерухомою трубкою. Тому для переміщення лазерного променя в межах робочого простору необхідно створити систему дзеркал, які будуть відхиляти лазерний промінь (рисунок 2.5).

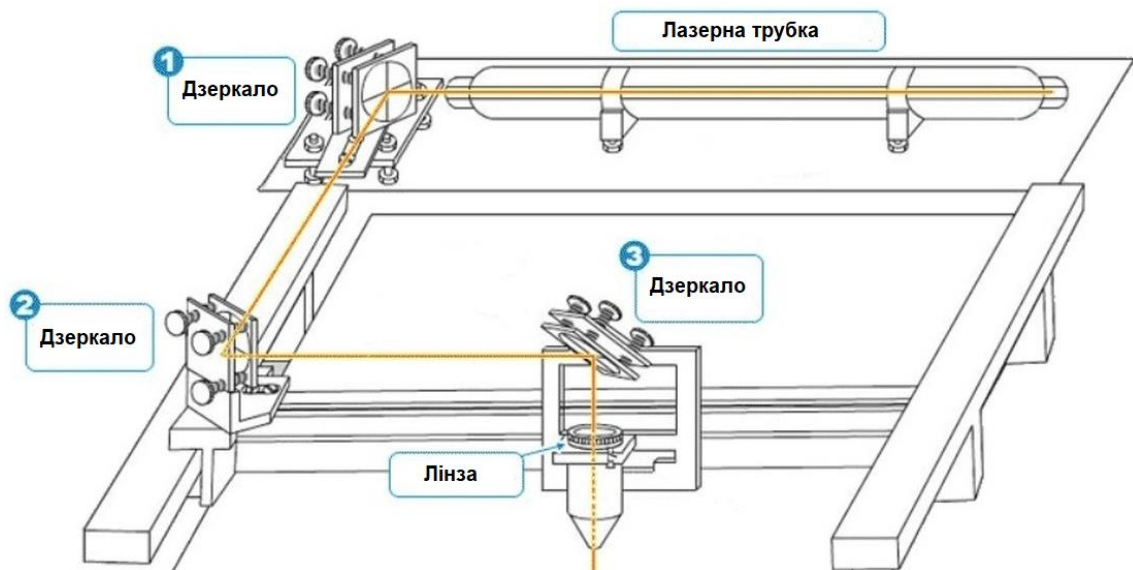


Рисунок 2.5 – Схема проходження лазера CO<sub>2</sub>

Існує достатньо багато різноманітних дзеркал та тримачів. Крім того для фокусування лазерного променя створення тиску повітря або газу що обдуває зону обробки використовуються лазерні сопла.

У якості матеріалу дзеркал використовуються або кремнієві, або молібденові дзеркала, які представлені на рисунку 2.6.



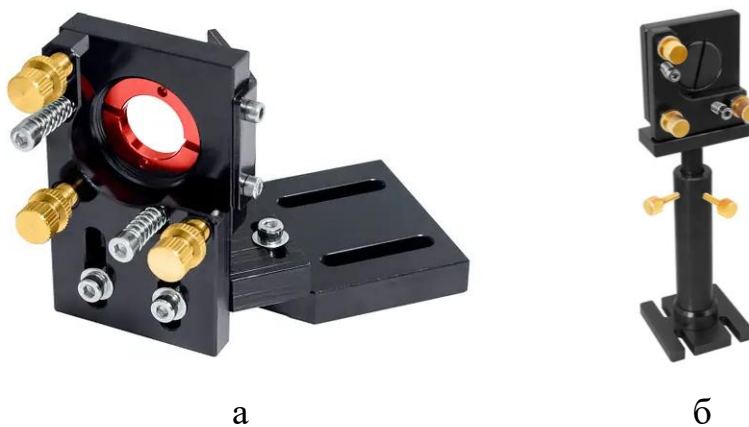
а) молібден; б) кремній

Рисунок 2.6 – Дзеркала

Молібденові дзеркала виготовлені з полірованого металу, дещо надійніші, але мають нижчий ступінь відображення, що означає, що лазер трохи розсіюється, і на лінзі лазерного верстата, що фокусує, є менша потужність.

Дзеркала із кремнієвого золота складаються зі шматочків високо полірованого кремнію, на які нанесений шар золота. Відбивна здатність та якість цих дзеркал дуже високі. Від 99,5 до 99,7 лазерного світла, що надходить, відображається. Бажано замінювати ці дзеркала кожні 12 місяців.

Молібденові дзеркала коштують більше але і строк роботи в них більше, обрані саме вони. Тримачі обрані з можливістю юстування по трьох осях і одному куту обертів (рисунок 2.7).



а – рухомий тримач, б – нерухомий тримач

Рисунок 2.7 – Тримачі дзеркал

Сопла лазерного верстата обрано інтегроване, яке одночасно містить елементи, що виконують функції дзеркала вертикального відбиття світла, лінз фокусування, сопла обдуву зони обробки та фіксації до рухомої каретки осі X (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Лазерне сопло

Для переміщення рухомих частин лазерного верстата обрано крокові двигуни NEMA23. Цей вибір обумовлено достатньо великими розмірами верстата і як наслідок вагою рухомих частин. Для переміщення вздовж осей X та Y обрано звичайні одновалові крокові двигуни NEMA23, для переміщення вздовж осі Z обрано два крокових двигуна NEMA23 з планетарним редуктором 1х3 (рис. 2.9). Необхідність планетарного редуктора викликано по-перше великою вагою рухомого робочого столу, по-друге відсутністю необхідності швидкого його переміщення і по-третє ускладненням довільних переміщень при вимкненні напруги.



а) двигун осі X та Y; б) двигун ось Z

Рисунок 2.9 – Крокові двигуни

Двигуни обрано з двома обмотками, що дозволить забезпечити 200 кроків на  $360^\circ$ . Цього значення буде недостатньо для точних переміщень у повнокроковому режимі. Тому додатково для двигунів буде обрано драйвери, що дозволять працювати у мікрокроковому режимі. Двигуни мають робочий струм 1,5 мА.

Хоча двигуни, що обрано, відносяться до 23 серії для їх керування можна використати дешеві малогабаритні драйвери. Так як їх робочий струм лише 1,5 мА. Варіантів драйверів існує вкрай велика кількість, для верстата обрано LV8729 (рис. 2.10).

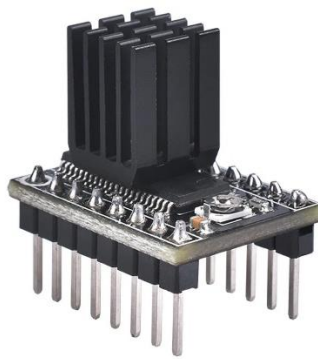


Рисунок 2.10 – Драйвер LV8729

Цей тип драйверів відноситься до так званих «тихих» драйверів. Мають максимальний струм 1,5 мА та можливість роботи у режимі 128 мікрокроків.

Таким чином крокові двигуни NEMA23 разом із обраними драйверами дозволять забезпечити 25600 мікрокроків на повний оберт. Цієї точності цілком вистачить для позиціонування лазерного променя.

На даний момент існує велика кількість плат керування, які можливо використати у лазерних верстатах. Це можуть бути, як спеціалізовані, так і універсальні. Найбільш просим і дешевим варіантом є плата Arduino Mega разом із «шилдом» – платою розширення RAMPS 1.4.

Arduino Mega 2560 має достатній функціонал для керування 3D принтерами та лазерними граверами (рис. 2.11).

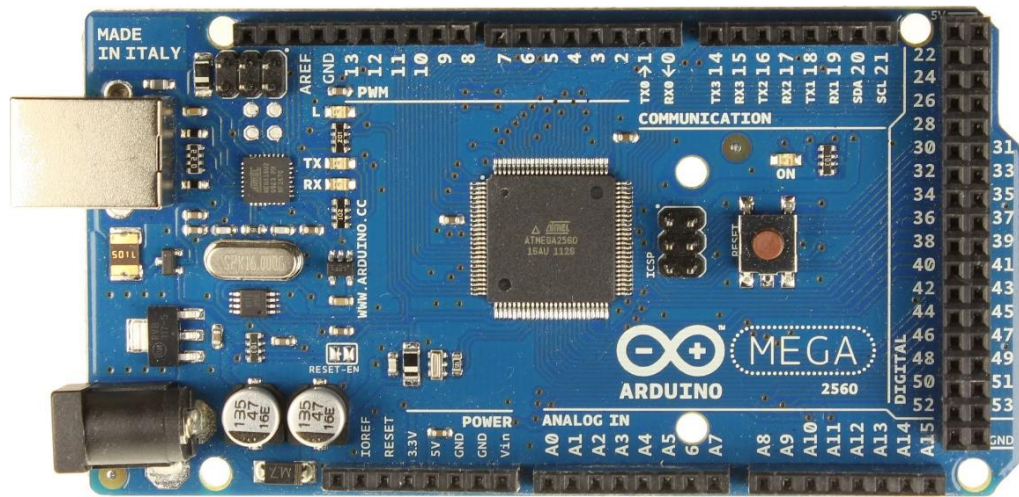


Рисунок 2.11 – Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 – це пристрій на основі мікроконтролера ATmega2560 (datasheet). До його складу входить все необхідне для зручної роботи з мікроконтролером: 54 цифрові входи/виходи (з яких 15 можуть використовуватися як ШІМ-виходи), 16 аналогових входів, 4 UART (апаратних приймачів для реалізації послідовних інтерфейсів), кварцовий резонатор на 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм живлення, роз'єм ICSP для внутрішньосхемного програмування та кнопка скидання. Для початку роботи з пристроєм досить просто подати живлення від AC/DC-адаптера або батарейки або підключити його до комп'ютера за допомогою USB-кабелю. Arduino Mega сумісний з більшістю плат розширення, розроблених для Arduino Duemilanove та Diecimila.

Ардуїно Mega 2560 відрізняється від усіх попередніх плат тим, що в ньому для перетворення інтерфейсів USB-UART замість мікросхеми FTDI використовується мікроконтролер ATmega16U2 (ATmega8U2 у версіях плати R1 та R2). Характеристики наведені в таблиці 2.3.

На платі Mega 2560 версії R2 доданий резистор, що підтягує до землі лінію HWB мікроконтролера 8U2. Подібна міра дозволяє спростити процес оновлення прошивки та перехід пристрою в режим DFU.

Таблиця 2.3 - Характеристики Ардуїно Мeга 2560

Параметр	Значення
Мікроконтролер	АТmega2560
робоча напруга	5В
Напруга живлення (рекомендована)	7-12 В
Напруга живлення (гранична)	6-20 В
Цифрові входи/виходи	54 (з яких 15 можуть використовуватися як ШИМ-виходів)
Аналогові входи	16
Максимальний струм одного висновку	40 мА
Максимальний вихідний струм виведення 3,3 В	50 мА
Flash-пам'ять	256 КБ, з яких 8 КБ використовуються завантажувачем
SRAM	8 КБ
EEPROM	4 КБ
Тактова частота	16 МГц

Плата розширення RAMPS 1.4 є достатньо старою, існують більш нові її версії 1.5 та 1.6. Але вони відрізняються лише транзисторами, які у 3D принтерах для керування швидким нагрівом екструдера та столу. У випадку лазерного верстата такої необхідності немає, а версія 1.4 коштує дешевше, зовнішній вигляд плати представлено на рисунку 2.12.

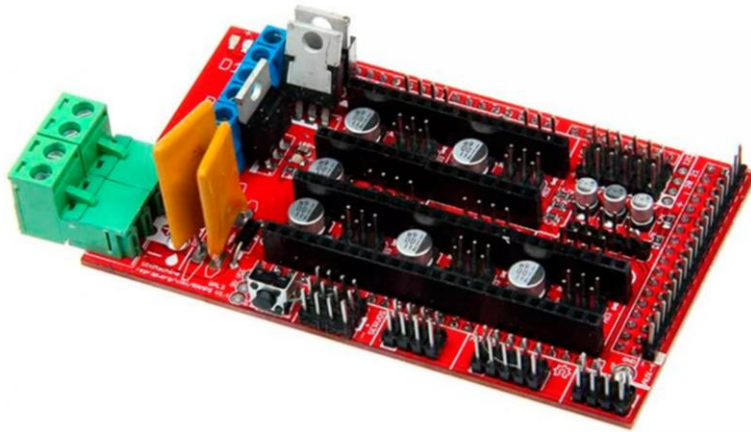


Рисунок 2.12 – RAMPS 1.4

RAMPS 1.4 забезпечує зручність підключення зовнішніх пристроїв. Загальна вартість плат керування становить 1000 грн, що набагато менше ніж спеціалізовані системи.

У ЧПУ верстатах можуть бути використано багато кінцевих вимикачів, що працюють за різними фізичними принципами: механічні, індуктивні, датчики Холла, оптичні. Для розробки обрано оптичні датчики (рис. 2.13), що мають вкрай високий строк роботи та невелику вартість.

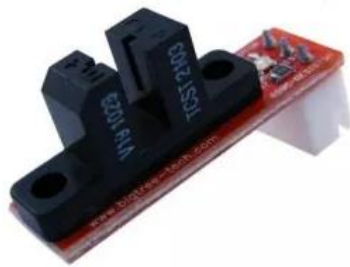


Рисунок 2.13 – Оптичний кінцевий вимикач

На даному етапі розробки прийняте рішення забезпечити обдув робочої області навколишнім повітрям, це захистить лінзу сопла від утворення шару продуктів горіння. У подальшому можливе створення системи обдуву CO<sub>2</sub>.

Живлення обраних компонентів планується від джерела 12 В, за винятком лазерного модулю. Таким чином цілком вистачить блоку живлення

400 Вт. Для уточнення потужності необхідно провести розробку системи охолодження лазерного модулю.

Для підключення електричних компонентів до плати керування запропоновано наступну схему, представлену на рисунку 2.14.

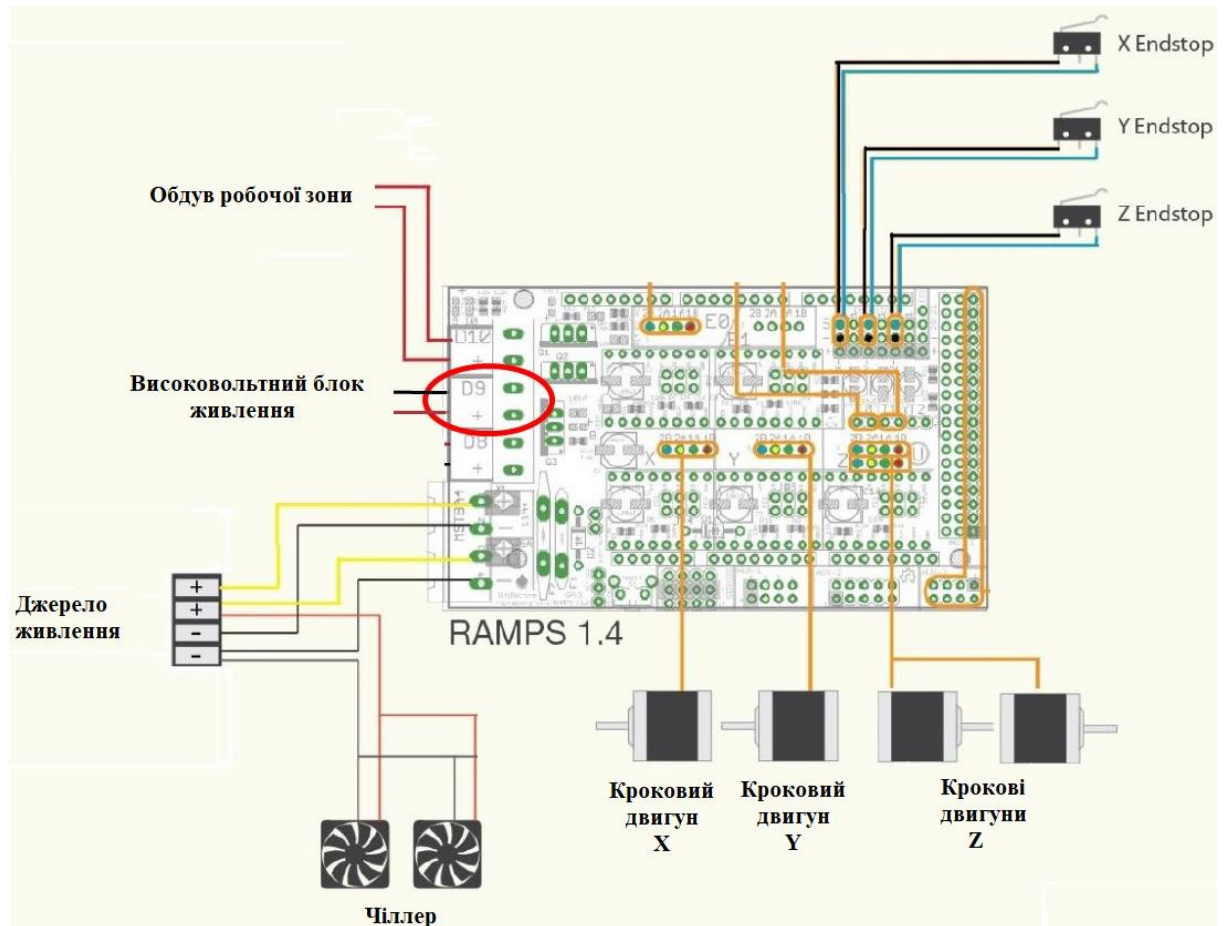


Рисунок 2.14 – Схема підключення електронних компонентів

Джерело живлення 12 В підключається на вхід живлення RAMPS 1.4. Обмотки крокових двигунів Z з'єднуються послідовно, це дозволить забезпечити синхронність їх роботи.

Високовольтний блок живлення лазерного модулю і вентилятори обдуву робочої зони підключаються до виходів D9 та D10, що дозволить керувати їх вхідними сигналами. Для підключення драйверів на RAMPS 1.4 є спеціальні гнізда підключення.

### 3 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ЛАЗЕРНОЇ ТРУБКИ

#### 3.1 Визначення параметрів рідинної системи охолодження

Вихідною величиною при розрахунку системи охолодження лазерної трубки є кількість тепла, що відводиться від неї, в одиницю часу  $Q_w$ . Його значення можна визначити як із рівняння теплового балансу, так і на підставі експериментальних даних за формулою:

$$Q_w = q_w N_e, \quad (3.1)$$

де  $q_w$  – кількість тепла, що відводиться від лазерної трубки, кДж/кВт·год. Для лазерних CO<sub>2</sub> трубок значення  $q_w$  лежить в межах 445...490 кДж/кВт·год.

Витрата рідини, що циркулює в системі охолодження:

$$G_w = \frac{Q_w}{c_w(t_w' - t_w'')}, \quad (3.2)$$

де  $c_w$  – теплоємність рідини, що циркулює, кДж/кг·К;

$t_w'$  та  $t_w''$  – відповідно температури рідини на вході та виході радіатора (К).

Для радіаторів чіллерів  $t_w' - t_w'' = 5 \dots 10$  К. Для води  $c_w = 4,187$  кДж/кг·К.

#### 3.2 Розрахунок радіатора

Площа поверхні охолодження визначається по формулі:

$$F = \frac{Q_w}{k(t_w - t_a)}, \quad (3.3)$$

де  $F$  – площа поверхні радіатора;

$k$  – повний коефіцієнт теплопередачі скрізь стінки радіатора;

$t_w = (t_w' + t_w'') / 2$  – середня температура рідини, що охолоджує;

$t_a = (t_a' + t_a'') / 2$  – середня температура повітря, що проходить скрізь радіатор.

Коефіцієнт  $k$  залежить від матеріалу, форми та стану внутрішньої та зовнішньої поверхонь решітки радіатора, характеру руху повітряного потоку та ін. З достатньою точністю можна прийняти:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \frac{1}{a_3}}, \quad (3.4)$$

де  $a_1$  – коефіцієнт теплопередачі від рідини до стінок,  $\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К}$ ;

$a_2 = \lambda / \delta$  – коефіцієнт теплопередачі через стінки радіатора;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності металу трубок радіатора,  $\text{кДж}/\text{м} \cdot \text{год} \cdot \text{К}$ ;

$\delta$  – товщина стінки трубки, м;

$a_3$  – коефіцієнт теплопередачі від стінок радіатора до повітря ( $\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К}$ ).

Експериментальні значення коефіцієнта  $a_1$ , вказані виробниками, знаходяться в межах  $837 \dots 1465 \text{ кДж}/\text{м}^2$ .

Значення коефіцієнта теплопровідності різних матеріалів трубок радіатора відображені у таблиці 3.1.

Таблиці 3.1 – Параметри матеріалів трубок радіатора

Матеріал	$\lambda$ , $\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К}$
Листова латунь	300-450
Алюмінієві сплави	375-710
Нержавіюча сталь	33-67
Легована сталь	83-167

Коефіцієнт  $a_3$  в основному залежить від швидкості повітря  $\omega_a$  та характеру його руху. При збільшенні  $\omega_a$  з 5 м/с до 60 м/с коефіцієнт  $a_3$  збільшується від 145 кДж/м<sup>2</sup>·год·К до 1090 кДж/м<sup>2</sup>·год·К. Коефіцієнт  $k$  для трубчастих радіаторів можна орієнтовно визначити з діаграми (рис. 3.1).

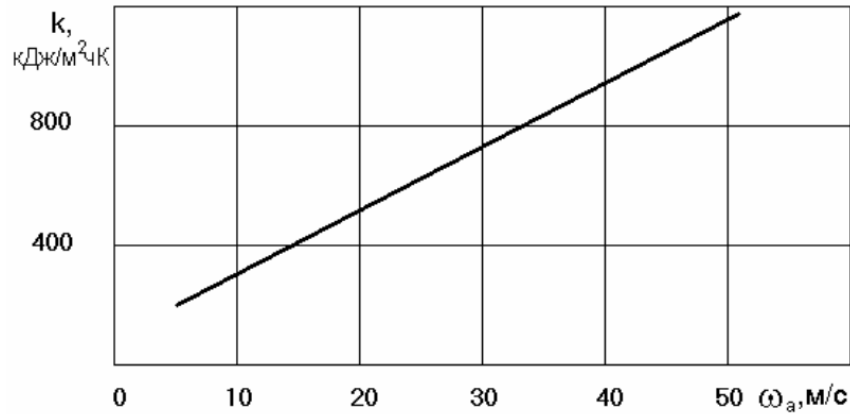


Рисунок 3.1 – Залежність коефіцієнта теплопередачі від швидкості повітря, що проходить через радіатор

Данні вказані виробниками та розрахункові дані показують, що при визначенні величини поверхні охолодження радіатора коефіцієнт  $k$  можна прийняти рівним  $a_3$ , обчисленому за емпіричною залежністю:

$$a_3 = 41.05 \omega_a^{0.8}, [\text{кДж/м}^2 \text{чК}].$$

З рівняння визначення кількості тепла, що сприймається повітрям:

$$Q_w = c_a (t_a'' - t_a') G_a, \quad (3.5)$$

де  $G_a$  – кількість повітря, що проходить скрізь радіатор.

Відповідно до цього:

$$t_a'' = t_a' + \frac{Q_w}{c_a G_a}. \quad (3.6)$$

Для радіаторів систем охолодження CO<sub>2</sub> трубок  $G_a=(0,04\dots 0,1)N_e$ . Аналогічно із формули (3.2) для рідини маємо:

$$t_w'' = t_w' - \frac{Q_w}{c_w G_w}. \quad (3.7)$$

Підставивши отримані значення до формули (3.3), після перетворень отримаємо:

$$F = \frac{Q_w}{k \left[ \left( t_w'' = t_w' - \frac{Q_w}{c_w G_w} \right) - \left( t_a'' = t_a' + \frac{Q_w}{c_a G_a} \right) \right]}. \quad (3.8)$$

Відповідно до вказаних даних площа поверхні радіатору  $F = 0,854 \text{ м}^2$ .

### 3.3 Розрахунок водяного насосу

Подача охолоджуючої рідини здійснюється поршневими, шестерними і відцентровими насосами. Для сучасних CO<sub>2</sub> трубок в основному знайшли застосування поршневі та шестерні насоси.

Компонування водяних насосів проводиться таким чином, щоб скоротити довжину водопроводів і спростити конструкцію. При проектуванні циркуляційних насосів системи охолодження виходять із витрат:

$$G_H = (1,15 \dots 1,2) G_w. \quad (3.9)$$

Продуктивність поршневого насоса визначається залежністю:

$$V_H = \frac{G_H}{\gamma_H} = 60 \frac{\pi D^2}{4} S_H n_H \eta_H, \quad (3.10)$$

де  $D_H$  та  $S_H$  – діаметр та хід поршню насосу;

$n_H$  – кількість обертів на хвилину;

$v_H$  – коефіцієнт подачі насосу.

Для насосів с  $V_H = 0,5 \dots 20 \text{ м}^3/\text{год}$   $\eta_H = 0,85 \dots 0,9$ , а для  $V_H = 20 \text{ м}^3/\text{год}$  і більше  $\eta_H = 0,9 \dots 0,95$ .

Середня швидкість поршню насосу знаходиться у межах  $0,2 \dots 0,9 \text{ м/с}$ , швидкість рідини на лінії всмоктування не вище  $1 \dots 2 \text{ м/с}$ , на лінії нагнітання –  $3 \dots 5 \text{ м/с}$ .

Відношення  $S_H / D_H = 0,5 \dots 2,0$ . Зі збільшенням діаметра насоса ростуть його габарити та маса рухомих деталей, а збільшення  $S_H$  призводить до зростання швидкості та прискорення поршня, навантаження на деталі та появи кавітації. Довжина поршня приймається щонайменше його діаметра.

Продуктивність шестерного насоса визначається як:

$$V_H = 120\pi D_0 m b_H n_H \eta_H, \quad (3.11)$$

де  $D_0$  – діаметр початкової окружної шестерні;

$m$  – модуль зчеплення;

$b_H$  – ширина зуба.

Коефіцієнт подачі  $\eta_H = 0,6 \dots 0,7$ . Модуль зачеплення залежить від продуктивності насоса, окружної швидкості на зовнішньому діаметрі шестірні та ширини шестірні.

Окружна швидкість має перевищувати  $6 \dots 8 \text{ м/с}$ . Число зубів знаходиться в межах  $z = 6 \dots 16$ .  $D_0 = zm$ , висота зуба  $h_H = 2m$ , ширина зуба  $b_H = (4,5 \dots 15)m$ .

При встановленні шестерень на підшипниках кочення  $b_H = (0,5 \dots 0,6) D_{ш}$  ( $D_{ш}$  – діаметр шестерні), а при використанні підшипників ковзання  $b_H = (0,4 \dots 0,5) D_{ш}$ . При менших значеннях збільшуються об'ємні втрати, а при великих – утруднюється забезпечення герметичності в місці контакту зубів, що зчеплюються.

Для запобігання швидкому зношуванню насосні шестерні часто роблять із гумовими зубцями, навулканізованими на металеву втулку.

Розміри та параметри відцентрових насосів можна визначити за розмірами геометрично подібного насоса.

Для геометрично подібних насосів відношення будь-яких двох лінійних розмірів однаково:

$$\frac{l_x}{l_0} = \lambda, \quad (3.12)$$

де  $l_x$  – лінійний розмір довільної деталі насосу, що проектується;

$l_0$  – відповідний лінійний розмір геометрично подібного насосу.

Продуктивності та напори двох насосів зв'язані наступними співвідношеннями:

$$\frac{G_{\Pi}}{G_0} = \lambda^3 \frac{n_{\Pi} n_{\Pi\Pi}}{n_0 n_{\Pi 0}} \quad (3.13)$$

$$\frac{H_{\Pi}}{H_0} = \lambda^2 \left(\frac{n_{\Pi}}{n_0}\right)^2 \frac{n_{\Gamma\Pi}}{n_{\Gamma 0}}, \quad (3.14)$$

де  $\eta_{\Pi}$  – коефіцієнт подачі насосу;

$\eta_{\Gamma}$  – гідравлічний ККД;

Індекси  $\Pi$  та  $0$  відносяться відповідно до насосу, що проектується і подібного.

За заданими значеннями  $G_{\Pi}$ ,  $H_{\Pi}$ ,  $n_{\Pi}$ ,  $\eta_{\Pi\Pi}$  та  $\eta_{\Gamma\Pi}$  встановлюють величину  $\lambda$ , а потім знаходять усі необхідні для проектування розміри та параметри.

Якщо геометрично такого насоса немає, то розміри та параметри насоса визначаються розрахунковим шляхом за заданими значеннями  $G_{\Pi}$ ,  $H_{\Pi}$ .

Вхідний отвір у робоче колесо насоса повинен забезпечувати прохід розрахункової кількості води за відсутності розривів суцільності потоку та кавітаційних явищ. Абсолютна швидкість входу води на лопатки коливається

не більше  $c_1 = 1...5$  м/с. При малих швидкостях збільшуються габарити насоса, а при великих з'являється можливість утворення розривів потоку та порушення нормальної роботи системи охолодження.

Проведемо розрахунок центробіжного водяного насоса. Розрахунок водяного насоса (рис. 3.2) системи охолодження CO<sub>2</sub> лазера виконується в наведеній нижче послідовності для наступних параметрів:

- витрата рідини  $G_w = 0,00082$  м<sup>3</sup>/с;
- напір, що створюється насосом  $H_H = 95180$  Па.

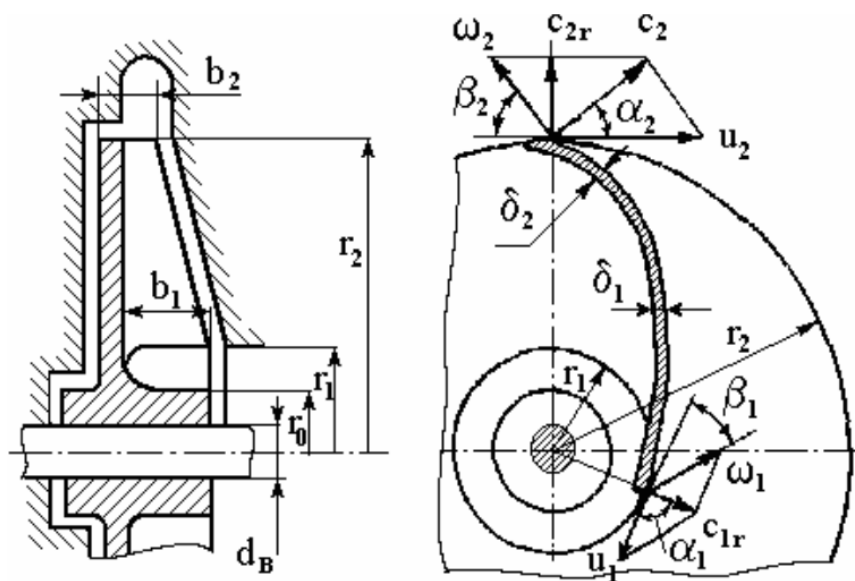


Рисунок 3.2 – Схема робочого колеса водяного насоса

Розрахункова продуктивність:

$$G_H = (1.15 \dots 1.2)G_w = 0,000984 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Співвідношення радіусів вхідного отвору крильчатки та ступіци:

$$k_r = \frac{r_1}{r_0} = 1,2 \dots 2 = 1.8.$$

Швидкість води на вході в крильчатку:

$$C_1 = 1 \dots 5 = 2 \text{ м/с.}$$

Радіус вхідного отвору крильчатки:

$$r_1 = \sqrt{\frac{G_H}{\pi C_1 \left(1 - \left(\frac{1}{k_r}\right)^2\right)}} = 0,00476 \text{ м.}$$

Радіус ступиці колеса:

$$r_0 = \frac{r_1}{k_r} = 0,003 \text{ м.}$$

Швидкість води на виході:

$$C_0 = (0,5 \dots 0,75) C_1 = 1,5 \text{ м/с}$$

Прохідна площа патрубку, що всмоктує:

$$F_0 = \frac{G_H}{C_0} = 0,000656 \text{ м}^2.$$

Діаметр патрубку, що всмоктує:

$$D_{BC} = \sqrt{\frac{4F_0}{\pi}} = 0,029 \text{ м}^2.$$

Товщина лопатки на вході:

$$\delta_1 = 0,003 \dots 0,005 = 0,005 \text{ м.}$$

Вхідний кут лопатки:

$$\beta_1 = 18 \dots 25 = 19 \text{ град.}$$

Кількість лопаток:

$$z = 3 \dots 8 = 8.$$

Радіальна швидкість води на вході:

$$C_{1r} = C_1 = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ширина каналу на вході в лопаточну частину крильчатки:

$$b_1 = \frac{G_H}{\left(2\pi r_1 - z \frac{\delta_1}{\sin \beta_1}\right) C_1} = 0.00279 \text{ м.}$$

Кут між абсолютною  $C_2$  на виході з колеса і окружною швидкістю  $u_2$ :

$$\alpha_2 = 8 \dots 12 = 10^\circ.$$

Кут між відносною швидкістю  $\omega_2$  і продовженням вектору швидкості  $u_2$ :

$$\beta_2 = 10 \dots 50 = 20^\circ.$$

Гідравлічний ККД насосу:

$$\eta_r = 0,6 \dots 0,7 = 0,65.$$

Окружна швидкість на виході колеса:

$$u_2 = \sqrt{1 + \operatorname{tg} \alpha_2 \operatorname{ctg} \beta_2} \sqrt{\frac{H_H}{\eta_D 10^3}} = 1,474 \text{ м/с.}$$

Коефіцієнт бистрохідного насосу:

$$n_s = 140 \dots 300 = 140.$$

Частота обертів колеса:

$$n_r = 0,275(H_H 10^4)^{0,75} \frac{n_s}{\sqrt{G_H}} = 210 \text{ хв}^{-1}.$$

Радіус колеса на виході:

$$r_2 = \frac{30u_2}{\pi n_H} = 0,067 \text{ м.}$$

Окружна швидкість на вході колеса:

$$u_1 = u_2 \frac{r_1}{r_2} = 1,046 \text{ м/с.}$$

Радіальна швидкість на виході колеса:

$$C_{2r} = \frac{H_H}{u_2 \eta_D 10^3} = 0,175 \text{ м/с.}$$

Абсолютна швидкість на виході колеса:

$$C_2 = \frac{C_{2r}}{\sin \alpha_2} = 1,008 \text{ м/с.}$$

Відносна швидкість на виході колеса:

$$\omega_2 = \frac{C_{2r}}{\sin \beta_2} = 0,511 \text{ м/с}$$

Відносна швидкість на вході колеса:

$$\omega_1 = \frac{C_{1r}}{\sin \beta_1} = 0,614 \text{ м/с}$$

Товщина лопатки на виході:

$$\delta_2 = \delta_1 = 0,005 \text{ м.}$$

Ширина лопатки на виході:

$$b_2 = \frac{G_H}{\left(2\pi r_2 - z \frac{\delta_2}{\sin \beta_2}\right)} = 0,0184 \text{ м.}$$

Коефіцієнт стиснення:

$$k = 1 \dots 1,5 = 1,5.$$

Крок лопаток на вході:

$$t_1 = \frac{2\pi r_1}{z} = 0,0374 \text{ м.}$$

Товщина лопатки на вході:

$$\delta_1 = t_1 \left(1 - \frac{1}{k}\right) \sin \beta_1 = 0,00405 \text{ м.}$$

Крок лопаток на виході:

$$t_2 = \frac{2\pi r_2}{z} = 0.0526 \text{ м.}$$

Товщина лопатки на виході:

$$\delta_2 = t_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right) \sin \beta_2 = 0,006 \text{ м.}$$

Середня товщина лопаток:

$$\delta_{CP} = \frac{G_H H_H}{\eta_H 10^3} = 0,00503 \text{ м.}$$

Споживана потужність насосу:

$$N_H = \frac{G_H H_H}{\eta_H 10^3} \text{ кВт.}$$

Таким чином наведено розрахунок параметрів насосу системи охолодження лазерної CO<sub>2</sub> трубки.

## 4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ ЛАЗЕРНОГО ВЕРСТАТА

### 4.1 Розробка програми

У якості основи для подальшої розробки програмного забезпечення обрано Marlin Firmware. Причиною такого вибору є повна відкритість коду та широкі можливості для модернізації програмного коду. Дане програмне забезпечення є основою для подальшої розробки різноманітних ЧПУ верстатів: 3D принтерів, портальних фрезерних верстатів, лазерних граверів. Marlin Firmware підтримує різноманітні кінематики та режими обробки. Крім того дане програмне забезпечення є у вільному доступі. Налаштування Marlin буде проводитись у Arduino IDE, тому

На першому етапі необхідно обрати тип плати керування (рис. 4.1). Як вже була вказано у другому розділі, у якості плати керування обрано Arduino Mega та «шілд» RAMPS. Таким чином необхідно обрати цей тип плати керування.

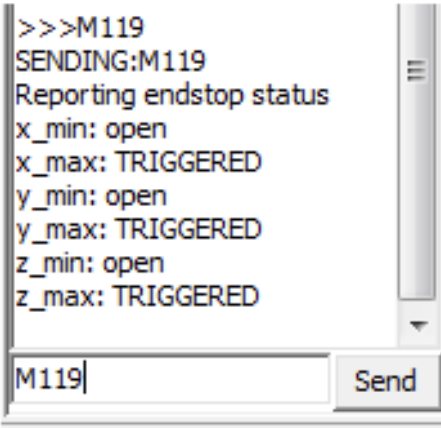
```
#define BOARD_RAMPS_OLD      3    // MEGA/RAMPS up to 1.2
#define BOARD_RAMPS_13_EFB   33   // RAMPS 1.3 / 1.4 (Power outputs: Extruder, Fan, Bed)
#define BOARD_RAMPS_13_EEB   34   // RAMPS 1.3 / 1.4 (Power outputs: Extruder0, Extruder1, Bed)
#define BOARD_RAMPS_13_EFF   35   // RAMPS 1.3 / 1.4 (Power outputs: Extruder, Fan, Fan)
#define BOARD_RAMPS_13_EEF   36   // RAMPS 1.3 / 1.4 (Power outputs: Extruder0, Extruder1, Fan)
#define BOARD_DUEMILANOVE_328P 4    // Duemilanove w/ ATmega328P pin assignments
#define BOARD_GEN6           5    // Gen6
#define BOARD_GEN6_DELUXE    51   // Gen6 deluxe
#define BOARD_SANGUINOLOLU_11 6    // Sanguinololu < 1.2
#define BOARD_SANGUINOLOLU_12 62   // Sanguinololu 1.2 and above
#define BOARD_MELZI          63   // Melzi
#define BOARD_STB_11         64   // STB V1.1
#define BOARD_AZTEEG_X1      65   // Azteeg X1
#define BOARD_MELZI_1284     66   // Melzi with ATmega1284 (MaKr3d version)
#define BOARD_AZTEEG_X3      67   // Azteeg X3
#define BOARD_AZTEEG_X3_PRO  68   // Azteeg X3 Pro
#define BOARD_ULTIMAKER      7    // Ultimaker
```

Рисунок 4.1 – Вибір плати керування

Для цього в configuration.h необхідно вказати:

```
#ifndef MOTHERBOARD
#define MOTHERBOARD BOARD_RAMPS_13_EFB
#endif
```

Наступним кроком необхідно вказати особливості розташування кінцевих вимикачів і їх тип. У разі необхідності, якщо датчики розташовані нестандартно, їх можна інвертувати у програмному забезпеченні. Для перевірки спрацювань датчиків використовується команда M119. Таким чином перевіряється стан кінцевих вимикачів false або true: розімкнутий або замкнений стан датчика (рис. 4.2, рис. 4.3). Перевірка виконується у програмному забезпечення для калібрування верстатів з ЧПУ, наприклад Pronterface. Результати перевірки мають наступний вигляд:



```
>>>M119
SENDING:M119
Reporting endstop status
x_min: open
x_max: TRIGGERED
y_min: open
y_max: TRIGGERED
z_min: open
z_max: TRIGGERED
```

Рисунок 4.2 – Замкнений стан кінцевих вимикачів

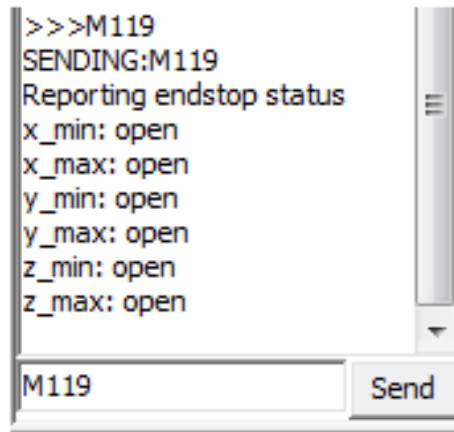


Рисунок 4.3 – Розімкнений стан кінцевих вимикачів

Для оптичних кінцевих вимикачів, які обрано для даного верстата, розімкнений стан кінцевих вимикачів відповідає розташуванню рухомих елементів верстата у нульовій координаті – «домашньому» положенні.

Вказується оптичний тип кінцевих вимикачів наступним чином:

```
const bool X_MIN_ENDSTOP_INVERTING = false;
const bool Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING = false;
const bool Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING = false;
const bool X_MAX_ENDSTOP_INVERTING = false;
const bool Y_MAX_ENDSTOP_INVERTING = false;
const bool Z_MAX_ENDSTOP_INVERTING = false;
```

«False» про інвертованість фізичного принципу роботи оптичних кінцевих вимикачів.

Далі необхідно вказати напрям руху крокових двигунів осей X, Y та Z (спосіб підключення обмоток крокових двигунів до плати керування):

```
#define INVERT_X_DIR true
#define INVERT_Y_DIR true
#define INVERT_Z_DIR true
```

У випадку коли крокові двигуни рухаються у протилежному напрямі їх також можна інвертувати.

На наступному етапі вказується розташування кінцевих вимикачів на робочій площині верстата, тобто у якому куті вони знаходяться.

```
/ Sets direction of endstops when homing; 1=MAX, -1=MIN
```

```
#define X_HOME_DIR 1
```

```
#define Y_HOME_DIR 1
```

```
#define Z_HOME_DIR 1
```

Таким чином прописується «домашнє» положення каретки сопла лазерного граверу. Воно може не співпадати із початком координат верстата.

Габаритні розміри робочого простору обмежуються двома способами. По-перше встановлюються мінімальні та максимальні кінцеві вимикачі. По-другу у прошивці вказуються розміри робочого простору: його мінімальні та максимальні координати. Відповідно до роботи, що присвячена розробці механічної частини лазерного верстата, робочий простір має наступні розміри: 1220 мм x 610 мм x 300 мм.

```
#define X_MAX_POS 610
```

```
#define X_MIN_POS 0
```

```
#define Y_MAX_POS 1220
```

```
#define Y_MIN_POS 0
```

```
#define Z_MAX_POS 300
```

```
#define Z_MIN_POS 0
```

Далі необхідно визначити швидкості переміщення рухомих частин лазерного граверу у домашнє положення. Данні вказані у міліметрах за хвилину.

```
#define HOMING_FEEDRATE {3000, 2000, 600} // set the homing speeds  
(mm/min)
```

Швидкості обрани виходячи з масогабаритних особливостей кожної із осей. Так каретка осі X є найбільш легкою, тому швидкість обрано 3000 мм/хв. Рухома частина осі Y має більшу вагу тому швидкість обмежена 2000

мм/хв. Ось Z є найбільш важкою, довжина осі найменша і тому швидкість обмежена 600 мм/хв.

Наступним вкрай важливим параметром, що необхідно налаштувати, є налаштування кроків переміщення по кожній осі.

У прошивці це налаштування виглядає наступним чином:

```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {400,400,6400} // default
steps per unit
```

Цифри у лапках це параметри кроків для осей X, Y, Z та подачі пластику відповідно.

Різні типи передач рахуються різним чином.

Ременні передачі (осі X та Y) розраховуються за формулою:

$$step\_per\_unit = \frac{ab}{zs}, \quad (4.1)$$

де a – кількість кроків крокового двигуна на 360 °, a = 200;

b – режим роботи мікрокрокового режиму, залежить від драйверу. Для драйверу LV8729 b = 128;

z – крок ременю, для обрано ременю z = 2 мм;

s – кількість зубців привідного шківів, для обох осей s = 32.

Передача ШВП (ось Z) розраховуються за формулою:

$$step\_per\_unit = \frac{ab}{km}, \quad (4.2)$$

де k – крок різьби, k = 4 мм;

m – кількість заходів різьби, m = 1.

Наступне налаштування максимальної швидкості і налаштування переміщення робочого ходу лазерного граверу:

```
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {400, 350, 5}
```

```
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {1000,800,3}
```

Принцип вибору швидкостей той самий що і для налаштування швидкостей переміщення у домашнє положення.

Далі необхідно налаштувати зовнішній інтерфейс керування лазерним гравером – екран RepRapDiscount Smart Controller.

```
#define ULTRA_LCD
```

```
#define SDSUPPORT
```

```
#define ULTIPANEL
```

```
#define REPRAP_DISCOUNT_SMART_CONTROLLER
```

Наведено основні налаштування програмного забезпечення.

## 4.2 Охорона праці

Основні види работ під час виконання атестаційної роботи виконувались на персональному комп'ютері. Тому у даному розділі розглянуті питання, що пов'язані із охороною праці при роботі за комп'ютером.

Шкідливими факторами при роботі на комп'ютері можуть бути такі:

- електромагнітні поля (ЕМП);
- акустичний шум;
- вібрації;
- аероіонний склад повітря;
- мікроклімат;
- освітленість;
- шкідливі речовини у повітрі;
- візуальні показники відеомоніторів;
- електробезпека;
- пожежна безпека.

Для обмеження негативного впливу на організм людини, рекомендується, щоб усі перелічені параметри лежали в межах допустимих значень.

Тимчасові допустимі рівні (ТДР) ЕМП, створюваних ПЕОМ на робочих місцях, не повинні перевищувати значень, представлених у таблиці 4.1. У таблиці 4.2. наведено засоби захисту від випромінювань оптичного діапазону та ЕМП ПЕОМ.

Допустимі рівні звукового тиску, створюваного ПЕОМ, не повинен перевищувати 50 дБа.

Конструкція використовуваного ПЕОМ забезпечує можливість повороту корпусу горизонтальній площині з фіксацією в заданому положенні для забезпечення фронтального спостереження екрана відеомонітора. Корпус ПЕОМ має матову поверхню і немає деталей, здатних створювати відблиски. Конструкція відеомонітора передбачає регулювання яскравості та контрастності.

Таблиця 4.1 – ТДР, що створювані ПЕОМ

Параметр		ТДР ЭМП
Напруженість електричного поля	у діапазоні частот 5 Гц ... 2 кГц	25 В/м
	у діапазоні частот 2 кГц ... 400 кГц	2,5 В/м
Щільність магнітного потоку	у діапазоні частот 5 Гц ... 2 кГц	250 нТл
	у діапазоні частот 2 кГц ... 400 кГц	25 нТл
Електростатичний потенціал екрану відеомонітора		500 В
Напруженість електростатичного поля		15 кВ/м

Таблиця 4.2 – Засоби захисту від випромінювань оптичного діапазону та ЕМП ПЕОМ

Засіб профілактики несприятливого впливу ПЕОМ	Профілактична дія, що виявляється
Приєкранні захисні фільтри для відеомоніторів	Знижують рівень напруженості електричного та електростатичного поля, підвищують контрастність зображення, зменшують відблиски.
Нейтралізатори електричних полів промислової частоти	Знижують рівень електричного поля промислової частоти (50 Гц)
Окуляри захисні зі спектральними фільтрами ЛЗ та НСФ	Профілактика комп'ютерного зорового синдрому, покращення візуальних показників відеомоніторів, підвищення працездатності, зниження зорової втоми

Концентрації шкідливих речовин, що виділяються ПЕОМ у повітря приміщень у процесі роботи, не перевищують гранично допустимих концентрацій (ГДК), встановлених для повітря робочої зони.

Вікна у приміщенні, де передбачається експлуатувати систему, спрямовані північ і захід. Усі віконні отвори обладнані жалюзі.

Площа на робоче місце користувачів ЕОМ повинна становити не менше 4,5 м<sup>2</sup>. У цьому приміщенні площею 50 м<sup>2</sup> будуть розміщені робочі місця для п'яти осіб, що відповідає нормі. Допустимі візуальні параметри відеомонітора вказані в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Допустимі візуальні параметри відеомонітора

Параметри	Допустимі значення
Яскравість білого поля	Не менше 35 кд/м <sup>2</sup>
Нерівномірність яскравості робочого поля	Не більше $\pm 20 \%$
Контрастність (для монохромного режиму)	Не менше 3:1
Частота оновлення зображення	Не менше 60 Гц
Просторова нестабільність зображення (ненавмисні зміни положення фрагментів зображення на екрані)	Не більше $2 \times 1E(-4L)$ , де L – проектна відстань спостереження, мм

За вимогами приміщення, де розміщуються робочі місця з ПЕОМ, повинні бути обладнані захисним заземленням (зануленням). Крім того, в приміщенні буде присутній перетворювач напруги (блок живлення), підключений до промислової мережі 380, що дає на виході 0..40 В.

У приміщенні повинні забезпечуватись оптимальні параметри мікроклімату для категорії робіт відповідно до чинних санітарно-епідеміологічних нормативів мікроклімату виробничих приміщень.

Робочі столи в приміщенні слід розміщувати таким чином, щоб відеодисплейні термінали (ВДТ) були орієнтовані бічною стороною до світлових прорізів, щоб природне світло падало переважно зліва.

Штучне освітлення у приміщеннях здійснюватиметься системою загального рівномірного освітлення. Освітленість, яскравість, блискітність, розподіл яскравості регулюються.

Як штучні джерела світла будуть застосовуватися люмінесцентні лампи з розсіювачами або решітками, що екранують, укомплектовані електронними пуско-регулюючими апаратами. Загальне освітлення має бути виконане у вигляді суцільних або уривчастих ліній світильників, розташованих локалізовано над робочим столом ближче до його переднього краю, зверненого до оператора (рис 4.4).

Коефіцієнт запасу для освітлювальних установок загального освітлення прийнято дорівнює 1,4. Коефіцієнт пульсації не повинен перевищувати 5 %.

Для забезпечення нормованих значень освітленості в приміщеннях для використання ПЕОМ слід проводити чистку шибок віконних рам і світильників не рідше двох разів на рік і проводити своєчасну заміну ламп, що перегоріли.

Відстань між робочими столами з відеомоніторами (у напрямку тилу поверхні одного відеомонітора та екрана іншого відеомонітора) має бути не менше 2,0 м, а відстань між бічними поверхнями відеомоніторів – не менше 1,2 м. Екран відеомонітора повинен знаходитись від очей користувача на відстані 600 мм – 700 мм, але не ближче 500 мм з урахуванням розмірів алфавітно-цифрових знаків та символів. Конструкція робочого стільця (крісла) повинна забезпечувати підтримку раціональної робочої пози під час роботи на ПЕОМ, дозволяти змінювати позу з метою зниження статичного напруги м'язів шийно-плечової області та спини попередження розвитку втоми. Для плану, зображеного на рисунку 4.4, ці вимоги можна здійснити [11].

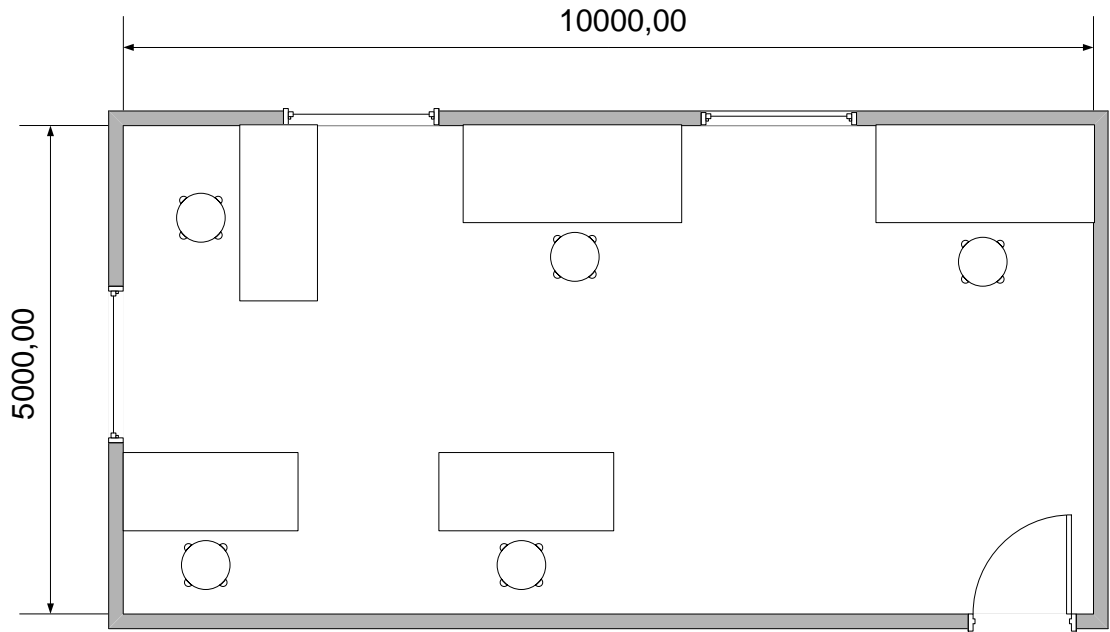


Рисунок 4.4 – План приміщення

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи бакалавра розроблено електричну частину лазерного граверу. Проведено аналіз існуючих типів лазерів, що використовуються у виробництві, в результаті чого обрано тип лазерного модулю – CO<sub>2</sub> потужністю 80 Вт. Розроблено блок-схему керування лазерним ЧПУ верстатом та обрано компоненти та деталі для її реалізації. У якості лазерного модулю обрано лазерну трубку RECI W1, інші компоненти обрано до цього лазерного модулю.

У якості плати керування обрано Arduino Mega та додаткову плату RAMPS. Вона повністю відповідає вимогам роботи верстата у декартових координатах, дозволяє підключити кінцеві вимикачі, крокові двигуни з драйверми та керувати високовольтним блоком накачки лазерної трубки.

У четвертому розділі наведено розрахунок системи рідинного охолодження лазерної трубки – «чиллера». Наведено розрахунок всіх основних параметрів.

Також проведено налаштування програмного забезпечення лазерним гравером на базі Marlin Firmware.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.
2. Невлюдов І.Ш. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» : Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарева, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків: ХНУРЕ, 2023 . – 150 с
3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, О.В. Токарева, С.П. Новоселов, О.В Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2023. 64 с.
4. Hilton, Paul A. "Handbook of Laser Welding Technologies." Woodhead Publishing, 2019, 237 p;
5. Steen, William M., and Jyotirmoy Mazumder. "Laser Material Processing." 4th ed., CRC Press, 2020, 457 p;
6. Pique, Alberto, and David B. Geohegan. "Laser Direct Writing of Functional Materials: Synthesis, Characterization, and Applications." Wiley, 2018.
7. Groover, Mikell P. "Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing." 4th ed., Pearson, 2017.
8. Smid, Peter. "CNC Programming Handbook." Industrial Press, 2019.

9. Лазерна трубка CO<sub>2</sub> – серія W // reci, 2024. URL: <https://www.reci-laser.com/co%e2%82%82-laser-tube/co%e2%82%82-laser-tube-w-series/> (дата звернення: 15.05.2024).

10. Джерело живлення лазера // Yongli, 2024. URL: <https://www.yl-laser.com/en/index.php/b/63.html> (дата звернення: 17.05.2024).

11. Каштанов, С., Демчук, Г., Татарин, Р., & Ситницький, А. (2022). Сучасні вимоги безпеки при застосуванні лазерних технологій. Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки, 74-79.