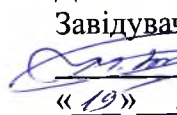


**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет  
Кафедра виробництва приладів**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Михайло БЕЗУГЛИЙ

« 19 » 06 2023 р.

**Дипломний проєкт  
на здобуття ступеня бакалавра  
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані  
технології виробництва приладів»  
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані  
технології»  
на тему: «Автоматизована система лазерного контролю обробки  
деталей»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПБ-92

Селюк Даніл Сергійович

Керівник:

Асистент

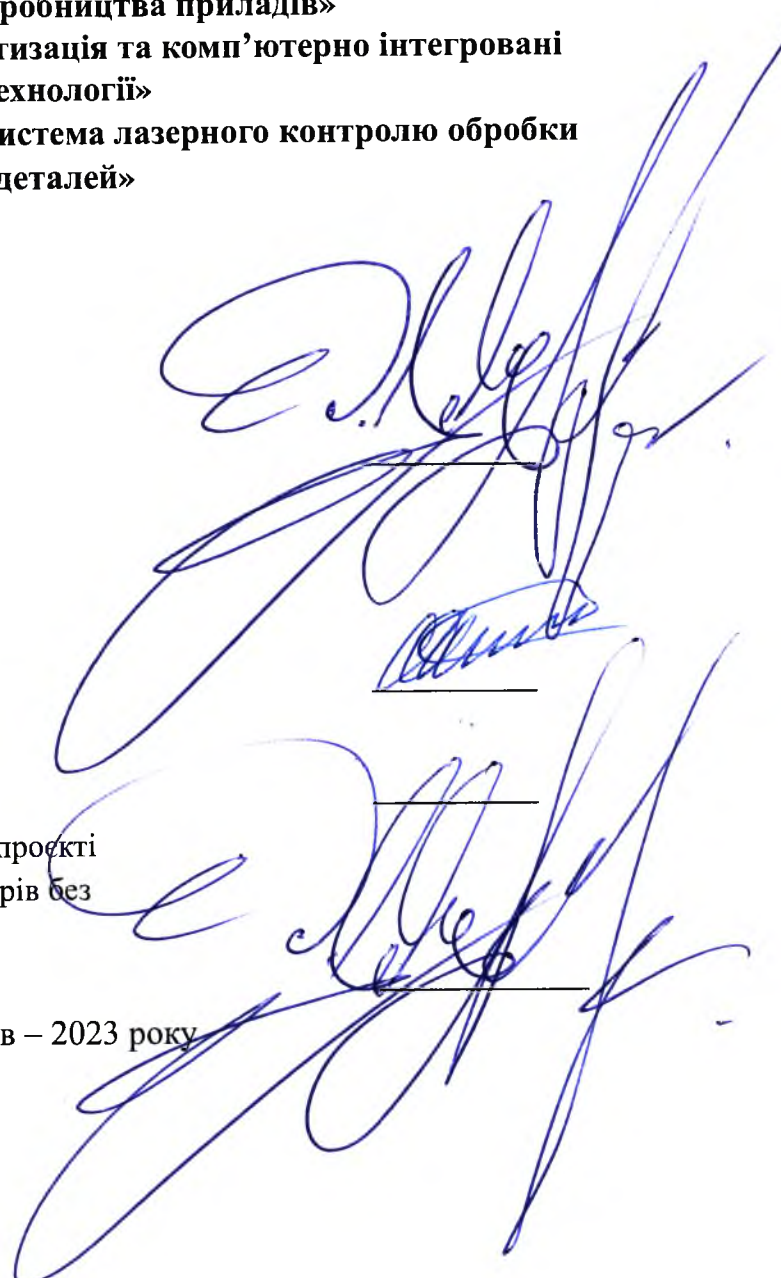
Сорока Сергій Олександрович

Рецензент:

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

Студент

Київ – 2023 року



**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра виробництва приладів**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 **Михайло БЕЗУГЛИЙ**

« 23 » 02 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проект студенту Селюку Данілу Сергійовичу**

1. Тема роботи **«Автоматизована система лазерного контролю обробки деталей»**, керівник роботи Сорока Сергій Олександрович, затверджені наказом по університету від «30» 05 2023 р. №2057
2. Термін подання студентом роботи 5 червня 2023 р.
3. Вихідні дані до роботи: документація до приладу(системи ,блока, датчика), проектний блок з датчиком, технічне завдання на проектування.
4. Зміст пояснювальної записки : Вступ, Анотація, 1. Конструкторська частина. 1.1.Основні параметри та характеристики лазерного випромінювання. 1.2. Методи вимірювання геометричних параметрів об'єктів. 1.3. Технологія сканування лазерним променем. 1.3.1. Механічні сканери. 1.3.2 Гальванометричне дзеркало. 1.3.3 Обертова призма. 1.3.4 Акустооптичні дефлектори. 1.3.5 Електрооптичні дефлектори. 1.4. Структурна та функціональна схема автоматизованої системи лазерно-світлового сканування. 1.5. Алгоритм роботи. 1.6. Напрями

автоматизації. 1.7. Розрахунок параметрів лазерного випромінювання системи. 2. Технологічна частина. 2.1. Розрахунок на технологічність. 2.2. Розробка структурної схеми складання сканера апарату. 2.3. Розробка технологічної схеми складання сканера апарату. Висновок.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Функціональна схема лазерного вимірювача, Структурна схема лазерного вимірювача, Алгоритм роботи системи керування, Схема ступенів складання лазерного вимірювача, Технологічна схема складання лазерного вимірювача, Лазерний вимірювач складальне креслення, Деталювання.

6. Дата видачі завдання 03 березня 2023 року.

#### Календарний план

| № п/п | Назва етапів практичної роботи                         | Строк виконання етапів практичної роботи) | Примітки |
|-------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------|
|       | Видача та узгодження завдання.                         | 03.03.2023                                | виз      |
| 1.    | Аналіз предметної області                              | 15.03.2023                                | виз      |
| 2.    | Аналіз існуючих рішень                                 | 22.03.2023                                | виз      |
| 3.    | Розробка та опис функціонування системи                | 15.04.2023                                | виз      |
| 4.    | Опис конструктивних елементів для виготовлення системи | 25.04.2023                                | виз      |
| 5.    | Вибір стандартних елементів для функціонування системи | 05.05.2023                                | виз      |
| 6.    | Оформлення проєкту                                     | 03.06.2023                                | виз      |
| 7.    | Подання готового проєкту                               | 09.06.2023                                | виз      |

Студент

Керівник

Селюк Даніл

Сорока Сергій

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

| № з/п | Формат | Позначення                    | Найменування                                      | Кількість листів | Примітка   |
|-------|--------|-------------------------------|---------------------------------------------------|------------------|------------|
| 1     | A4     |                               | Завдання на дипломний проект                      | 2                | <i>вск</i> |
| 2     | A4     | ДПБ.ПБ-92.12.1702.002.000.ПЗ  | Пояснювальна записка                              | 58               | <i>вск</i> |
| 3     | A4     | ДПБ.ПБ-92.12.1702.002.001.СхФ | Функціональна схема лазерного вимірювача          | 1                | <i>вск</i> |
| 4     | A4     | ДПБ.ПБ-92.12.1702.002.002.СхС | Структурна схема лазерного вимірювача             | 1                | <i>вск</i> |
| 5     | A2     | ДПБ.ПБ-92.12.1702.002.003.СхА | Алгоритм роботи системи керування                 | 1                | <i>вск</i> |
| 6     | A4     | ДПБ.ПБ-92.12.1702.002.004.ССС | Схема ступенів складання лазерного вимірювача     | 1                | <i>вск</i> |
| 7     | A2     | ДПБ.ПБ-92.12.1702.002.005.ТСС | Технологічна схема складання лазерного вимірювача | 1                | <i>вск</i> |
| 8     | A3     | ДПБ.ПБ-92.12.1702.002.006.СК  | Лазерний вимірювач складальне креслення           | 1                | <i>вск</i> |

|           |               |       |      |                                                                       |  |  |
|-----------|---------------|-------|------|-----------------------------------------------------------------------|--|--|
|           |               |       |      | ДПБ.ПБ92.12.1702.000.ПЗ                                               |  |  |
|           | ПЗ            | Підп. | Віта | Відомість<br>дипломного проекту                                       |  |  |
| Розробник | Селюк Д.С.    |       |      |                                                                       |  |  |
| Керівник  | Сорока С.О.   |       |      |                                                                       |  |  |
| Консульт. |               |       |      |                                                                       |  |  |
| Н/контр.  |               |       |      |                                                                       |  |  |
| Зав. каф. | Безуглий М.О. |       |      | Лист 1 Листів 58<br>КПІ ім. Ігоря Сікорського<br>Каф. ВП<br>Гр. ПБ-92 |  |  |

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ОНК – оптичний неруйнівний контроль;

ЛВЛР – лазерні вимірювачі лінійних розмірів;

ЛТВ – лазерні тріангуляційні вимірювачі;

ЛССП - Лазерні системи скануючого променя;

АСУ – автоматизована система управління;

ОК – об’єкт контролю;

ЛТВ – лазерний тріангуляційний вимірювач;

НВЧ-діапазон – надвисокочастотний діапазон;

## АНОТАЦІЯ

В роботі було розроблено систему вимірювання та аналізу розмірів деталей при обробці токарним методом. Для досягнення мети було проаналізовано необхідні параметри лазерного випромінювання, розглянуто методи вимірювання розмірів деталей при токарній обробці. В результаті було обрано схему вимірювання.

Визначено недоліки та запропоновано нові інженерні рішення.

В конструкторському розділі було побудовано структурну схему системи лазерного сканування та виконано складальне креслення. В результаті аналізу роботи приладу, було розроблено функціональну схему та алгоритм функціонування автоматизованої системи вимірювання параметрів деталі.

В технологічному розділі розроблено технологію складання приладу.

Результати даної роботи дозволять покращити контроль виготовлення деталі та автоматизувати робочий процес.

Ключові слова: ЛАЗЕР, СИСТЕМА СКАНУВАННЯ, ОПТИЧНА СИСТЕМА.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ВСТУП</b>                                                                                                   | <b>8</b>  |
| <b>1. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА</b>                                                                              | <b>9</b>  |
| 1.1. Основні параметри та характеристики лазерного випромінювання                                              | 9         |
| 1.2. Методи вимірювання геометричних параметрів об'єктів                                                       | 15        |
| 1.2.1 Класифікація лазерних вимірювачів лінійних розмірів (ЛВЛР)                                               | 17        |
| 1.2.2 Лазерне вимірювання лінійних розмірів з використанням методу сканування зображення.                      | 17        |
| 1.2.3 Лазерні системи скануючого променя (ЛССП)                                                                | 18        |
| 1.2.4 Лазерні вимірювачі лінійних розмірів з використанням вимірювання часу розповсюдження світлових сигналів. | 24        |
| 1.2.5 Лазерні вимірювачі лінійних розмірів із модуляцією лазерного випромінювання.                             | 26        |
| 1.2.6 Лазерний телевізійний проектор світлового перерізу.                                                      | 27        |
| 1.3. Технологія сканування лазерним променем.                                                                  | 28        |
| 1.3.1. Механічні сканери                                                                                       | 29        |
| 1.3.2 Гальванометричне дзеркало.                                                                               | 29        |
| 1.3.3 Обертова призма.                                                                                         | 31        |
| 1.3.4 Акустооптичні дефлектори.                                                                                | 32        |
| 1.3.5 Електрооптичні дефлектори.                                                                               | 34        |
| 1.4. Структурна та функціональна схема автоматизованої системи лазерно сканування.                             | 36        |
| 1.5. Алгоритм роботи.                                                                                          | 37        |
| 1.6. Напрями автоматизації.                                                                                    | 39        |
| 1.7. Розрахунок параметрів лазерного випромінювання системи.                                                   | 43        |
| <b>2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА</b>                                                                                 | <b>46</b> |
| 2.1. Розрахунок на технологічність.                                                                            | 46        |
| 2.2. Розробка структурної схеми складання сканера.                                                             | 50        |
| 2.3. Розробка технологічної схеми складання сканера.                                                           | 52        |
| <b>ВИСНОВКИ</b>                                                                                                | <b>54</b> |
| <b>БІБЛІОГРАФІЯ</b>                                                                                            | <b>55</b> |

## ВСТУП

Контроль в реальному часі процесу виготовлення деталі у виробництві відіграє все більш важливу роль у сучасних виробничих процесах. Впровадження систем лазерного скануванням у виробничий процес дозволяє провести контроль розмірів та виявляє дефекти в процесі виробництва. Таким чином, система може застосовуватися в різних температурних умовах, забезпечувати високу якість контролю і може бути легко адаптована до вимог автоматизованого динамічного контролю. Освітлення монохроматичним лазерним світлом дозволяє збільшити роздільну здатність системи, використати частотну фільтрацію. Використання скануючої системи передбачає, що одна точка аналізується один раз в певному напрямку.

Скануюча лазерна система використовує обертовий елемент для відображення або заломлення лазерного променя через зону вимірювання яка перпендикулярна вісі обертання об'єкта. Частина об'єкту (деталі) перериває лазерний промінь, створюючи тінь, що дозволяє в певний момент часу контролювати розмір деталі. Інтегрована в приймач оптична система збирає лазерні промені які оминають деталь і фокусується на фотоелементі. Вихідний сигнал з фотоелементу аналізується, що дає змогу визначити крайні точки оброблюваної деталі. Для аналізу використовується програмне забезпечення, яке в реальному часі дає змогу контролювати параметри деталі.

# **1. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА**

## **1.1. Основні параметри та характеристики лазерного випромінювання**

Лазер — це пристрій, який виробляє та підсилює світло. Абревіатура LASER означає Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (підсилення світла шляхом стимуляції випромінювання). Слово «світло» відноситься до ультрафіолетового, видимого або інфрачервоного електромагнітного випромінювання, з яких світло є окремим випадком. Ключові слова в абревіатурі це — підсилення стимульованим випромінюванням. Лазер підсилює світло за допомогою явища стимульованого випромінювання. Більшість, але не всі, лазери також є осциляторами, оскільки оптичний резонатор використовується для забезпечення зворотного зв'язку та накопичення енергії. Лазерне світло має багато переваг перед звичайним джерелом світла. Кілька ключових властивостей лазерного світла гарантують, що лазери є такими корисними інструментами в неймовірній різноманітності застосувань. Основними властивостями, що викликають занепокоєння в промислових застосуваннях, є яскравість, спрямованість, монохроматичність, когерентність і різні форми випуску[1].

### **Потужність випромінювання.**

Випромінювання джерела світла — це потужність, яка вимірюється одиницею площі джерела на одиницю кута. Одиниця вимірювання — Вт, помножений на квадратний метр, поділений на стерadian. Стерadian — це одиниця тілесного кута, який є тривимірним аналогом традиційного двомірного кута, виражений у радіанах.

Яскравість подібна до потужності випромінювання, за винятком того, що враховується реакція стандартного ока, і тому застосовується лише до видимого світла. Одиницями вимірювання є люмен на одиницю площі на

одиницю тілесного кута. Люмен — це фотометричний еквівалент радіометричної одиниці (абсолютної одиниці потужності), Вт. Поле фотометрії враховує реакцію ока, тоді як радіометрія має справу з абсолютними фізичними величинами. Однак звичайною практикою є лише мати справу з радіометричними величинами.

Лазери, як правило, мають надзвичайно високу вихідну потужність. Наприклад, гелієво-неоновий лазер із вихідною потужністю 1 мВт матиме діаметр вихідної плями приблизно 1 мм і розбіжність променя приблизно 1 мрад. Сяйво сонця, навпаки, становить лише  $13 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>/стерадіан, навіть якщо сонце випромінює потужність  $4 \cdot 10^{26}$  Вт.

Опромінюваність — це потужність на одиницю площі, що падає на поверхню в даній точці. Для зручності одиниці зазвичай подаються у ватах на квадратний сантиметр (Вт/см<sup>2</sup>).

### **Кут розходження**

Кожен бачив рекламні прожектори в цирках і на великих заходах. Їхні промені світла проникають у небеса. Хоча ці прожектори створюють промені, які не надто розширюються на сотні метрів, лазерний промінь такого самого розміру поширювався би на сотні кілометрів, не сильно розширюючись.

Кут розходження, як правило, вимірюється в мілірадіанах. Ця дуже мала розбіжність є результатом вимоги, що оптична система повинна зробити багато обертів, перш ніж вийти через частково пропускаюче дзеркало. Рух фотонів від дзеркала до резонатора, має бути щільно вирівняним з центральною його лінією і вони лише трохи розходяться, коли виходять з випромінювача. Але так само, як неможливо, щоб лазер був ідеально монохроматичним, неможливо для лазера виробляти нерозбіжний промінь світла, хоча розбіжність променю лазера може бути дуже малою у порівнянні зі світлом від інших джерел, завжди буде певна розбіжність.

По суті, промінь світла від лазера є вузьким конусом світла, який виходить із точки. Таким чином, геометрія не відіграє жодної ролі у фокусуванні лазерного променя, принаймні, не простого променя чи такого,

який просто було б розширено або зменшено в розмірі. Обмежуючим ефектом, є дифракція. Дифракція змушує колімовані пучки світла розходитися і викликає згинання світлових променів навколо гострих країв предметів. Це також обмежує розмір плями фокусування. Об'єктив із  $f$ -числом (співвідношення фокусної відстані лінзи до діафрагми або розміру променя), що дорівнює одиниці, сфокусує ідеальний лазер з обмеженою дифракцією у пляму, радіус якої приблизно дорівнює довжині хвилі світла. Зрозуміло, що лінза з фокусною відстанню 1 мм була б непрактичною, але якщо промінь розширюється до діаметра 1 см, то лінза з фокусною відстанню 1 см була б практичною та досягала б бажаного результату. Місця, де можуть знадобитися такі малі розміри плями, - це виробництво інтегральних схем, а також запис і читання оптичних носіїв даних, таких як лазерні відео або аудіодиски та оптична пам'ять для комп'ютерів.

### **Монохроматичність**

Термін монохроматичний буквально означає один колір або одну довжину хвилі. Щоб зрозуміти цю концепцію, розглянемо наступний процес. Оскільки скляна призма є дисперсійною, вона розділяє біле світло на його складові кольори. Смуга пропускання білого світла така ж широка, як і весь видимий спектр, близько 300 нанометрів (нм). Якщо номінально червоне світло падає на призму, воно також розділяється на свої номінальні довжини хвилі. Але в цьому випадку ширина смуги набагато менша, лише близько 10 або 20 нм. Призма створюватиме вузький діапазон кольорів, від темно-червоного до світло-червоного. Однак призма не матиме жодного помітного впливу на червоне лазерне світло, оскільки його смуга пропускання дуже мала в порівнянні з червоним світлом від фільтру.

Однак жодне джерело світла не може бути ідеально монохроматичним. Лазери, як правило, відносно монохроматичні, але це залежить від типу лазера. Монохроматичний вихід або стабільність високої частоти має велике значення для лазерів, які використовуються для інтерферометричних вимірювань, оскільки довжина хвилі є мірою довжини або відстані та має

бути відома з надзвичайною точністю та залишатися незмінною в часі. Те саме стосується лазерів, що використовуються в хімічних та багатьох інших наукових аналітичних програмах. Точне визначення довжини хвилі зазвичай не вважається важливим в обробці матеріалів, хоча деякі інфрачервоні довжини хвиль вважаються кращими для різання або свердління певних полімерів, але, як правило, в процесах, керованих тепловими ефектами, точний контроль довжини хвилі не є критичним. Однак, обробка полімерних матеріалів з довжиною хвилі ультрафіолетового випромінювання, таких як доступні в ексимерних лазерах, є зовсім іншою. У цьому випадку точне налаштування довжини хвилі для резонансу з молекулярним зв'язком значно підвищить ефективність видалення матеріалу. Абсолютна монохроматичність є недосяжною метою, до якої ми можемо наблизитися, лише вдосконаливши наші джерела світла.

### **Когерентність**

Когерентність — це власне розповсюдження корельованого типу просторі і в часі деякої кількості хвильових або коливальних випадкових процесів, що надає можливість генерувати при їх сумуванні інтерференційну картину високої чіткості. З іншого боку, некогерентне джерело світла більше створює хаотичне розходження, що еквівалентне броунівського руху елементарних часток. Лазери забезпечують джерело світла високої яскравості з високим ступенем когерентності. Ця комбінація недоступна для будь-якого іншого джерела світла.

Когерентний світловий промінь матиме три відмінні характеристики:

- 1 - однакова довжина хвилі;
- 2 – один і той же напрямок;
- 3 – одна і та сама фаза.

Довжина хвилі — це відстань між двома однаковими точками на хвилі. Усі світлові хвилі в лазерному промені мають однакову довжину хвилі. Фаза хвилі, у найбільш практичному розумінні, відноситься до її положення відносно іншої хвилі, якщо дві хвилі знаходяться в фазі, вони вишикувані в

просторі та часі. Якщо хвилі зміщені відносно одна одної, то вони зміщуються по фазі на задану величину. Більше того, світло від лазера демонструє як просторову, так і часову когерентність. Його просторова когерентність означає, що світло у верхній частині променя когерентне зі світлом у нижній частині променя. Чим далі ви можете рухатися поперек променя і все одно знаходити когерентне світло, тим більша просторова когерентність. Часова когерентність, з іншого боку, виникає коли дві хвилі у лазерному промені залишаються когерентними протягом тривалого часу, коли вони рухаються повз дану точку. Тобто вони залишаються у фазі один з одним протягом багатьох довжин хвиль.

Монохроматичне лазерне світло можна використовувати для дослідження структури атомів або контролю складних хімічних реакцій – оскільки воно когерентне. Спрямоване лазерне світло може транспортувати енергію на великі відстані або фокусувати цю енергію до дуже великої інтенсивності. Фазово узгоджене лазерне світло може створювати реалістичні тривимірні голограми або створювати ультракороткі імпульси світла, тривалість становить лише десяток або близько того оптичних циклів. Когерентне світло від лазера справді відрізняється від світла, випромінюваного будь-яким іншим джерелом.

### **Потужність і вихідна енергія**

Вихід лазерного променя може бути імпульсним або безперервним. Лазери, які використовуються для вирівнювання, вимірювань та інших малопотужних застосувань, зазвичай мають безперервний вихід, тоді як лазери для обробки матеріалів можуть бути або імпульсними, або безперервними. Деякі лазери можуть працювати як в імпульсному, так і в безперервному режимі.

### **Загальна класифікація лазерів**

На даний момент існує багато різних типів лазерів, доступних для промислового використання [2]. Застосування кожного типу залежить від

його конкретних характеристик. Короткий опис основних лазерів, які використовуються сьогодні, та їхні унікальні властивості наведено нижче.

### **Гелій-неонові лазери (HeNe)**

- Газовий лазер з електричною генерацією.
- Яскраво-червоний промінь на 632 8 нм, а також інфрачервоні лінії від 1 15 до 3 39  $\mu\text{m}$ .
- Електричний ККД зазвичай - 0 1%.
- Енергія передається від електронів до атомів HeNe, залишаючи їх у збудженому стані.
- Вихідна потужність коливається від часток від 1 мВт до 50 мВт.
- Ресурс роботи - від 15 000 до 20 000 годин.
- Найбільш поширеним механізмом відмови є розпад катода.
- Зазвичай використовується в касі супермаркетів, домашніх відеопрогравачах та лазерних принтерах.

### **Молекулярні лазери**

- Діють на рівнях обертальної, коливальної та електронної енергії молекул.
- Найбільш важливим з них є лазер  $\text{CO}_2$ , який заснований на вібраційній техніці.
- Здатність генерувати дуже високі середні потужності з відносно високою електричною ефективністю.
- Доступні комерційні лазери  $\text{CO}_2$  із середньою потужністю понад 20 кВт, а кіловатні лазери  $\text{CO}_2$  є звичайними.
- Їх електричний ККД може перевищувати 10%.
- Зазвичай використовується для різання, зварювання та термічної обробки матеріалів.
- Лазери  $\text{CO}_2$  також важливі в медицині та дослідженнях.

### **Твердотільні лазери**

- Лазерні атоми вбудовані в суцільний шматок прозорого матеріалу, який називається хостом.

- Найпоширенішими прикладами є Nd-YAG-лазери, лазери на Nd-склі та хром-рубіни.

- Оптична накачка забезпечує енергію для створення популяції інверсії.
- Зазвичай з водяним охолодженням.
- Найбільше застосування твердотільних лазерів у тактичній військовій техніці, де вони використовуються в далекомірах і цілевказівниках.

Також використовується в обробці матеріалів, медицині та наукових дослідженнях.

### **Напівпровідникові (діодні) лазери**

- Лазерний діод є з'єднанням матеріалів з р- та n-легуванням.
- Резонатор часто формують шляхом полірування торців напівпровідника.
- Вимушене випромінювання відбувається до того, як атом встигне втратити свою енергію іншим шляхом.
- Найбільш поширеним типом є GaAs лазер.
- Діапазон довжин хвиль від 0,33  $\mu\text{м}$  УФ до 40  $\mu\text{м}$  ІЧ.
- Виходи в діапазоні міліват.
- Діодні лазери є найбільш поширеними лазерами з існуючих.
- Вони маленькі, міцні та дешеві, але ще не потужні.
- Ймовірно, вони замінять газові лазери та лазери з оптичною накачкою в ряді застосувань у найближчому майбутньому.

## **1.2. Методи вимірювання геометричних параметрів об'єктів**

Застосування лазерів дозволяє не тільки підвищити точність, достовірність, швидкість вимірювань різних параметрів, але в ряді випадків дає можливість загалом здійснити кількісну оцінку характеристик багатьох складних процесів і явищ, істотно розширити межі традиційних оптичних методів контролю та створити принципово нові методи оптичного неруйнівного контролю, наприклад, голографічні, акустооптичні та ін.

Оптичний неруйнівний контроль (ОНК) з використанням лазерного випромінювання базується на застосуванні основних властивостей лазерного випромінювання – монохроматичності, високої спрямованості, високої потужності, малої тривалості імпульсу, високого ступеня поляризації, когерентності. Висока монохроматичність (вузький спектр частот) випромінювання лазера дозволяє широко використовувати методи спектральної селекції об'єктів. В даний час число випромінюваних лазером різних довжин хвиль досягло декількох сотень в УФ, ВІ та ІЧ діапазонах спектру. Створено лазери з плавною перебудовою довжини хвилі випромінювання [3].

Лазери випромінюють у дуже малих тілесних кутах, типовий кут розбіжності лазерного пучка становить близько 3 - 10 мрад. Така гостра спрямованість випромінювання забезпечує ефективність скануючих систем контролю віддалених об'єктів.

Можливість генерації за допомогою лазера світлових імпульсів гранично малої тривалості (до  $10^{-14}$  с) дозволяє реалізувати ефективні методики контролю динамічних характеристик об'єктів.

Випромінювання лазера зазвичай лінійно поляризоване. Для зміни характеру поляризації застосовують поляризатори та компенсатори різних типів (чверть хвильові пластинки тощо). Ця властивість лазерного випромінювання застосовується, зокрема, в ОНК об'єктів дуже малих товщин (тонкі плівки).

Випромінювання лазерів має властивість просторової та часової когерентності, тобто, регулярність коливань у просторі та часі. Просторова когерентність означає, що індуковане випромінювання атомів по всьому перерізу активного середовища відбувається в одній фазі світлової хвилі, при цьому її фронт близький до фронту плоскої хвилі. Для більшості серійних багатомодових лазерів довжина когерентності  $L = 0,1..0,5$  м, для кращих одномодових лазерів -  $L = 10..100$  м. Випромінювання лазера відбувається на

строго фіксованій частоті  $V$ , яка проте схильна до невеликих змін на величину  $\Delta V$  за рахунок флуктуацій процесу випромінювання.

### **1.2.1 Класифікація лазерних вимірювачів лінійних розмірів (ЛВЛР)**

У техніці вимірювання лінійних розмірів лазери застосовуються завдяки високій монохроматичності, великій довжині когерентності, хорошій стабільності напрямку променя, хорошій фокусованості, високій стабільності частоти (довжини хвилі), великій енергетичній яскравості. Наприклад, гелій-неоновий лазер, що найчастіше застосовується в ЛВЛР, з довжиною хвилі  $\lambda = 0,633$  мкм має довжину когерентності  $L \sim 10^3$  м, енергетичну яскравість  $L_e = 10^5$  Вт/(м<sup>2</sup>\*ср) і відносну відтворюваність довжини хвилі  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \sim 10^{-7} \div 10^{-11}$ .

Лазерні вимірювачі лінійних розмірів (ЛВЛР) поєднують у собі високу просторову роздільну здатність з великою швидкістю.

За методом вимірювання ЛВЛР діляться на системи з використанням:

- сканування зображення;
- вимірювання часу поширення;
- модуляції лазерного випромінювання;
- інтерферометрії;
- явища дифракції;
- явища поляризації.

### **1.2.2 Лазерне вимірювання лінійних розмірів з використанням методу сканування зображення.**

Ідея методу сканування зображення полягає в тому, об'єкт контролю проводять через лазерний промінь або, навпаки, по ньому сканують лазерним променем. Для визначення геометричних розмірів об'єкта служать межі тіла,

час затемнення або різні умови відображення, наприклад, кут відображення. За методом реєстрації ЛВЛР, що розглядаються, прийнято ділити на фотокомпенсаційні, фотостежні і фотоімпульсні, а за способом отримання та обробки вимірювальної інформації – лазерні системи біжучого променя і лазерні триангуляційні вимірювачі (ЛТВ).

### 1.2.3 Лазерні системи скануючого променя (ЛССП)

Принцип дії ЛССП заснований на скануванні об'єкта тонким лазерним променем, переміщення якого в просторі за даною траєкторією здійснюється за допомогою спеціального пристрою – сканер. Найбільш поширені оптико-механічні сканери, в яких керування променем у просторі здійснюється за допомогою рухомих дзеркал або лінз. Останнім часом знаходять застосування швидкодіючі електро- та акустооптичні сканери.

При знаходженні в зоні опромінення об'єкта, що вимірюється, останній перекриває лазерний промінь протягом певного інтервалу часу. Спеціальний приймальний пристрій визначає часовий інтервал бічних сторін тіні, що відкидається об'єктом, і передає ці дані на мікропроцесорний аналізатор, який і визначає розміри об'єкта. Прикладом ЛССП може бути лазерний діаметромір фірм SIRA (Англія) (рис. 1.1).

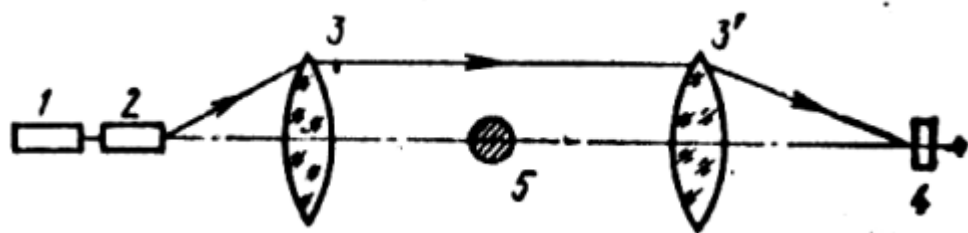


Рисунок 1.1 - Схема найпростішої ЛССП [4]

Прилад складається із сканера, фотоприймача та системи реєстрації. Промінь лазера 1 направляється на дзеркало 2, яке знаходиться у фокусі проєкційного об'єктива 3, і після об'єктива поширюється паралельно його осі.

При обертанні дзеркала промінь переміщується паралельно самому собі, перетинає контрольований виріб 5 і надходить після лінзи 3 на фотоприймач 4. У приладі використаний оптико-імпульсний спосіб вимірювання, тобто тривалість імпульсу фотоприймача пропорційна розміру виробу. Діапазони контрольованих діаметрів 0,01 – 0,5 мм та 1 – 70 мм, похибка 0,1%, частота сканування 50 Гц. Вихідний сигнал перетворюється на цифрову форму і надходить у систему сигналізації або автоматизовану систему управління (АСУ). Подібні сканери можуть виконуватися і двокоординатними.

ЛССП застосовують з метою оцінки абсолютних значень розміру, і навіть відхилень розмірів від номінальних. З їх допомогою можна визначати розміри та відхилення декількох деталей, контролювати установку та знос інструменту, оцінювати некруглість або биття круглих деталей.

ЛССП можуть використовуватися автономно або вбудовуватися в автоматизовані комплекси. При цьому відстань між лазерним блоком та приймальним пристроєм може досягати двох метрів, що дозволяє оцінювати з високою точністю (до 0,25 мкм) досить великі розміри.

Завдяки безконтактності методу вимірювання може проводитися в ході технологічного процесу без його зупинки. Ця обставина особливо важлива, наприклад, при необхідності контролю розпечених скляних виробів (волокон, стрижнів, труб і т.д.) у процесі їх отримання. Шляхом вимірювання часу затінення лазерного променя об'єктом контролю проводиться також вимірювання діаметра гарячих (900°C) сталевих труб під час технологічного циклу; вимірювання діаметрів дротяних канатів; вимірювання при шліфуванні круглих сталей; визначення товщин ізоляції дроту в процесі виготовлення. Точність вимірювання, що досягається, до 0,25 мкм.

Лазерне випромінювання, що сканує, може використовуватися для вимірювання з високою точністю товщини (висоти) виробів великих розмірів. Такий безконтактний метод вимірювань особливо ефективний у металургійному виробництві при оцінці розмірів великих виробів, поковок,

інших об'єктів, що знаходяться в технологічному процесі при високих температурах. Одна з можливих схем такого вимірювання представлена на рис. 1.2.

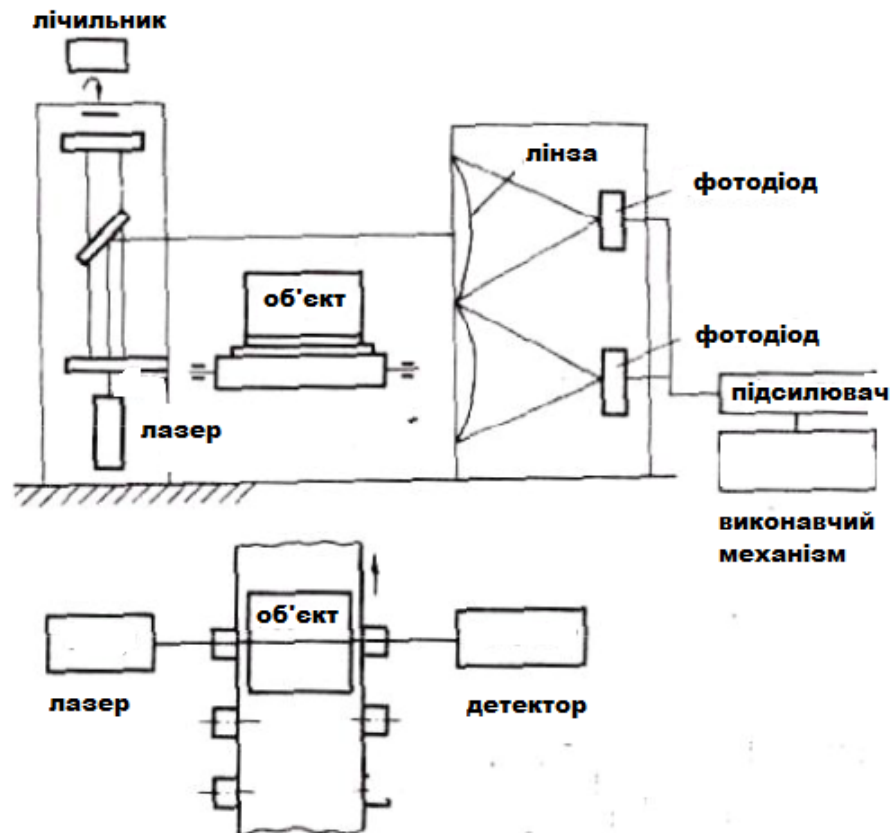


Рисунок 1.2 – Схема лазерної системи дистанційної оцінки товщини великогабаритних об'єктів [4].

Об'єкт, що рухається конвеєром, зупиняється навпроти лазерного випромінювача. Включається переміщення променя по вертикалі. Імпульсний генератор сканує імпульси випромінювання із частотою один імпульс на кожні 0,2 мм переміщення променя. Поки промінь перекритий об'єктом під час переміщення (сканування променя) призми, лічильник відраховує імпульси (товщину). Як тільки промінь реєструється фотодіодом, відлік переміщень припиняється і фіксується товщина об'єкта. У ряді випадків ефективно застосування ЛССП із поздовжнім скануванням (фокусуванням) променя (рис. 1.3).

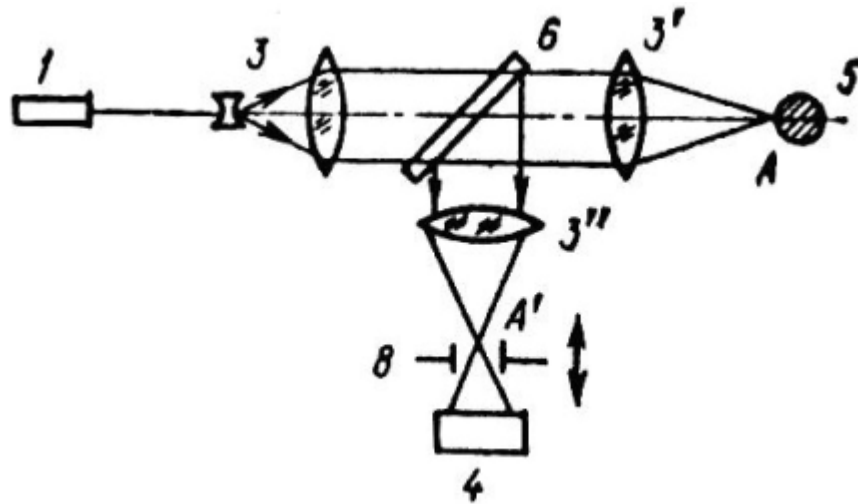


Рисунок 1.3 - ЛССП з поздовжнім скануванням променя [4]

Світло від лазера 1 за допомогою телескопа 3 і об'єктива 3' фокусується на об'єкт 5 у точку А. Після відображення від об'єкта світло проходить об'єктив 3', світлоділильне дзеркало 6 та лінзу 3'' фокусується у точці А'), яка здійснює поступальні переміщення вздовж оптичної осі. Якщо точка А' збігається із середнім положенням діафрагми, то в ланцюзі навантаження фотоприймача 4 протікає струм, інтенсивність якого змінюється за синусоїдальним законом (зазвичай діафрагма здійснює гармонічні коливання). При зміні положення об'єкта максимум сигналу відповідатиме фазі коливання, відмінної від вихідної, що фіксується відповідним електронним пристроєм. Подібні системи знаходять застосування для контролю розмірів деталей при їх обробці на токарних верстатах тощо. ЛВЛР типу ЛБСП застосовуються також (рис. 1.4) для визначення межі та позиціонування об'єкту контролю (ОК), визначення діаметра та провисання матеріалу у вигляді канату, контролю відстані між контактами свічки запалювання.

У цих випадках відносна похибка  $\sim 10^{-3}(0,1\%)$ .

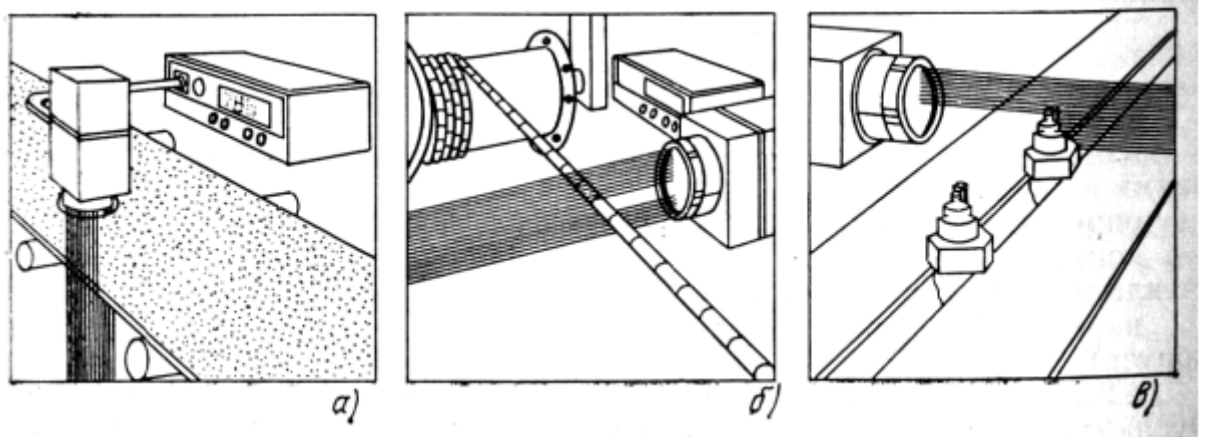


Рисунок 1.4 – Застосування фотоелектричного методу з використанням меж тіні: а – визначення кордону та позиціонування вимірюваного матеріалу; б – визначення діаметра та провисання матеріалу у вигляді канату; в – контроль відстані між контактами свічки запалювання. [4]

Крім того подібні системи затребувані для визначення збігу та діаметра втулок коліс автомашини, контролю перфтораторів, контролю паралельності горловин розпилювачів. В цих випадках геометрія об'єкту контролю (ОК) вимірюється за ступенем затінення пучків А, В та С (рис. 1.5). Точність вимірювання  $\sim 10 - 1$  мкм.

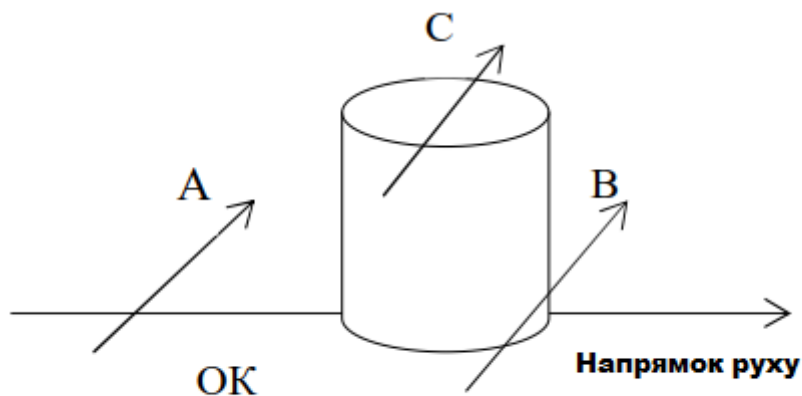


Рисунок 1.5 – Система контролю паралельності горловин розпилювачів

Для визначення товщини деталей чи різниці рівнів (наприклад, рідких металів) застосовується метод тріангуляції (рис. 1.1, 3). Його ідея показана рис. 1.7. Світлова точка А на поверхні ОК відображається у світлову точку А'

на приймачі Е, а точка В – у В', яка на приймачі знаходиться на відстані  $x'$  від А'. При фіксованому розташуванні джерела світла та приймача (відомі D та b з рис. 1.6, 3) можна знайти відстань x між А та В. Точність вимірювання  $\sim 10$  - 1 мкм. [4]

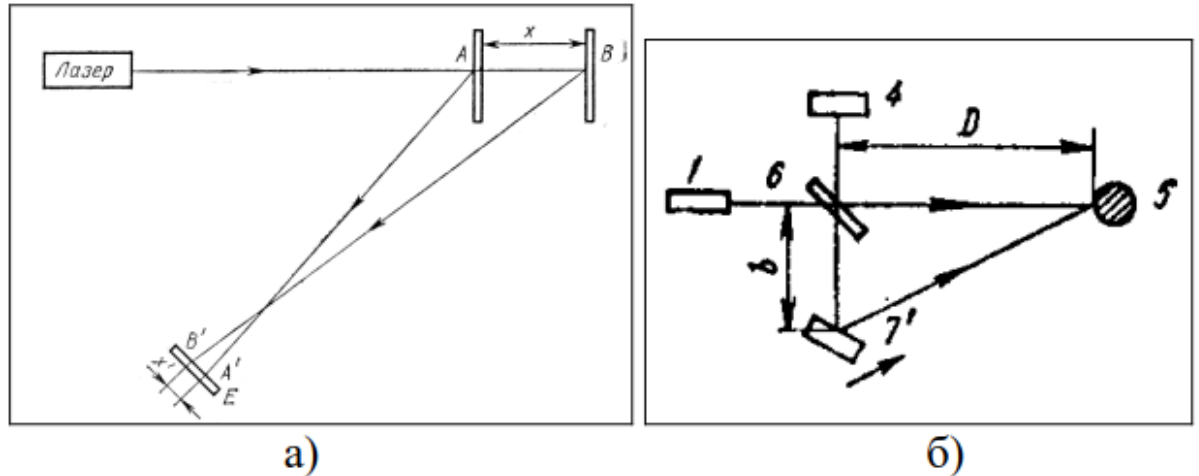


Рисунок 1.6 - Використання методу триангуляції: а) - схема застосування методу триангуляції: А та В – точки поверхні ОК з відстанню x між ними; А' і В' - їх зображення на приймачі Е, б) схема простого лазерного триангуляційного вимірювача. [4]

Таким чином, лазерні триангуляційні вимірювачі (ЛТВ) засновані на принципі оптичного далекоміра з постійною базою. Подібні системи працюють у відбитих від об'єкта променях. У найпростішому випадку (рис. 1.7 б) схема ЛТВ містить лазер 1, нерухоме дзеркало 4, світлоділильне дзеркало 6, дзеркало 7, що обертається, схему візування на об'єкт 5 і приймач. Обертаючи рухоме дзеркало, домагаються поєднання на поверхні об'єкта відблисків від прямого та похилого променів і визначають відстань D до об'єкта за формулою:

$$D = b \cdot \operatorname{ctg} \alpha \quad (1.1)$$

де b - база ЛТВ,  $\alpha$  - кут повороту дзеркала.

Вони знаходять застосування в системах і, пристроях контролю взаємного розташування об'єктів, тощо. Переваги ЛТВ – широкий діапазон

контрольованих розмірів при значних відстанях до об'єкта в умовах одностороннього доступу до нього.

#### 1.2.4 Лазерні вимірювачі лінійних розмірів з використанням вимірювання часу розповсюдження світлових сигналів.

Для оцінки товщини об'єкту, контролю профілю виробу та інших подібних операцій може бути використаний метод, при якому відхилення розміру або контуру від номіналу визначається за різницею часу проходження відбитих сигналів ( $t_N - t_M$ ). Схема методу показана на рис. 1.7. Лазерний промінь від випромінювача 1 прямує на дефлектор 2, за допомогою якого він періодично зміщується з точки N (нульовий рівень) в точку M.

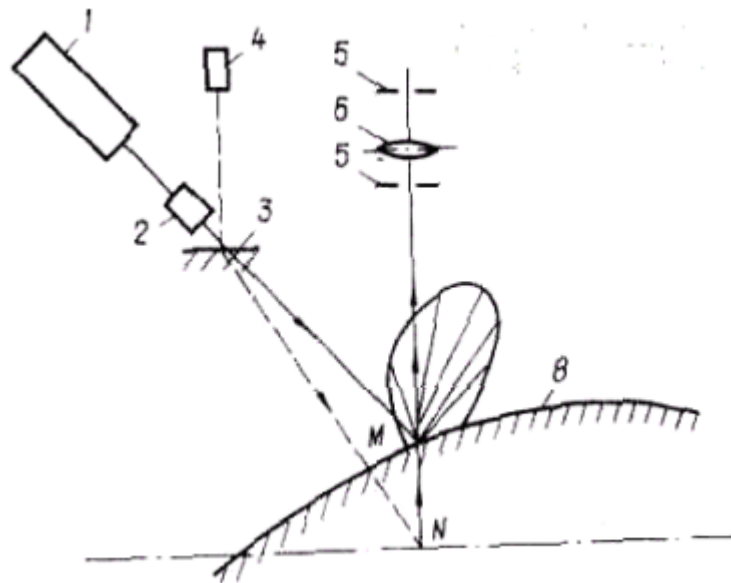


Рисунок 1.7 – Схема приладу контролю розмірних параметрів виробів [4]

Фактичне значення нульового рівня забезпечується за допомогою напівпрозорого дзеркала 3 і фотодіода 4. При оцінці значення використовується складова дифузно відбитого випромінювання, що проходить через діафрагми 5 і лінзу 6 на фотодіод 7. Таким чином, визначається відносна величина відхилення розміру (контуру) заданого

(нульового) значення. Розглянутий метод вимірювання реалізовано, наприклад, у приладах фірми Holo System. З їх допомогою можна забезпечити точність виміру (контролю) до 10 мкм при швидкості вимірів до 1800 вимірів за секунду. Прилади використовуються для оцінки товщини листового металу, паперу, непрозорої фольги, пластику; визначення рівня рідини у відкритих або закритих ємностях; для оцінки точності профілю, наприклад, лопастей турбін; для контролю положення об'єкта на відстані від 5 мм до 50 м.

Розглянута схема реалізована також у лазерних далекомірах, висотомірах та лазерних локаційних станціях (лідарах). Функціональні схеми в цих приладах аналогічні радіолокаторам (різниця полягає в основному в характеристиках випромінювача та антен). Системи лазерної локації мають переваги в порівнянні з радіо локаторами: більша точність вимірювання доплерівського зсуву частот та, краща роздільна здатність, більша точність визначення координат об'єкта. Розглянутий метод (іноді його називають імпульсним) заснований на вимірі проміжку часу  $\tau$ , необхідного для проходження короткого каліброваного імпульсу випромінювання до ОК і зворотно, виходячи з кількості каліброваних імпульсів  $n$ :

$$\tau = nT = \frac{2D}{c}, \quad (1.2)$$

де  $T$  – період імпульсу,  $D$  – відстань до об'єкту, що шукається,  $c$  – швидкість світла.

Похибка вимірів дальності  $\Delta D$  у цьому методі визначається в основному похибкою виміру часу  $\Delta \tau$ :

$$\Delta D \approx \frac{1}{2} c \cdot \Delta \tau \quad (1.3)$$

(похибкою  $\Delta c$  можна, як правило, знехтувати). Максимальна похибка  $\Delta D$  у цьому методі близько 6 мм, тому його використовують лише для вимірювання великих відстаней.

### 1.2.5 Лазерні вимірювачі лінійних розмірів із модуляцією лазерного випромінювання.

Для модуляції лазерного випромінювання є два способу, залежно від яких і відрізняються конструкції ЛВЛР.

*Фазовий метод вимірювання дальності.*

Інтенсивність світлового пучка, який проходить відстань, що вимірюється, модулюється частотами НВЧ-діапазону. Реєструється запізнення фази модульованого сигналу  $\Delta\varphi$  при подвійному проходженні вимірюваної відстані  $D$ . Тоді

$$D = \frac{c}{4\pi \cdot \nu_M} \cdot \Delta\varphi = \frac{c}{2\nu_M} \left\{ M + \frac{\Delta\varphi_1}{2\pi} \right\} \quad (1.4)$$

де  $c$  – швидкість світла,  $\nu_M$  – частота модуляції,  $M$  – ціле число,  $\Delta\varphi_1$  – «дробова частина» фазового зсуву ( $0 \leq \Delta\varphi_1 \leq 2\pi$ ). Для визначення  $M$  вимірювання  $D$  проводить на кількох частотах. Цей метод залежить від атмосферних впливів.

*Двочастотний метод.*

Застосовується двочастотний лазер із частотами лінійно поляризованих сигналів  $f_n$  і  $f_s$  та взаємно перпендикулярними площинами поляризації (рис.1.8). На приймачі 2, після зведення площестей поляризації в одну, виникає сигнал биття на частоті модуляції  $f_n - f_s$  з постійною фазою, а на приймачі 3 – з фазою, що залежить від видалення до мети. За допомогою фазового дискримінатора 5 вимірюється різниця фаз між сигналами, що надходять на приймачі 2 і 3. кратні довжини хвилі биття, відповідні вимірюваній відстані, визначаються шляхом зміни довжини биття. Досягана

$$\Delta D \sim 0,1 \div 1 \text{ мм для } D \sim 1 \div 10^3 \text{ м.}$$

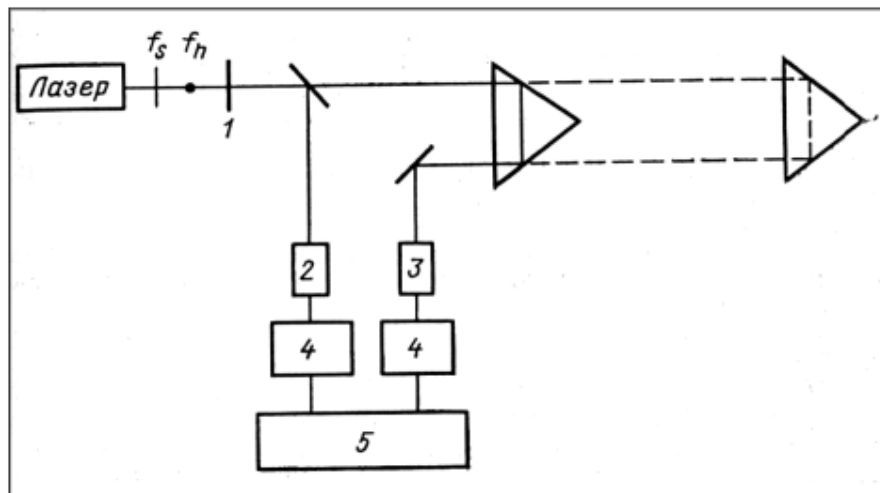


Рисунок 1.8 - Схема застосування двочастотного методу вимірювання відстаней: 1 – поляризатор; 2, 3 – приймачі; 4 – підсилювач; 5 – фазовий дискримінатор. [4]

Застосування:

- геодезичне вимірювання відстаней при візуальному зв'язку між кінцевими точками вимірюваного відрізка  $D \sim 1103$  м ;
- Вимірювання змін висоти поверхонь, наприклад, масла, води і т. д.

### 1.2.6 Лазерний телевізійний проектор світлового перерізу.

Високий ступінь спрямованості світлового пучка дозволяє створювати ефективні системи контролю профілю виробів складної форми, наприклад, лопаток турбін. Плоский лазерний промінь, сформований спеціальною оптичною системою, при перетині з контрольованою деталлю утворює на її поверхні смужку, що світиться, форма якої точно відповідає профілю об'єкта. Телевізійна камера формує зображення світлового перерізу лопатки на екрані телевізійного дисплея. Одночасно відеосигнал надходить в електронний блок, що складається з аналого-цифрового перетворювача, міні-ЕОМ та пристроїв реєстрації даних. У пам'яті ЕОМ зберігаються дані про координати перерізу еталонної лопатки, і при переміщенні лопатки відбувається їх безперервне

порівняння з координатами контрольованого об'єкта. У разі перевищення різниці цих координат допустимого значення лопатка бракується. У пристроях використано газовий лазер потужністю 5 мВт. Телекамера забезпечує не менше 2000 відліків за будь-яким рядком зображення. Створено аналогічні системи для контролю профілю прокату в процесі виготовлення та ряду інших виробів.

### 1.3. Технологія сканування лазерним променем.

Крім самого лазера, для більшості лазерних застосувань потрібні інші компоненти та пристрої. Ці компоненти можна розділити на широкі категорії модуляторів і сканерів, детекторів, систем позиціонування та оптики для формування зображень. Скануючі пристрої, в більшості випадків діють на лазерний промінь, щоб змінити його напрямок. Наразі існує три основних типи відхилення променя: механічне, акустооптичне та електрооптичне.

Інший метод розмежування основних методів сканування показаний на рис. 1.9. Цей метод поділяє технологію сканування на два класи: високоінерційний та низькоінерційний. Це визначає операційну різницю між можливостями масивного та гнучкого керування.

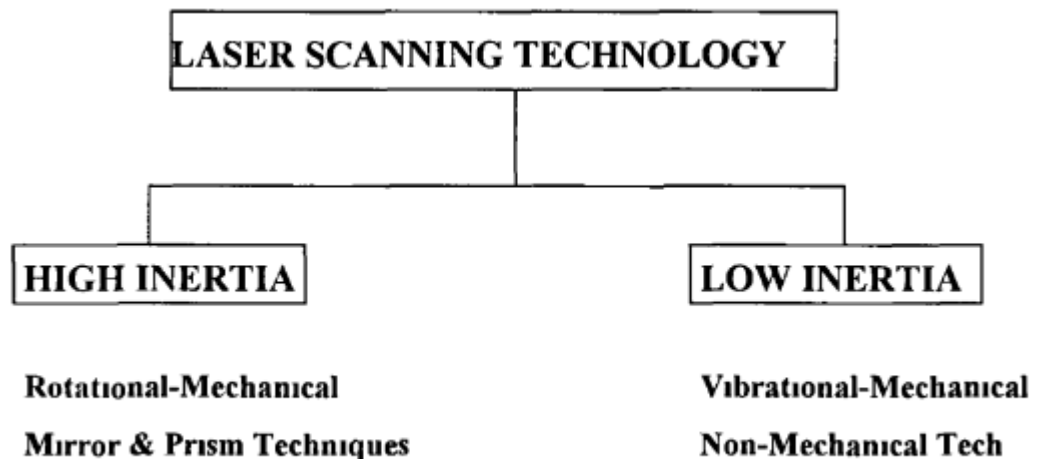


Рисунок 1.9 – Узагальнення технології лазерного сканування [17]

### **1.3.1. Механічні сканери**

Більшість лазерних сканерів сьогодні використовують механічне обертання. Інерція високошвидкісного обертання забезпечує дуже стабільну швидкість сканування, а точне налаштування електронікою може підвищити стабільність приблизно до однієї частини з 30 000 залежно від співвідношення ширини грані до розміру променя на грані, час активного запису може становити 95% від загального часу роботи.

Механічні сканери використовують фактичний фізичний рух дзеркала, призми або подібних компонентів для зміни напрямку лазерного променя. Компонент зазвичай переміщується за допомогою електричного двигуна або через гальванометр/катушку. Основним обмеженням цієї технології є те, що вона вимагає відносно жорсткого формату сканування, обмеженого внутрішньою високою інерцією механічної системи. Іншими обмеженнями для ротаційно-механічних сканерів є параметри системи, які можуть перешкоджати використанню обертових компонентів і пов'язаних з ними підшипників, двигунів і систем керування.

Зазвичай механічні сканери, як правило, повільні та їх важко точно контролювати, але вони пропонують перевагу порівняно низької ціни, довговічності та простоти.

### **1.3.2 Гальванометричне дзеркало.**

Гальванометричне дзеркало працює за тим самим принципом, що й рух д'Арсонваля в аналоговому вимірювачі. Катушка, встановлена між полюсами постійного магніту, обертатиметься, якщо через неї проходить струм. Оскільки струм створює магнітне поле навколо катушки, магнітне поле постійного магніту буде відштовхувати катушку та змусити її рухатися.

Зміна величини та напрямку струму в котушці призведе до того, що вона буде рухатися на різні величини в різних напрямках. Дзеркало, встановлене на котушці, рухатиметься разом із ним, і його можна використовувати для відображення лазерного променя у різних напрямках. Дзеркала гальванометра пропонують перевагу великого кута відхилення та незначного спотворення лазерного променя або його відсутності. Вони доступні з кількома різними швидкостями та роздільною здатністю, однак вони обмежені різними параметрами.

Великий кут сканування або розумний діаметр променя спричиняє повільну швидкість сканування (кілька сотень Гц). Висока частота сканування (до 20 кГц) спричиняє малі розміри дзеркала та функції лише синусоїдального руху.

Перевагою є те, що центр відхилення збігається з віссю дзеркала. Цей факт спрощує оптичні корекції. Комбінацію двох таких дзеркал під прямим кутом одне до одного можна використовувати для позиціонування та сканування лазерного променя в двох напрямках.

Багатогранний багатокутник освітлюється одним нанопроменем таким чином, що в будь-який час опроміненню піддається лише частина дзеркала. Кутове зміщення багатокутника під кутом  $\theta$  впливає на зміщення на  $2\theta$  кутів до відбитого. Це подвійне швидкісне сканування триває до тих пір, поки кут багатокутника не натрапить на освітлюючий промінь, після чого відбитий промінь ділиться на дві частини, завершуючи сканування, а баланс ініціює нове сканування.

Однак ця система є оптично та механічно неефективною, оскільки лише невелика частина дзеркальної поверхні активно бере участь у відображенні освітлюючого променя.

### 1.3.3 Обертова призма.

Пента-призму можна використовувати для повороту лазерного променя під прямим кутом, навіть якщо призма не точно вирівняна. Обертаючи призму навколо осі падаючого променя, вихідний промінь викреслює плоску площину. Системи цього типу використовуються на будівельних майданчиках для вирівнювання стель, стін і фундаментів. У багатьох випадках використовується HeNe-лазер, щоб скануючий лазерний промінь виробляв червону лінію на об'єкті, яку може бачити людина-спостерігач, щоб вирівняти об'єкт.

Якщо потрібна більша точність або бажано автоматичне вирівнювання, можна використати детектор положення. За допомогою лазерного променя, який сканує горизонтальну площину, автоматизована система детектора положення може бути використана для виявлення променя та контролю леза на землерийному обладнанні, так що абсолютно плоска поверхня може бути сортована і використовувати ці системи для сортування полів.

Властивості механічних сканерів.

Є, звичайно, обмеження щодо використання механічних дефлекторів, підсумовані в наступних пунктах.

- Швидкість сканування - частота в мс;
- Складна конструкція — дорого;
- Вразливість до пошкоджень;
- Обмежений термін служби через механічні рухомі частини;
- Страждає від «хитання» (пірамідальна помилка);

Застосування механічних сканерів.

Механічні сканери використовуються, коли потрібен великий діапазон руху і висока швидкість не потрібна. Загальне застосування сканера, такого як дзеркало гальванометра — для лазерного світлового шоу.

Лазерне світлове шоу використовує особливі властивості лазерного променя для створення візуальних зображень у великому масштабі. Сканер використовується для відстеження візерунка за допомогою променя від видимого лазерного світла на деякій поверхні, як-от екран або стіна. Скануючи досить швидко, слід візерунка виглядає як одна суцільна лінія. Ефекти можна посилити, додавши дим або пару на шляху променя, щоб його також було видно.

Багато комерційних компаній пропонують лазерні світлові шоу для концертів і як окремі заходи. Є кілька постійних світлових шоу. у країні Сканування променя високопотужного лазера на поверхні можна використовувати для гравірування візерунків на цій поверхні. Коли для гравіювання потрібна лише середня роздільна здатність у малому масштабі, можна використовувати механічний сканер для позиціонування променя.

Сканер часто керується шляхом поєднання його з комп'ютером, який забезпечує відповідний струм для кожної позиції сканування та дозволяє користувачеві програмувати окремі значення позиції або модель зображення, яке буде побудовано.

#### **1.3.4 Акустооптичні дефлектори.**

Багато застосувань, які використовують лазери, вимагають лазер, який модулюється та відхиляється. Акустооптичні пристрої є, мабуть, найбільш універсальним засобом введення інформації в лазерний промінь. Щоб зрозуміти акустооптичні дефлектори, ми повинні спочатку обговорити модулятори.

Акустооптичні модулятори використовуються для виробництва коротких, високочастотних імпульсів потужності від лазерів, відхилення променя, амплітудна модуляція та частотна модуляція.

Акустооптичний модулятор — це пристрій, у якому використовується прозорий твердий блок матеріалу, такого як плавлений кварц, до якого прикріплено п'єзоелектричний перетворювач

Акустооптичний ефект викликається звуковими хвилями в кристалі. Якщо до матеріалу прикладається тиск, це спричиняє зміну показника заломлення матеріалу. Якщо прикладений тиск змінюється синусоїдально, зміни показника заломлення також змінюватимуться в акустооптичному пристрої, високочастотні зміни тиску створюються в кристалі шляхом вібрації його поверхні за допомогою перетворювача.

Хвилі в кристалі створюють ефект, подібний до дифракційної решітки. Тому світло, що проходить через кристал, буде розділено на дві або більше частин (або порядків). Кут розділеного променя та інтенсивність кожної частини можна контролювати, керуючи частотою та амплітудою звукових хвиль. Сканери використовують частину променя, яка розділена під кутом до оригіналу.

Розглянемо, акустооптичну комірку, що працює як дефлектор.

Добуток смуги пропускання за часом є мірою здатності акустооптичної роздільної здатності. Очевидно, що ця роздільна здатність може бути переведена на плями на лінії сканування за допомогою фокусуючої оптики. Для високої роздільної здатності потрібно шукати високу смугу пропускання та довгий час заповнення (час проходження звуком лазерного променя).

Цей останній критерій вимагає використання матеріалів із якомога нижчою швидкістю звуку. За допомогою акустооптичних сканерів можна досягти високих показників відхилення, але завдяки низькій швидкості акустичної хвилі (4.2 км/с на кристалах  $\text{TeO}_2$ ) потрібна дуже маленька пляма ( $<30\mu\text{м}$ ) для отримання швидкого часу наростання та спаду ( $<5\text{ нс}$ ).

Високочастотна ( $>200\text{ МГц}$ ) акустична хвиля повинна генеруватися в кристалі, щоб отримати відхилення або модуляцію, яку потрібно вмикати та вимикати дуже швидко. Для цієї мети потрібна дорога високочастотна електроніка. Технологія виготовлення акустооптичних сканерів є складною,

точно розроблений ультразвуковий перетворювач повинен бути прикріплений до відхиляючого кристала. очевидно, що системи сканування, створені за допомогою таких сканерів, є складними та дуже дорогими.

Властивості акустооптичних пристроїв.

- Швидкість сканування  $< 100$  мкс;
- Роздільна здатність до 1000 точок на лінію максимуму;
- Кут сканування зазвичай  $< 3^\circ$  у комерційних пристроях;
- Для мінімізації втрати роздільної здатності  $T$  (час зворотного ходу) менше часу сканування;
- Верхня межа роздільної здатності залежить від найвищої акустичної частоти, яку можна використати;
- Максимальне акустичне загасання через отвір = 3,3 дБ.

Практичні проблеми з акустооптичними пристроями.

- Обмеження потужності двигуна;
- Теплові ефекти;
- Труднощі з виготовленням перетворювачів частоти з широкою смугою пропускання.

### 1.3.5 Електрооптичні дефлектори.

Електрооптичний ефект, виявлений у деяких матеріалах, передбачає взаємодію між електричним полем і поляризацією світла.

В електрооптичних матеріалах прикладене електричне поле (напруга) призведе до подвійного променезаломлення матеріалу. Це подвійне променезаломлення розділяє світло, що проходить крізь матеріал, на дві частини, які рухаються з різними швидкостями.

Коли світло виходить з іншої сторони матеріалу, його дві частини рекомбінуються, утворюючи світло з різною поляризацією, як показано 7, шляхом ретельного контролю сили поля та розміру матеріалу, електрооптичний ефект може бути використаний для зміни орієнтації лінійно

поляризованого світла. У даний час комерційно доступні пристрої є громіздкими та дорогими та потребують високої потужності. В даний час розробляється новий електрооптичний скануючий пристрій. Загалом, ці пристрої складаються з матриць призм із змінним доменом, інвертованим і неінвертованим.

Прикладаючи електричне поле до металевого електрода загальні для всіх призм зміни показника заломлення змінного знаку ( $+\Delta N$   $+\Delta N$  resp ) індуються в кожній парі призм.

Лазерний промінь заломлюється на границях між відповідними призмами і може бути відхилений поетапно. Безперервне (аналогове) відхилення досягається адаптацією фаз частини відображеного пучка з додатковими електродами у фронті призми.

Конструкція скануючих пристроїв, які необхідно розробити, набагато простіша, ніж будь-які сумісні відповідні механічні та акустооптичні дефлектори. Їх можна виготовити за допомогою абсолютно простої та дешевої технології, яка не потребує приєднання деталей, таких як ультразвукові перетворювачі, які є дорогими та важкими для обробки.

Електронно вони є конденсаторами, що забезпечують високу швидкість роботи.

Властивості електрооптичного дефлектора.

- Висока швидкість відхилення – досяжна швидкість нс;
- Висока роздільна здатність – досягається більше 1000 точок, що розрізняються;
- Точний кут відхилення – залежить від конструкції;
- Легкий у використанні в режим довільного доступу;
- Прості схеми керування, не потрібна радіочастотна потужність;
- Проста структура, проста планарна технологія;
- Відсутність зміни оптичної частоти;
- Висока стабільність – не потрібна температурна компенсація;

- Тривалий термін служби – твердотільний пристрій без рухомих частин.

#### 1.4. Структурна та функціональна схема автоматизованої системи лазерно сканування.

Виходячи з наданого завдання для реалізації проекту можна використати дві схеми вимірювання: схему аналізу розміру з поворотним дзеркалом (рис. 1.10) або з використанням методу тріангуляції (рис. 1.11).

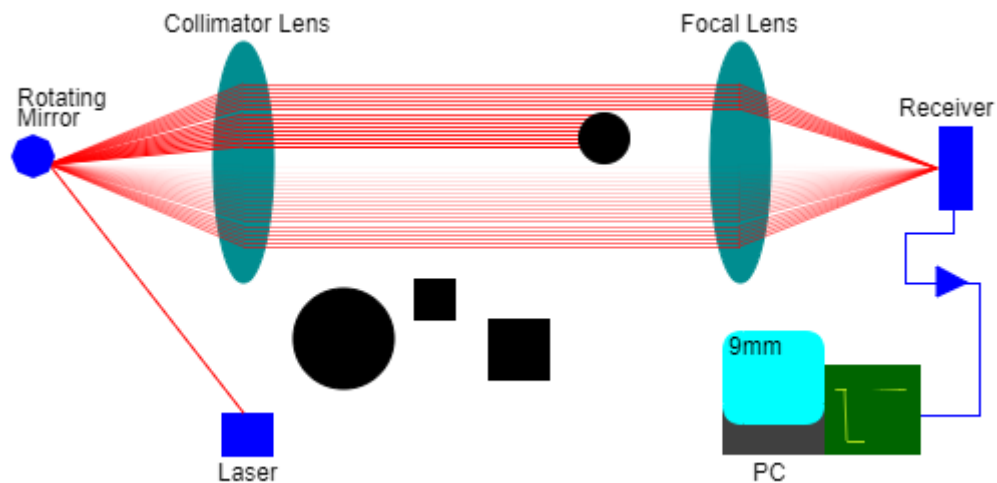


Рисунок 1.10 – Використання меж тіні при вимірюванні розміру деталі [17]

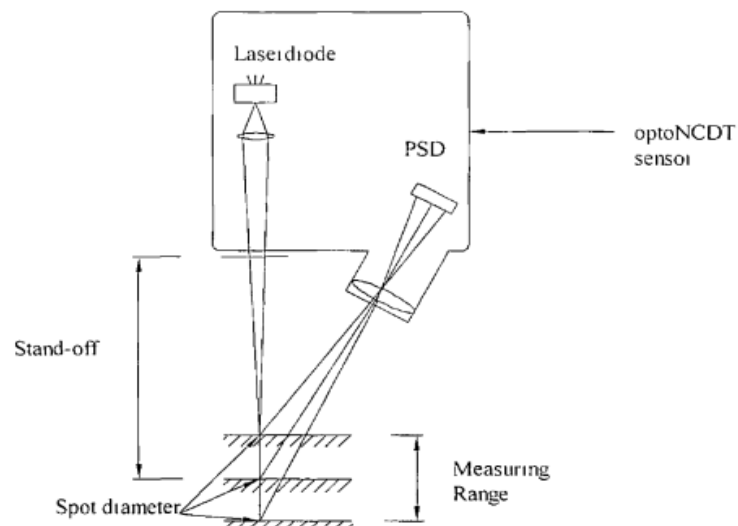


Рисунок 1.11 – Використання методу тріангуляції при вимірюванні розміру деталі [17]

Перший метод є більш універсальним і легшим для модернізації при зміні розмірів. Другий метод є більш дешевим, оскільки не має поворотного дзеркала [6,7].

Тому пропонується вказану систему виконати у вигляді поворотного дзеркала. Загальна структурна та функціональна схеми такої системи приведені на рис 1.12.

В якості інформаційної системи залежно від застосування чутника можна використовувати платформи Orange або RaspberryPi, або пряме під'єднання до USB порту персонального комп'ютера.

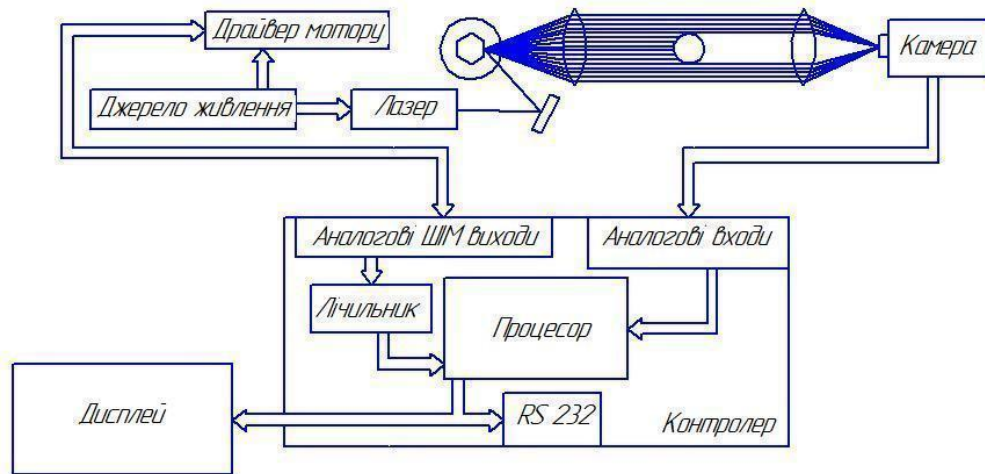
Система працює наступним чином. Лазерний промінь з випромінювача 1, який живиться від джерела 2 фокусується на обертовому дзеркалі 3, яке обертається за допомогою мотору 4. Відбите від дзеркала світло попадає на проекційну лінзу 5, де вирівнюється та освітлює вимірювальний об'єкт. Далі промінь потрапляє на збиральну лінзу і поступає в об'єктив камери. В результаті обертання дзеркала промінь рухається згори вниз, скануючи простір.

У місці, де він попадає на деталь камера не буде бачити променю, в інших випадках буде. Інформаційна система аналізує зображення і на основі часу зникнення променя визначає вертикальний розмір об'єкту. Така схема пристрою добре підходить якраз для токарних операцій з циліндричними об'єктами.

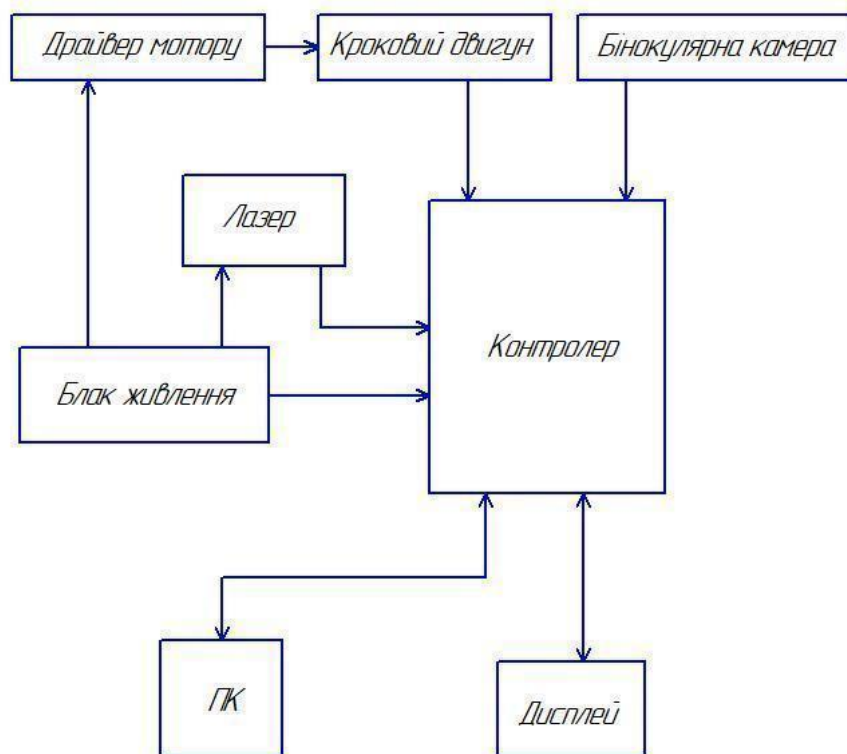
### **1.5. Алгоритм роботи.**

Для описаної вище структурної схеми алгоритм роботи залежить від ступеня автоматизації установки. Якщо оцінку розмірів та управління приводом подачі здійснює оператор, то вказаний пристрій має мати дисплей

та виводити в режимі реального часу виміряне значення, а оператор вже приймає рішення про модифікацію режимів різання.



а)



б)

Рисунок 1.12 – Функціональна (а) та структурна (б) схеми скануючої системи.

Якщо ж система має під'єднані виконавчі механізми керування подачею, то вона може підводити або відводити різець залежно від виміряного діаметру.

Розглянемо найбільш повний алгоритм роботи системи. На початку роботи система аналізує справність всіх модулів. Потім вона вимірює розмір заготовки. Якщо він більший за максимальне значення оброблюваної поверхні то все нормально. Проте якщо він більший за максимальний припуск на обробку – то необхідно видати повідомлення про невідповідність розмірів заготовки – вони занадто великі. Якщо ж розмір заготовки менший за розмір поверхні після обробки, то заготовка бракована, про що необхідно видати відповідне повідомлення. Ця процедура також дозволяє запобігти випадку, коли встановили не ту заготовку для обробки.

Якщо параметри заготовки відповідають необхідним, систем розраховує припуск, вмикає привід, підводить різець та починає обробку, при цьому неперервно вимірюючи вказаний розмір. Якщо розмір більше максимально допустимого – система підводить різець. Якщо розмір наближається до меншого значення, то різець відводиться. Таким чином в кінці обробки, коли каретка повертається назад можна додатково провести сканування розмірів обробленої деталі, якщо в цьому є необхідність.

Алгоритм роботи системи керування приведено на рис. 1.13 та 1.14.

## **1.6. Напрями автоматизації.**

Щоб забезпечити точність обробки заготовок, потрібна велика кількість операцій контролю, які вимагають різного вимірювального обладнання як за типом, так і за діапазоном. Деякі перевірки проводяться на самому верстаті через більш високу точність розмірів. Це призводить до збільшення часу простою верстата, що призводить до зниження продуктивності та збільшення вартості одиниці операції. Метою сучасного верстатобудування є скорочення часу, необхідного для перевірки оброблених деталей на верстаті за

допомогою звичайного вимірювального обладнання та автоматизації вимірювальні процедури під час механічної обробки.

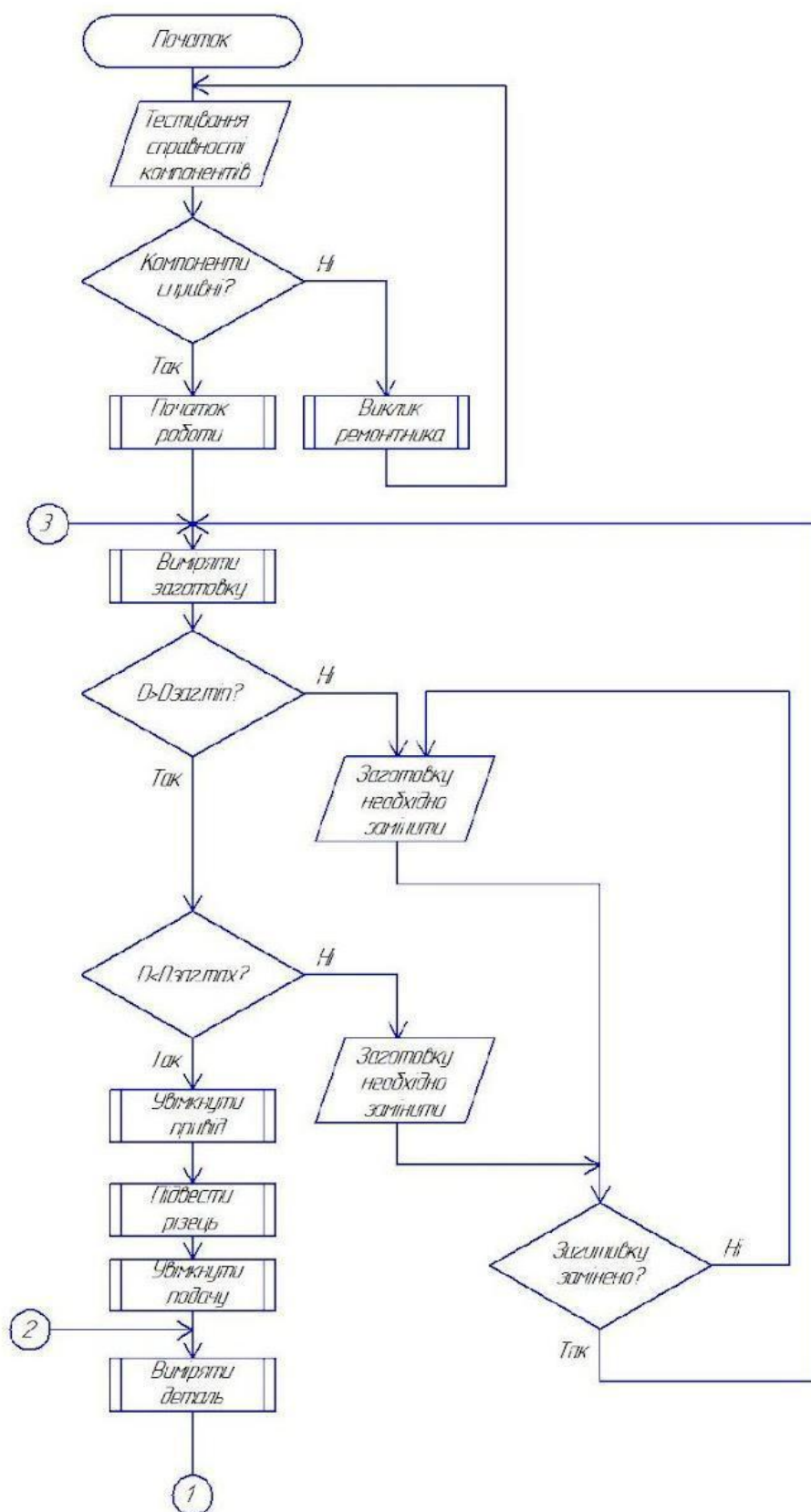


Рисунок 1.13 - Алгоритм роботи системи керування

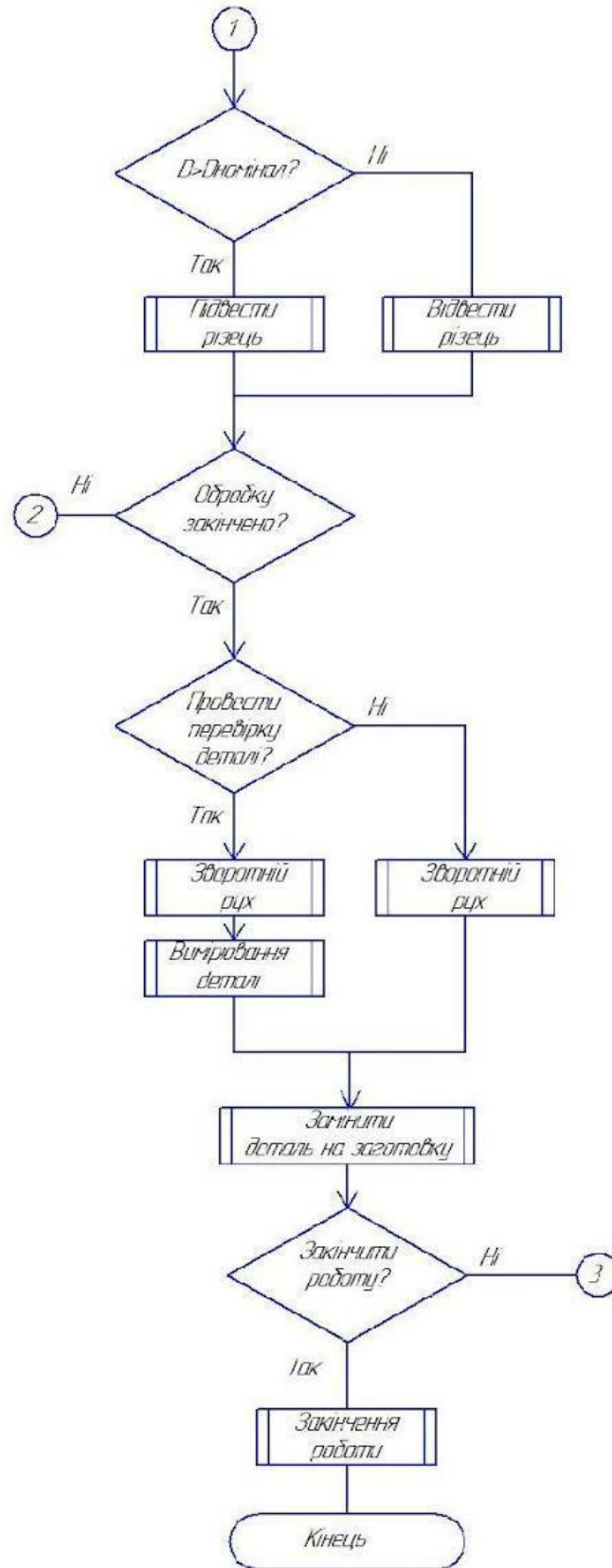


Рисунок 1.14 - Алгоритм роботи системи керування. Продовження

Автоматичний контроль якості виконання операцій обробки на токарних верстатах з в основному здійснюється за допомогою електроконтактного координатно-вимірювального обладнання. Одним із методів скорочення часу проведення вимірювальних процедур є вимірювання безконтактним методом.

З точки зору автоматизації дана система представляє собою автоматичну стабілізуючу систему для забезпечення розміру в номінальних межах.

Функціональна схема стабілізуючої приведена на рис. 1.15.

Вказана система проводить вимірювання діаметру оброблюваної деталі  $X^1$  і порівнює його з задаючим впливом  $X_0$ . В результаті виробляється сигнал розузгодження  $e = X_0 - X^1$ , який подається на регулятор. Останній у свою чергу виробляє керуючий вплив на виконавчий механізм (привід руху різця). Цей механізм виконує вплив на робочий орган (різець), який впливає на об'єкт керування.

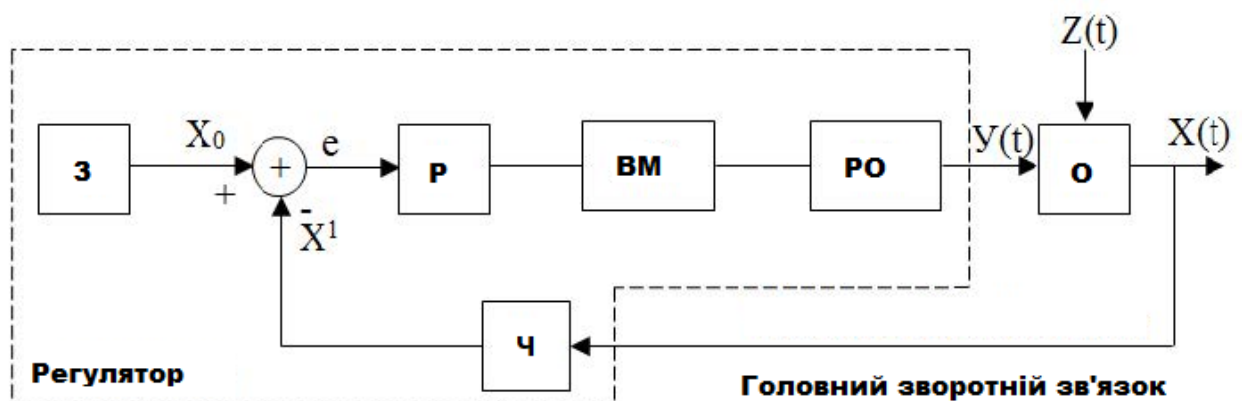


Рисунок 1.15 - Функціональна схема стабілізуючої системи: З – задавач; Ч – чутник; Р – регулятор; ВМ – виконавчий механізм (скануюча система); РО – Робочий орган; О – об'єкт керування; Y – керуюча дія; X – регульований параметр; Z – збурення.

### 1.7. Розрахунок параметрів лазерного випромінювання системи.

Виконаємо габаритний розрахунок пристрою вимірювання розмірів.

Наш пристрій буде проводити вимірювання діаметру скануючим способом в межах 07..70 мм. Для роботи пристрою відповідно до рис. 1.12 необхідно використати дві лінзи колімаційну та збиральну. Для забезпечення такого діапазону вимірювання діаметр лінз приймаємо 80 мм. Із врахуванням припусків на кріплення діаметри компонентів складатимуть 84 мм [8-12].

При необхідності вимірювання більших діаметрів необхідно застосовувати 2 прилади, як показано на рис. 1.16.

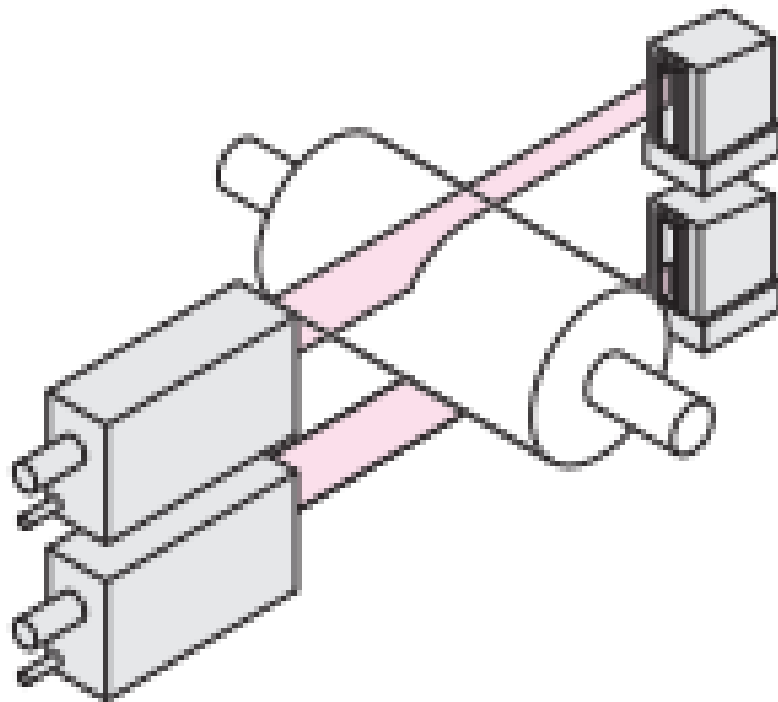


Рисунок 1.16 – Схема вимірювання діаметрів.

Фокальна відстань для проекційної лінзи та збиральної лінзи становлять  $f_1 = 60$  мм та  $f_2 = 60,58$  мм відповідно.

Виходячи з цього полігональне дзеркало розташовується на відстані 60 мм від лінзи (рис. 1.17). Об'єктив камери розташовується в фокальній площині збиральної лінзи, тобто на відстані 58 мм.

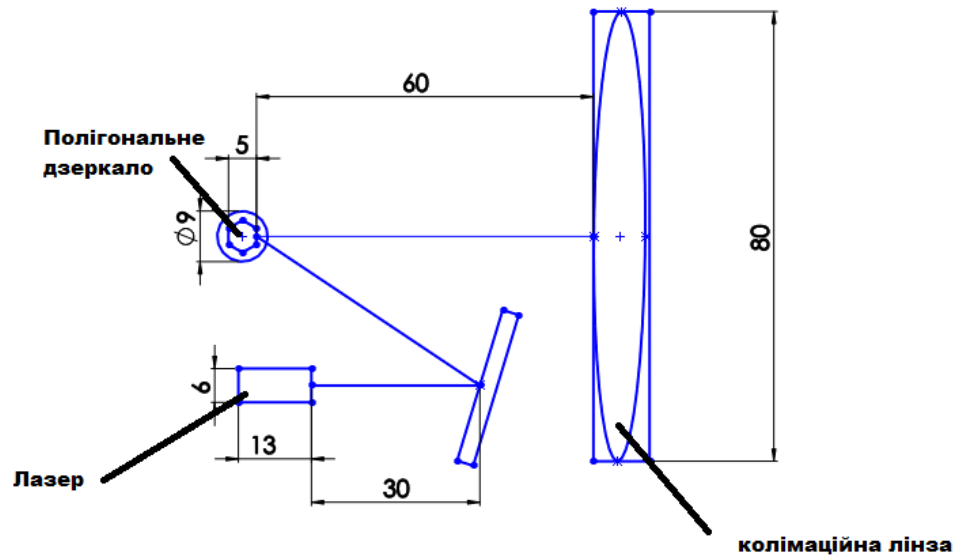


Рисунок 1.17 – Схема випромінювача.

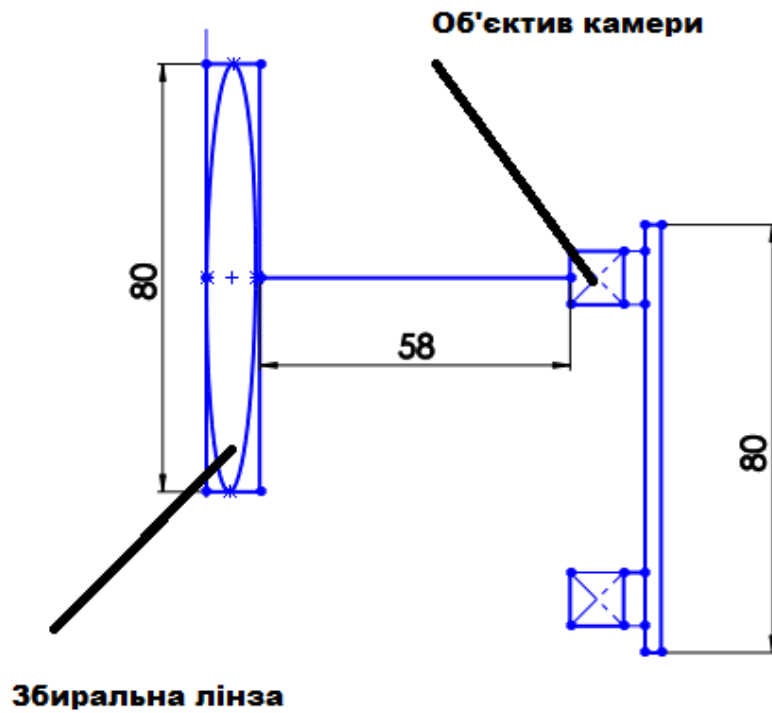


Рисунок 1.18 – Схема приймача

Для вимірювання діаметрів валів до 70 мм і зручності встановлення відстань між лінзами приймаємо 206 мм. Ширина пристрою становитиме відносно діаметра лінзи 80 мм, кріплення 2 мм та товщини стінки корпусу 5 мм:  $B = 80 + 2 + 2 + 5 + 5 = 94$  мм.

Загальні габарити пристрою вимірювання діаметру приведена на рис 1.19. Габарити пристрою становлять 540\*192\*94 мм.

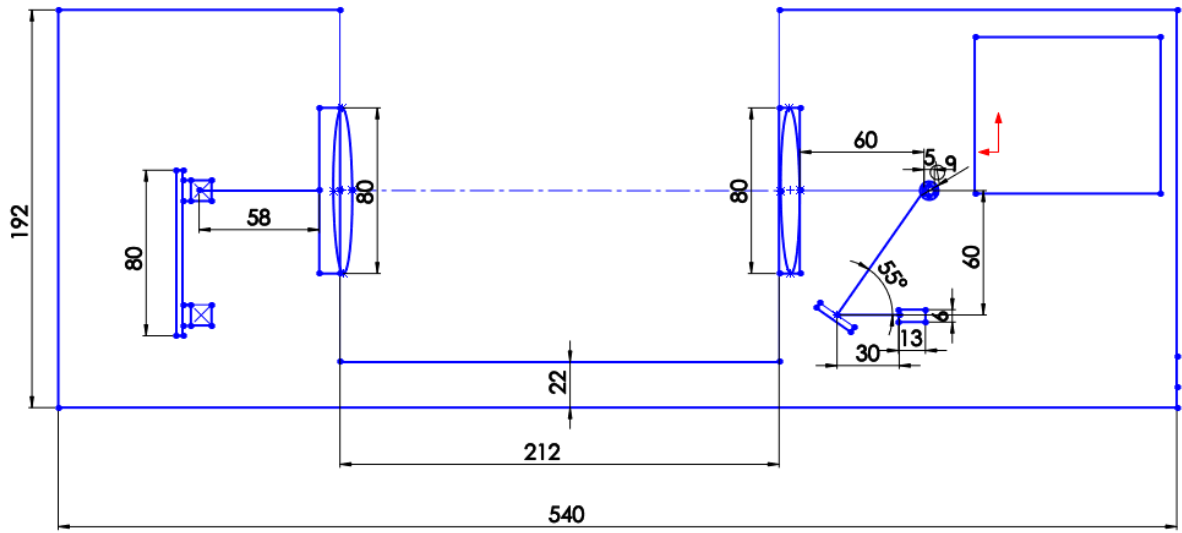


Рисунок 1.19 – Загальні габарити розробленого пристрою.

Для встановлення всіх компонентів на основі схеми вимірювання було спроектовано корпус приладу, який представлено на рис. 1.20.

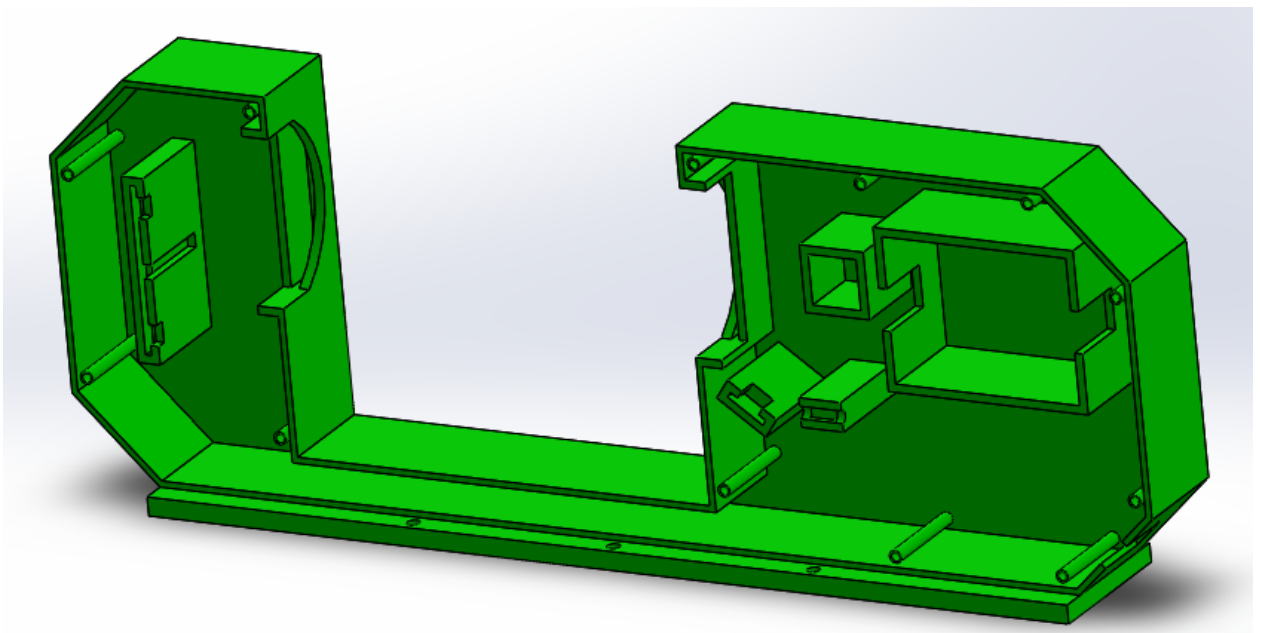


Рисунок 1.20 – Корпус приладу.

## 2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

Для розробки конструкції вимірювача було використане програмне забезпечення SolidWorks.

На рисунку 2.1 представлено лазерний вимірювальний пристрій, який складається з корпусу, в якому змонтована оптична система:

- 1 -- лазер Laser luch LA (650 нм 5 мВт);
- 2 – блок живлення;
- 3 – полігональне дзеркало;
- 4 – мотор;
- 6 – проекційна лінза;
- 7 – збиральна лінза;
- 8 - бінокулярна камера OV9750 HD;
- 9 – відбиваюче дзеркало.

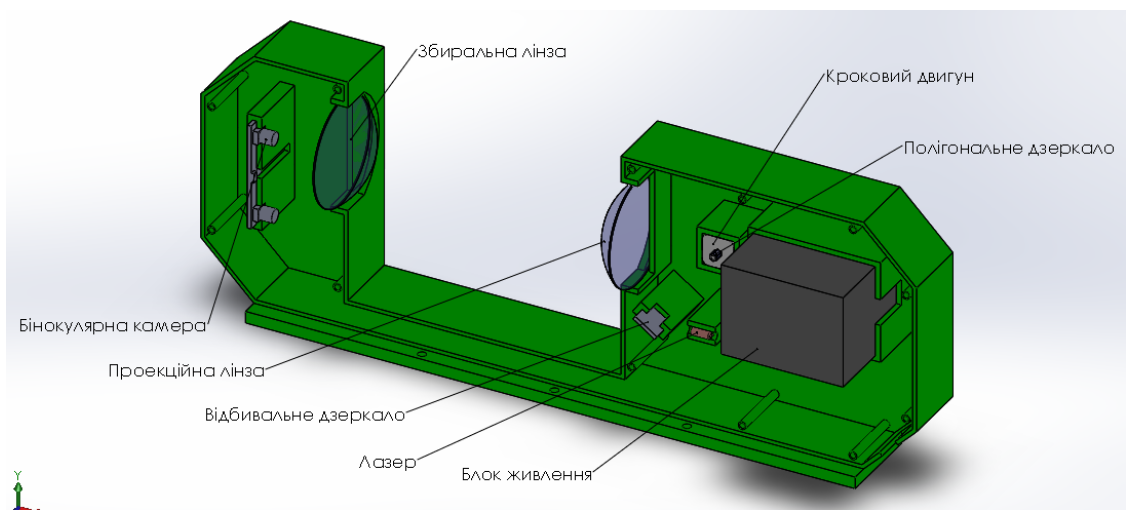


Рисунок 2.1 – Лазерний вимірювач

### 2.1. Розрахунок на технологічність.

Технологічність виробу характеризує якість виробу з точки зору зручності його виготовлення та експлуатації. Для розрахунку технологічності

виробу будемо розраховувати її за двома критеріями: собівартості та трудомісткості [13-15].

Критерій собівартості розраховується за наступною формулою:

$$K_c = \frac{C_{B.}}{C_{B.B.}} \quad (2.1)$$

де  $C_{B.}$  - собівартість виробу, а  $C_{B.B.}$  - собівартість базового виробу.

Собівартість розраховується, виходячи з вартості компонентів, які закупаються та виготовляються і при наявності показників робочих місць заводу або цеху.

При розрахунку критерію трудомісткості використовують наступний вираз:

$$K_{TP} = \frac{T_{TP.B.}}{T_{TP.B.B.}} < 1 \quad (2.2)$$

В даному виразі  $T_{TP.B.}$  це трудовитрати для виготовлення всього виробу та рівні всьому циклу виробництва, а  $T_{TP.B.B.}$  власне трудовитрати для виготовлення попередніх виробів, які виготовлялися та мали хороші показники збуту.

Проаналізуємо для нашого виріювача технологічну та конструктивну складність виробу.

В нашій роботі будемо аналізувати наступні показники:

1. Уніфікація деталей.
2. Уніфікація технологічних процесів складання;
3. Уніфікація виробу;
4. Конструкторська складність;
5. Уніфікація вузлів.

Розраховуємо уніфікацію виробу за формулою

$$K_{\text{ун.}} = \frac{N_{\text{ун.}} + n_{\text{ун.}}}{N_{\Sigma} + n_{\Sigma}} \quad (2.3)$$

де  $N_{\text{ун.}}$  - кількість складальних уніфікованих одиниць;

$n_{\text{ун.}}$  - вся кількість уніфікованих деталей;

$N_{\Sigma}$  - сумарне число всіх складальних одиниць;

$n_{\Sigma}$  - сумарне число деталей для виробу.

Отже, для розробленого вимірювача показник уніфікованості виробу складає:

$$K_{\text{ун.}} = (1+8)/(1+10) = 0,81$$

$K_{\text{ун.}} < 0,25$  – технологічність вважається незадовільною;

$K_{\text{ун.}} = 0,25-0,5$  – технологічність задовільна;

$K_{\text{ун.}} > 0,5$  – технологічність висока.

Оскільки розрахований показник  $K_{\text{ун.}} = 0,81 > 0,5$  за даним критерієм технологічність можна вважати високою.

Далі проводимо розрахунок показника уніфікації вузлів за виразом:

$$K_{\text{ун.Н}} = \frac{N_{\text{ун.}}}{N_{\Sigma}} \quad (2.4)$$

де  $N_{\text{ун.}}$  - кількість уніфікованих складальних одиниць;

$N_{\Sigma}$  - сума всіх складальних одиниць.

$K_{yH.N} < 0,2$  – технологічність вважається поганою;

$K_{yH.N} = 0,2-0,4$  – технологічність задовільна;

$K_{yH.N} > 0,4$  – технологічність висока.

У нашому випадку показник уніфікації вузлів становить

$$K_{yH.N} = 1/1 = 1.$$

Оскільки розрахований показник  $K_{yH.N} = 1 > 0,4$  за даним критерієм технологічність можна вважати високою.

Далі проводимо розрахунок показника конструкторської складності за виразом:

$$K_{сл.} = \frac{N_{\Sigma}}{n_{\Sigma}} \quad (2.5)$$

де  $N_{\Sigma}$  - сума складальних одиниць всього виробу;

$n_{\Sigma}$  - сума деталей в приладі.

У нашому випадку показник конструкторської складності становить

$$K_{сл.} = 1/11 = 0,09$$

$K_{сл.} < 0,1$  – технологічність вважається поганою;

$K_{сл.} = 0,1-0,2$  – технологічність задовільна;

$K_{сл.} > 0,2$  – технологічність висока.

Оскільки розрахований показник  $K_{сл.} = 0,09 < 0,4$  за даним критерієм технологічність можна вважати поганою.

Критерій уніфікації складальних технологічних процесів розраховується за виразом:

$$K_{\text{ун.т.п.}} = \frac{Q_{\text{ун.оп.}}}{Q_{\text{Σоп.}}} \quad (2.6)$$

де  $Q_{\text{ун.оп.}}$  - вся кількість уніфікованих операцій;

$Q_{\text{Σоп.}}$  - вся кількість операцій.

$K_{\text{ун.т.п.}} < 0,5$  – технологічність вважається поганою;

$K_{\text{ун.т.п.}} = 0,5-0,75$  – технологічність задовільна;

$K_{\text{ун.т.п.}} > 0,75$  – технологічність висока.

При розрахунку даного критерію необхідно мати інформацію про всі технологічні процеси підприємства, тому ми його не враховуємо.

Критерій уніфікації деталей розраховується за виразом:

$$K_{\text{ун.д.}} = \frac{n_{\text{ун.}}}{n_{\Sigma}} \quad (2.7)$$

де  $n_{\text{ун.}}$  - вся кількість уніфікованих виробів;

$n_{\Sigma}$  - сума всіх деталей у виробі.

$K_{\text{ун.д.}} < 0,3$  – технологічність вважається поганою;

$K_{\text{ун.д.}} = 0,3-0,6$  – технологічність задовільна;

$K_{\text{ун.д.}} > 0,6$  – хороша технологічність.

У нашому випадку показник уніфікації деталей становить

$$K_{\text{ун.д.}} = 8/11 = 0,72$$

Оскільки розрахований показник  $K_{\text{ун.д.}} = 0,72 > 0,6$  за даним критерієм технологічність можна вважати хорошою.

## **2.2. Розробка структурної схеми складання сканера.**

Структурну схему складання було виконано за допомогою пакету програм SolidWorks.

Вимірювальний блок складається з корпусу, який містить дві частини праву та ліву [16-21]. Всі компоненти зручно монтувати у правій частині корпусу, в якій передбачено необхідні пази, після чого корпус закривається лівою частиною і фіксується гвинтами. Корпус вимірювача містить всередині наступні компоненти: лазер Laser luch LA (650 нм 5 мВт), блок живлення, полігональне дзеркало, кроковий двигун, проекційну лінзу, збиральну лінзу, бінокулярну камеру OV9750 HD, відбиваюче дзеркало. Схема ступенів приладу приведена на рис. 2.2.

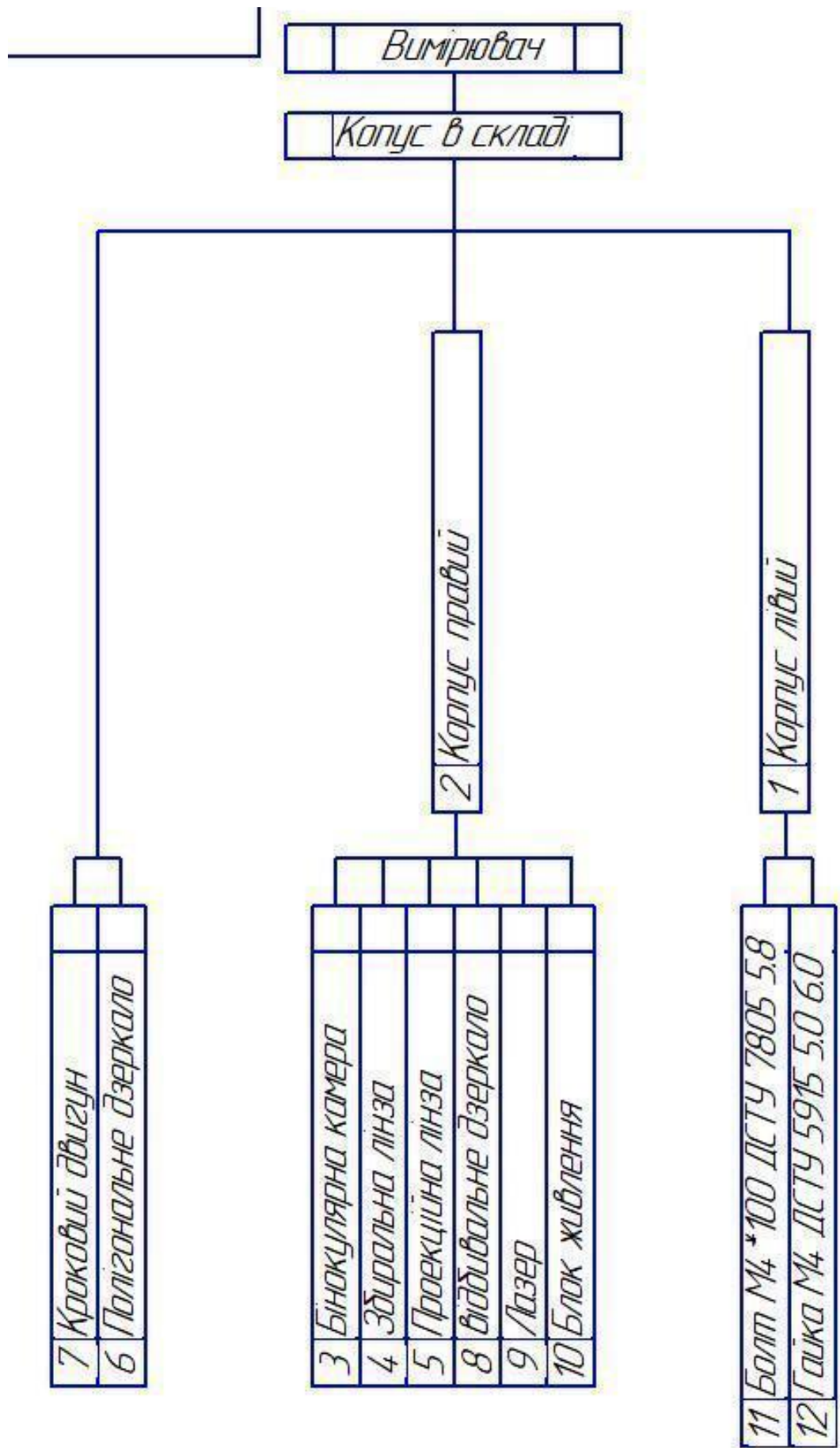


Рисунок 2.2 - Схема ступенів складання

### **2.3. Розробка технологічної схеми складання сканера.**

Порядок виготовлення:

Подвійну біноклярну камеру поз. 3 встановлюємо у правий корпус поз. 2. Далі збиральну лінзу поз. 4 встановлюємо у правий корпус поз. 2 та проєкційну лінзу поз. 5, фіксуємо їх у відповідних пазах. Полігональне дзеркало поз. 6 встановлюємо на вал крокового двигуна 7 та фіксуємо шпилькою.

Встановлюємо відбивальне дзеркало поз. 8 у відповідний паз правого корпусу поз. 2. Далі встановлюємо лазер поз. 9 у роз'єм правого корпусу поз. 2 та фіксуємо його пластиною. Встановлюємо блок живлення поз. 10 у правий корпус поз. 2. Контроль. Вкладаємо лівий корпус поз. 1 на корпус поз. 2. Фіксуємо правий корпус поз. 2 та лівий корпус поз. 1 гвинтами та гайками діаметром 6 мм. На цьому етапі вимірювач готовий. Контроль. Випробування.

Технологічна схема складання лазерного вимірювача приведена на рис. 2.3.

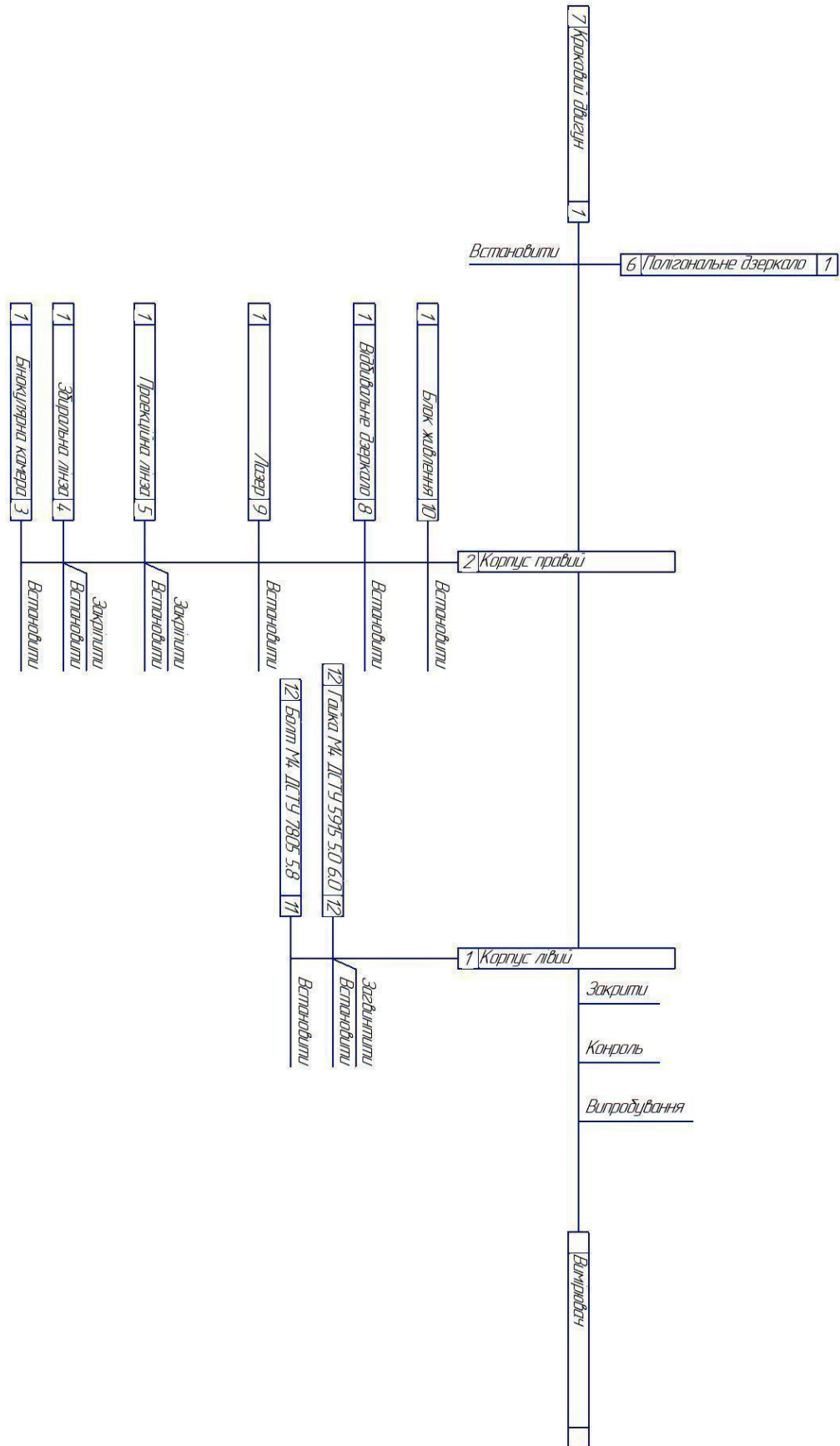


Рисунок 2.3 – Технологічна схема складання лазерного вимірювача

## **ВИСНОВКИ**

В роботі було розроблено систему вимірювання розмірів деталей при їх обробці токарним методом. Для досягнення мети було проаналізовано параметри лазерного випромінювання, розглянуто різні методи вимірювання розмірів деталей при токарній обробці. В результаті було обрано схему вимірювання.

За схемою вимірювання було побудовано структурну схему системи лазерного сканування. Далі ми проаналізували схему роботи приладу та розробили алгоритм функціонування автоматизованої системи вимірювання.

В роботі також було розроблено технологію складання розробленого приладу та складальне креслення. Впровадження результатів роботи дозволить значно покращити процес точіння за рахунок активного контролю розмірів оброблювальних поверхонь.

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. Бобицький Я. В., Матвіїшин Г. Л. Лазерні технології : навч. посіб. Ч. 1. Нац. ун-т "Львів. політехніка". Львів, 2015. 316 с.
2. Лазерні технології. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» / Уклад. : Г. С. Тимчик, М. В. Філіппова. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 74 с.
3. Марков С. Дишлик О. Проблеми використання тривимірного лазерного сканування під час вирішення завдань збереження культурної спадщини України // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Збірник наукових праць. Вип.1 (15). Львів. 2008, С. 184 – 194.
4. Лазерні вимірювачі лінійних розмірів. URL: [http://cde.kpi.kharkov.ua/Inde/Lectures/LK\\_11.pdf](http://cde.kpi.kharkov.ua/Inde/Lectures/LK_11.pdf).
5. Шевченко В.В., Осадчий О.В., Симута М.О. Технологія приладобудування: навч. посіб. для студентів напрямку підготовки 6.051003 «Приладобудування», 7.090902 «Наукові, аналітичні та екологічні прилади та системи» приладобудівного ф-ту. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 128 с.
6. Чадюк В.О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання: навч. посіб. У 2 кн. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 376 с.
7. Лазерні технології. Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. Г. С. Тимчик. – Електронні текстові дані (1 файл 6,22 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 276 с.

8. Чадюк В.О. Оптоелектроніка від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання: навч. посіб. У 2-х кн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вил-во «Політехніка», 2018. 336 с.
9. Бурий О. А., Убізський С. Б. Моделювання та оптимізація твердотільних мікрочипових лазерів: монографія. М-во освіти і науки України. Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2013. 200 с.
10. Оберемок Є.А. Прикладна фізика. Лазерна поляриметрія: Методичний посібник до лабораторного практикуму для студентів 4 курсу факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем. Київ : Факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2014. 69 с.
11. Григорук В.І., Коротков П.А., Хижняк А.І. Лазерна фізика: Підруч. для студ. вищ. навчс. закл. Київ : «МП Леся», 2000. 528 с.
12. Пупань Л. І. Лазерні технології у машинобудуванні: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання. Харків : НТУ «ХПІ», 2020. 109 с.
13. Колесник Ю.І., Кіпенський А.В. Елементи та пристрої квантової електроніки: навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2016. 320 с.
14. Шмирьова Л. М., Бевза О. М., Слободян Н. В. Навчальний посібник «Квантова електроніка». Частина 2. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 101 с.
15. Чиж, І. Г. Теорія оптичних систем. Підручник для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 426 с.
16. Полянський П. В., Фельде Х. В., Богатирьова Г. В. Голографія: навч. посібник. Чернівці : Чернівецький нац. Ун-т, 2013. 208 с.

17. Bass M. Handbook of Optic. Volume II. Design, Fabrication and Testing, Sources and Detectors, Radiometry and Photometry. McGraw Hill, 2009. 1264 p. (ISBN 978-0071498906).
18. Eichler H.J., Eichler J., Lux O. Lasers. Basics, Advances and Applications. Springer Nature Switzerland, 2018. 511 p.
19. Eichler H.J., Eichler J. Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen / Hans Joachim Eichler, Jürgen Eichler. Springer, 2015. 488 p.
20. Hodgson N., Weber H. Laser Resonators and Beam Propagation; Fundamentals, Advanced Concepts and Applications. Springer, 2005. 821 p. (ISBN 9780387400785).
21. Кучеренко О. К. Розрахунок і конструювання оптичних приладів. Частина 1. «Принципи конструювання і точність оптичних приладів» .– КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 25,3 Мбайт), 2018. 157 с.
22. ДСТУ ISO 10110-1:2018 Оптика та оптичні прилади. Розроблення креслеників оптичних елементів та систем. Частина 1. Загальні положення (ISO 10110-1:2006, IDT). Вид. офіц. Київ, 2006. 198 с.
23. Дипломний проєкт бакалавра: виконання, оформлення та захист : навч. посіб. / Уклад. : С. П. Вислоух, М. Ф. Терещенко, Г. С. Тимчик. – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. 64 с.
24. Виробнича практика. Організація, проходження та захист звіту [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / КПП ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: М. О. Безуглий, Н. І. Бурау, Ю. В. Киричук, М. В. Філіппова. – Електронні текстові дані (1 файл: 704 Кбайта). – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2022. 40 с.

**Додаток А**

**Функціональна схема**

Ід. № орг.

Вам. ід. №

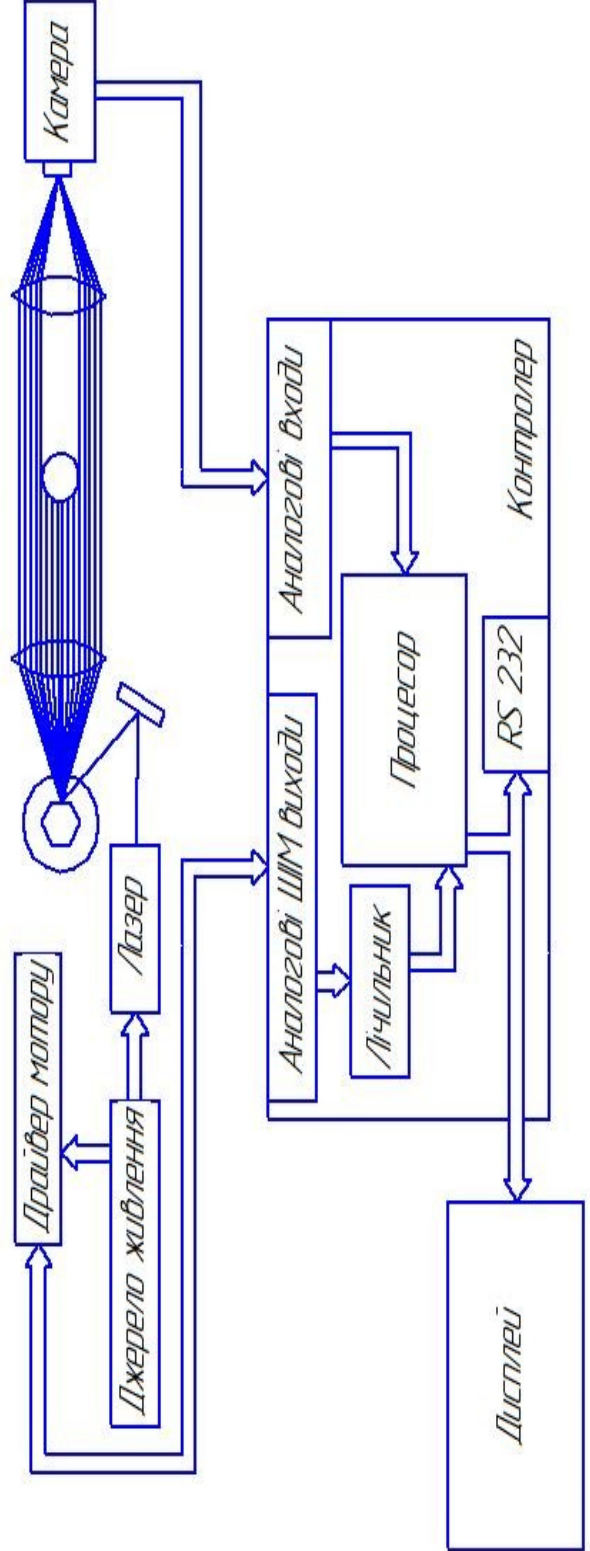
Ід. № дудл.

Підп. і дата

Підп. і дата

Спроб. №

ДПБ.ПБ-92.12.1702.002.001



|                                          |  |  |  |  |                   |         |         |
|------------------------------------------|--|--|--|--|-------------------|---------|---------|
| ДПБ.ПБ-92.12.1702.002.001                |  |  |  |  | Літ.              | Маса    | Масштаб |
| Функціональна схема лазерного вимірювача |  |  |  |  |                   |         | 1:1     |
|                                          |  |  |  |  | Аркус             | Аркусів | 1       |
|                                          |  |  |  |  | ПБФ, КП, ім       |         |         |
|                                          |  |  |  |  | Ігоря Сікорського |         |         |
|                                          |  |  |  |  | Формат А4         |         |         |

Копіював

**Додаток Б**

**Структурна схема**

ДПБ.ПБ-92.12.1702.002.002

Пер. змст.

Справ. №

Підп. і дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підп. і дата

Інв. № ориг.

Драйвер мотору

Кроковий двигун

Бінокулярна камера

Лазер

Блок живлення

Контролер

ПК

Дисплей

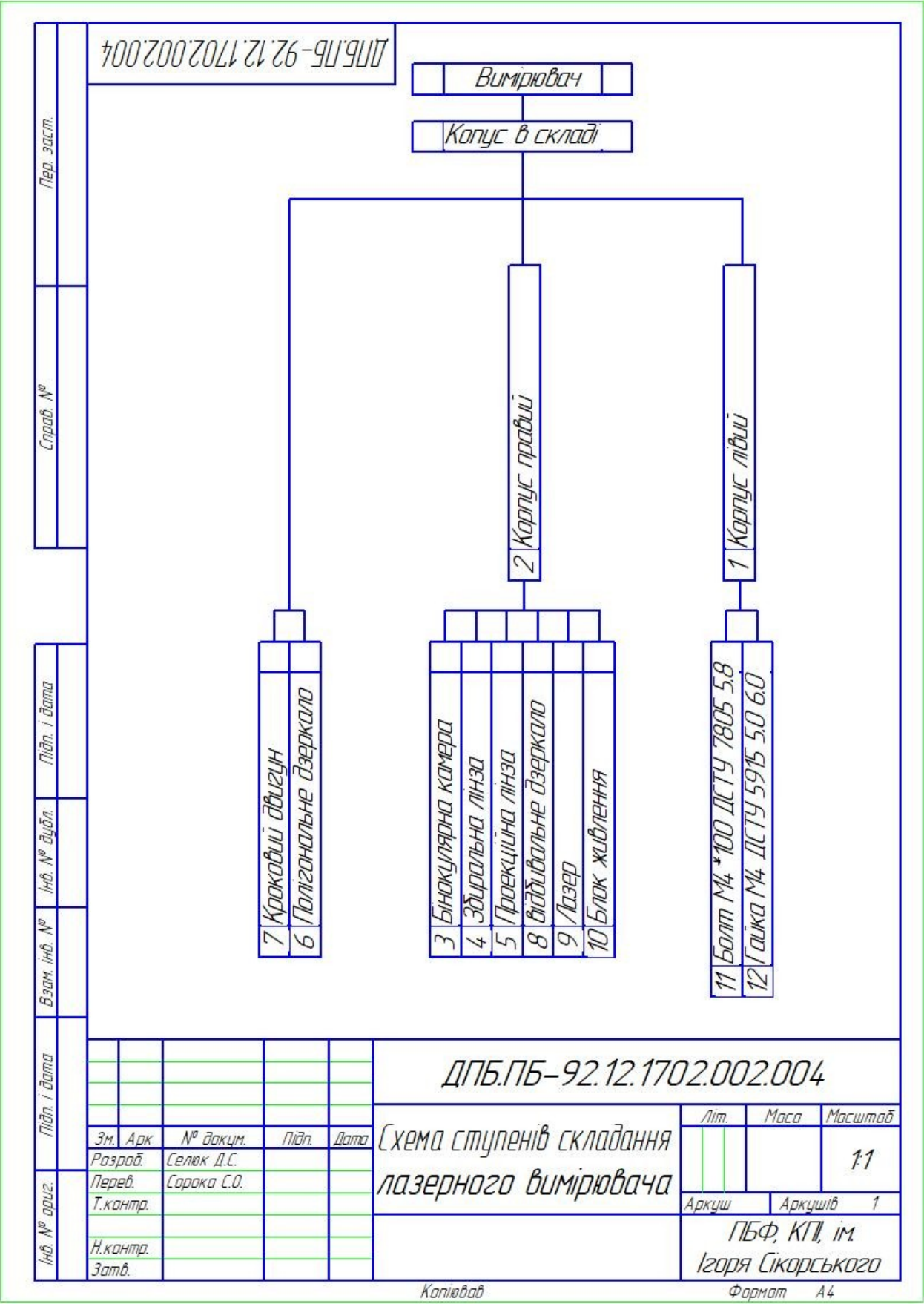
|          |     |             |       |      |                                         |  |  |
|----------|-----|-------------|-------|------|-----------------------------------------|--|--|
|          |     |             |       |      | ДПБ.ПБ-92.12.1702.002.002               |  |  |
| Зм.      | Арк | № докум.    | Підп. | Дата | Структурна схема<br>лазерного виріювача |  |  |
| Разроб.  |     | Селюк Д.С.  |       |      |                                         |  |  |
| Перев.   |     | Сорока С.О. |       |      | Лит. Маса Масштаб                       |  |  |
| Т.контр. |     |             |       |      | 1:1                                     |  |  |
| Н.контр. |     |             |       |      | Аркуш Аркушів 1                         |  |  |
| Затв.    |     |             |       |      | ПБФ, КП, ім<br>Ігоря Сікорського        |  |  |

Копія

Формат А4

## **Додаток В**

### **Схема ступенів складання**



## **Додаток Г**

### **Технологічна схема складання**



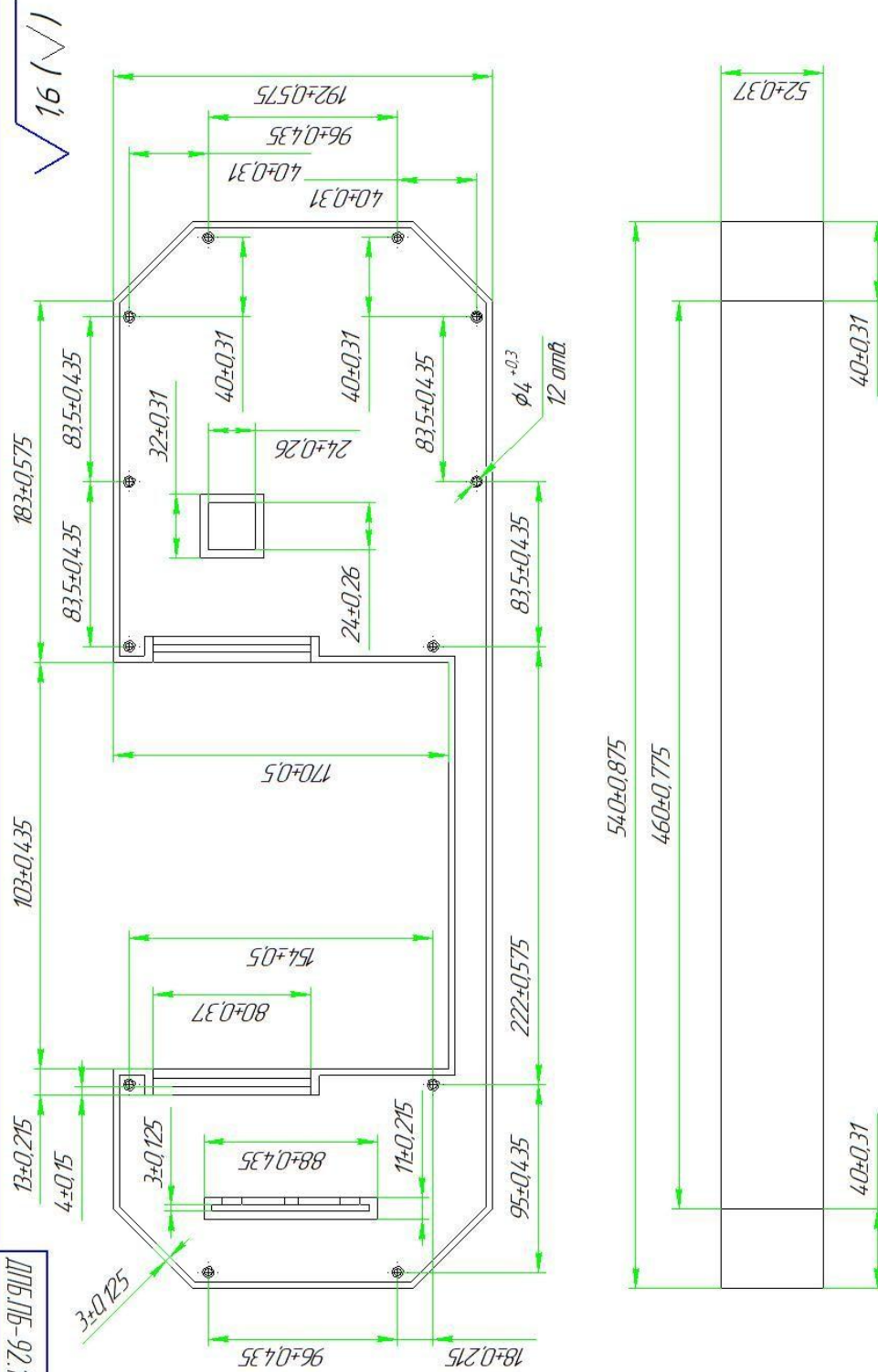
**Додаток Д**

**Складальне креслення,  
специфікація, деталювання**



|              |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
|--------------|--------------|------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Перш. заст.  | Формат       | Зона | Поз.                      | Позначення                  | Найменування             | Кільк. | Прим.                                                                                                                                     |
|              |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
| Спроб. №     |              |      |                           |                             | <u>Документація</u>      |        |                                                                                                                                           |
|              |              |      |                           | ДПБ.ПБ-92.12.1702.006 СК    | Складальне креслення     | 1      |                                                                                                                                           |
|              |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
|              |              |      |                           |                             | <u>Сборочные единицы</u> |        |                                                                                                                                           |
|              | A4           | 3    | ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.003 | Подвійна біноклярна камера  | 1                        |        |                                                                                                                                           |
|              | A4           | 4    | ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.004 | Двоопукла (збиральна) лінза | 1                        |        |                                                                                                                                           |
|              | A4           | 5    | ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.005 | Меніск (проекційна лінза)   | 1                        |        |                                                                                                                                           |
|              | A4           | 6    | ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.006 | Полігональне дзеркало       | 1                        |        |                                                                                                                                           |
|              | A4           | 7    | ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.007 | Кроковий двигун             | 1                        |        |                                                                                                                                           |
|              | A4           | 8    | ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.008 | Віддівальне дзеркало        | 1                        |        |                                                                                                                                           |
| Підп. і дата | A4           | 9    | ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.009 | Лазер                       | 1                        |        |                                                                                                                                           |
|              | A4           | 10   | ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.010 | Блок живлення               | 1                        |        |                                                                                                                                           |
|              |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
|              |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
|              |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
|              |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
|              |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
|              |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
|              |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
|              |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
| Взам. інв. № | Інв. № дубл. |      |                           |                             | <u>Детали</u>            |        |                                                                                                                                           |
|              |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
| Підп. і дата | A4           | 1    | ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.001 | Корпус лівий                | 1                        |        |                                                                                                                                           |
|              | A4           | 2    | ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.002 | Корпус правий               | 1                        |        |                                                                                                                                           |
| Інв. № орг.  |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
|              |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
| Зм. Лист     |              |      |                           | № докум.                    | Підп.                    | Дата   | <div>ДПБ.ПБ-92.12.1702.006 СП</div> <div>Лазерний вимірювач</div> <div>Літ. Аркцш Аркцшід</div> <div>ГФБ, КПІ ім. Ігоря Сікорського</div> |
| Розроб.      |              |      |                           | Селяк Д.С.                  |                          |        |                                                                                                                                           |
| Перевір.     |              |      |                           | Сорока С.О.                 |                          |        |                                                                                                                                           |
| Н.контр.     |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
| Затв.        |              |      |                           |                             |                          |        |                                                                                                                                           |
| Копіював     |              |      |                           | Формат А4                   |                          |        |                                                                                                                                           |



[illegible][illegible]

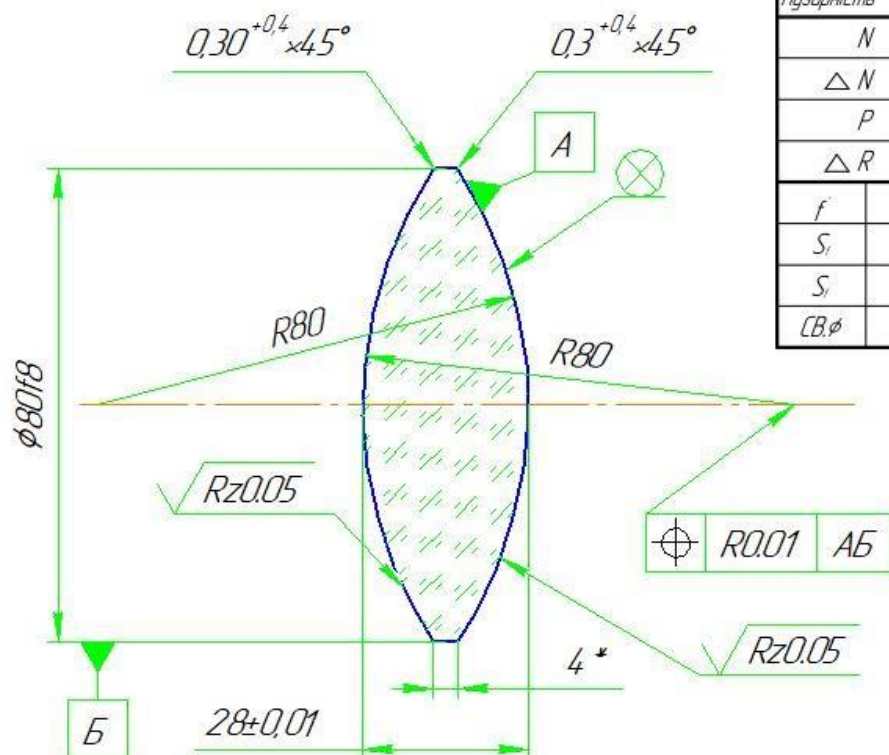




ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.004

✓ Ra2.5 (✓)

|                            |        |
|----------------------------|--------|
| $\Delta n_e$               | 2Г     |
| $\Delta (n_F - n_C)$       | 2Г     |
| Однорідність               | 2      |
| Подвійне променезаломлення | 3      |
| Світлопоглинання           | 3      |
| Беззвйвність               | 2Б     |
| Пузирність                 | 3В     |
| N                          | 2      |
| $\Delta N$                 | 0,5    |
| P                          | IV     |
| $\Delta R$                 | 1      |
| f                          | 14,12  |
| S <sub>r</sub>             | -13,37 |
| S <sub>i</sub>             | 13,37  |
| СВ.φ                       | 46     |



- \* Розміри для довідок
- <sub>A</sub> - просвітлююче покриття; 24I<sub>iso</sub> P<sub>A</sub>=14% ОСТ 3-1901-85
- Нанесення емалі ГФ-245 на неробочі поверхні по ГОСТу 5971-66

ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.004

| Зм.      | Арк. | № докум.    | Підп. | Дата |
|----------|------|-------------|-------|------|
| Розроб.  |      | Селяк Д.С.  |       |      |
| Перев.   |      | Сорока С.О. |       |      |
| Т.контр. |      |             |       |      |
| Н.контр. |      |             |       |      |
| Затв.    |      |             |       |      |

Двоопукла лінза

Скло К8  
ГОСТ 3514-94

| Літ.  | Маса    | Масштаб |
|-------|---------|---------|
|       |         | 1:1     |
| Аркуш | Аркушів | 1       |

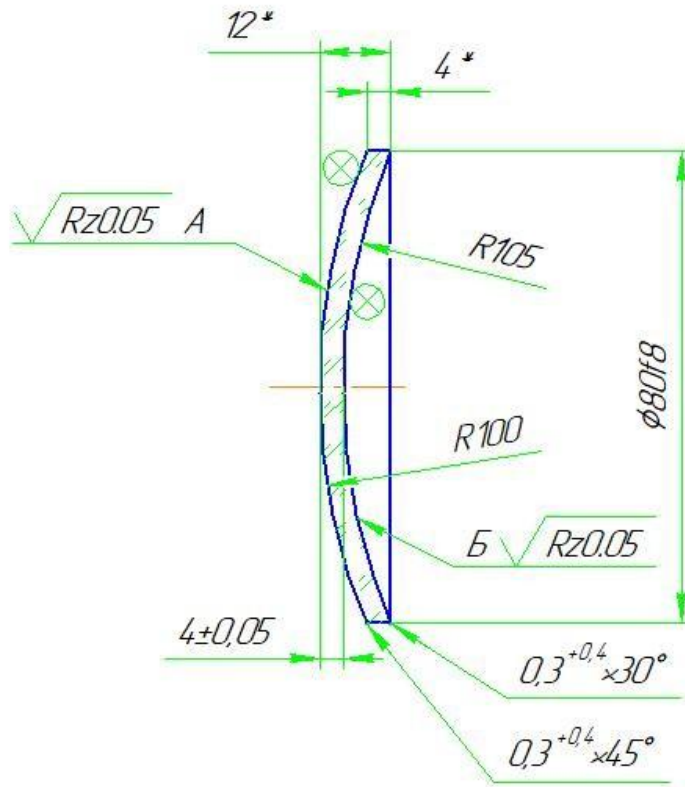
ПФБ, КПІ ім  
Ігоря Сікорського

Копіював

Формат А4

ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.005

✓  $Ra2.5 (\sqrt{1})$



|                     |          |
|---------------------|----------|
| $\Delta n_e$        | 3B       |
| $\Delta(n_i - n_e)$ | 3B       |
| Однорідність        | 3        |
| Подб. променезалом  | 3        |
| Світлопоглинання    | 3        |
| Безсвильність       | 2B       |
| Пузирність          | 2B       |
| $N_1$               | 5        |
| $\Delta N_1$        | 0.3      |
| $N_2$               | 3        |
| $\Delta N_2$        | 0.3      |
| P                   | V        |
| $\Delta R$          | 3        |
| $f'$                | 2540     |
| $S_i$               |          |
| $S_i'$              | 2463,718 |
| $\phi_{CB}$         | 70       |

1\* Розміри для довідок

2. ⊗ - Просвітлююче покриття 43P по ОСТ 3-1901-95,  $\lambda = 520 \pm 50$  нм

ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.005

Меніск

Скло К8  
ГОСТ 3514-94

| Літ. | Маса | Масштаб |
|------|------|---------|
|      |      | 1:1     |

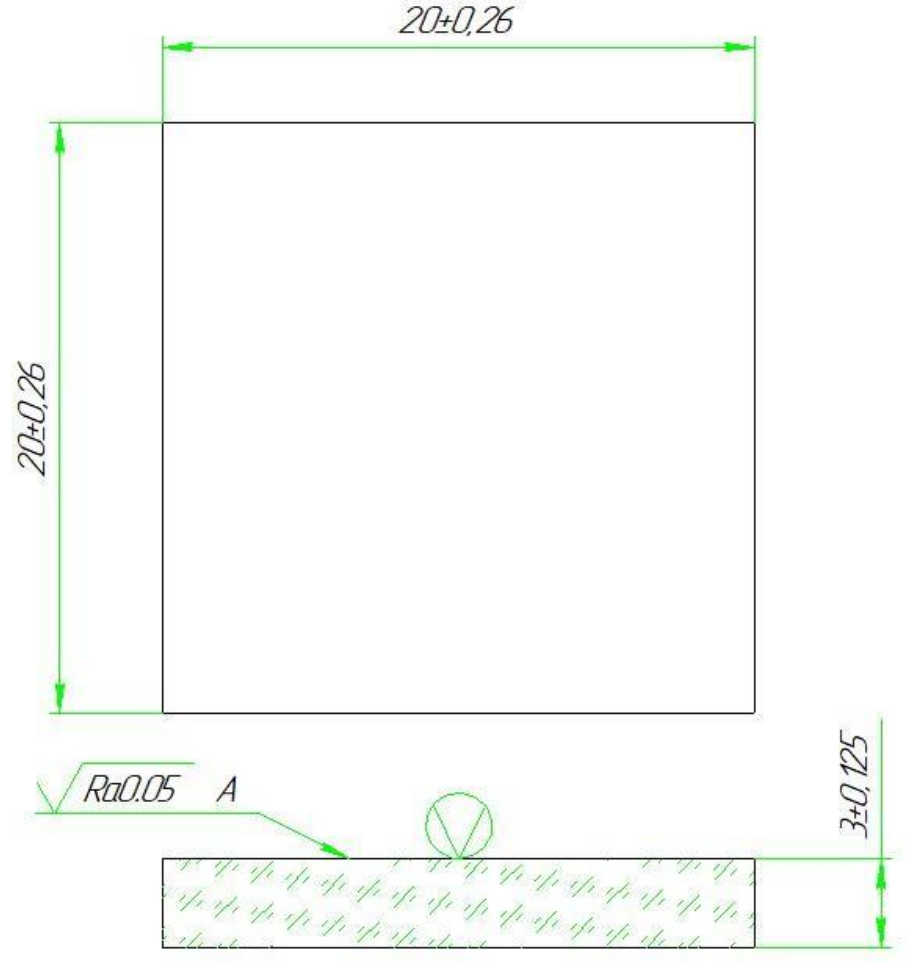
Аркуш Аркушів 1  
ПФБ, КПІ ім  
Ігоря Сікорського

Копіював

Формат А4

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |              |                                |                                                                                               |         |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|----------|-------|------|---------|--|------------|--|--|--------|--|-------------|--|--|----------|--|--|--|--|----------|--|--|--|--|-------|--|--|
| Пер. змст.   | ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.006                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |              |              |                                | $\sqrt{Rz2.5 (\sqrt{I})}$                                                                     |         |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |
|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |              |                                |                                                                                               |         |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |
| Спроб. №     | <p>1. * Розміри для довідок.</p> <p>2. Невказані фаски 0.7x45°</p> <p>3. Дзеркальне покриття 8Х1311 по ОСТ 1907-73</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |              |                                | <p>ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.006</p> <p>Полігональне дзеркало</p> <p>Скло К8<br/>ГОСТ 3514-94</p> |         |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |
|              | <table border="1"> <tr> <td>Зм.</td> <td>Арк.</td> <td>№ докум.</td> <td>Підп.</td> <td>Дата</td> </tr> <tr> <td>Розроб.</td> <td></td> <td>Селюк Д.С.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Перев.</td> <td></td> <td>Сорока С.О.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Т.контр.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Н.контр.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Затв.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> |              |              |                                |                                                                                               | Зм.     | Арк. | № докум. | Підп. | Дата | Розроб. |  | Селюк Д.С. |  |  | Перев. |  | Сорока С.О. |  |  | Т.контр. |  |  |  |  | Н.контр. |  |  |  |  | Затв. |  |  |
| Зм.          | Арк.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | № докум.     | Підп.        | Дата                           |                                                                                               |         |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |
| Розроб.      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Селюк Д.С.   |              |                                |                                                                                               |         |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |
| Перев.       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Сорока С.О.  |              |                                |                                                                                               |         |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |
| Т.контр.     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |              |                                |                                                                                               |         |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |
| Н.контр.     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |              |                                |                                                                                               |         |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |
| Затв.        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |              |                                |                                                                                               |         |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |
| Підп. і дата | Взам. інв. №                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Інв. № дубл. | Підп. і дата | Лім.                           | Маса                                                                                          | Масштаб |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |
| Інв. № ориг. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |              |                                |                                                                                               | 10:1    |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |
|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |              | Аркуш                          | Аркушів                                                                                       | 1       |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |
|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |              | ПФБ, КПІ ім. Ігоря Сікорського |                                                                                               |         |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |
|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |              | Формат А4                      |                                                                                               |         |      |          |       |      |         |  |            |  |  |        |  |             |  |  |          |  |  |  |  |          |  |  |  |  |       |  |  |



|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |              |                                                                                                                       |       |                           |                      |                                   |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| Пер. звіт.   | ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.008                                                                                                                                                                                                                                                                 |              |                                                                                                                       |       | √ Rz2.5 (√)               |                      |                                   |
|              | <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="text-align: center; margin-right: 20px;"> <math>20 \pm 0,26</math><br/> <math>20 \pm 0,26</math> </div>  </div> |              |                                                                                                                       |       |                           |                      |                                   |
| Спроб. №     |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |              |                                                                                                                       |       |                           |                      |                                   |
| Підп. і дата | Інв. № дубл.                                                                                                                                                                                                                                                                              | Взам. інв. № | <p>1. * Розміри для довідок.</p> <p>2. Невказані фаски 0.7x45°</p> <p>3. Дзеркальне покриття 8И31И по ОСТ 1907-73</p> |       |                           |                      |                                   |
|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |              |                                                                                                                       |       |                           |                      |                                   |
| Інв. № ориг. | Підп. і дата                                                                                                                                                                                                                                                                              |              |                                                                                                                       |       | ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.008 |                      |                                   |
|              | Зм.                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Арк          | № докум.                                                                                                              | Підп. | Дата                      | Відбивальне дзеркало |                                   |
|              | Розроб.                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              | Селяк Д.С.                                                                                                            |       |                           | Літ.                 | Маса                              |
|              | Перев.                                                                                                                                                                                                                                                                                    |              | Сорока С.О.                                                                                                           |       |                           | Масштаб              |                                   |
|              | Т.контр.                                                                                                                                                                                                                                                                                  |              |                                                                                                                       |       |                           | 5:1                  |                                   |
| Н.контр.     |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |              |                                                                                                                       |       | Аркуш                     | Аркушів              | 1                                 |
| Затв.        |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |              |                                                                                                                       |       | Скло К8<br>ГОСТ 3514-94   |                      | ПФБ, КПІ ім.<br>Ігоря Сікорського |
| Копіював     |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |              |                                                                                                                       |       | Формат А4                 |                      |                                   |

Формат А4

ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.010

1,6 (√)

93±0,435

93±0,435

69,5±0,37

ДПБ.ПБ-92.12.1702.006.010

Корпус блоку живлення

ABS ДСТУ EN ISO 15493:2015

Літ.

Маса

Масштаб

12

1

ПФБ, КПІ ім.  
Ігоря Сікорського

Формат A4

Зм.

Арк.

№ докум.

Підп.

Дата

Разроб.

Селек Д.С.

Перев.

Сорока С.О.

Т.контр.

Н.контр.

Затв.

Пер. змст.

Спроб. №

Підп. і дата

Інб. № дубл.

Взам. інб. №

Підп. і дата

Інб. № ориг.